



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ANTE FENÓMENOS DE EROSIÓN,  
CORROSIÓN Y CAVITACIÓN DE UN ACERO INOXIDABLE UNS S42000 Y UN  
BRONCE UNS C52400 PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN ÁLABES DE  
TURBINAS HIDROCINÉTICAS**

Daniel Augusto Ramírez Hernández

Tesis de maestría presentada para optar al título de Magíster en Ingeniería

Director

Juan Marcelo Rojas Arango, Doctor (PhD) en Ingeniería Metalúrgica y de Materiales

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

Cita	Daniel Ramírez Hernández [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] D. Ramírez Hernández, “Evaluación del comportamiento ante fenómenos de erosión, corrosión y cavitación de un acero inoxidable UNS S42000 y un bronce UNS C52400 para su potencial aplicación en álabes de turbinas hidrocinéticas”, Tesis de maestría, <b>Maestría en Ingeniería</b> , Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Maestría en Ingeniería, Cohorte III.

Grupo de Investigación Investigaciones Pirometalúrgicas y de Materiales (GIPIMME).

Centro de Investigación Ambientales y de Ingeniería (CIA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla

**Jefe departamento:** Francisco Javier Herrera Builes.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres Magnolia Hernández y Augusto Ramírez, que siempre han sido una gran motivación en mi vida.

A mi orientador, Juan Marcelo Rojas por su amistad y apoyo durante este proceso, el cual ha dejado aprendizajes no solo a nivel profesional sino también personal.

A los profesores Claudia Serna y Ricardo Aristizábal por su ayuda incondicional en pro del desarrollo de este proyecto.

Al PhD. Óscar Ríos, el ingeniero Mateo Montoya y el joven investigador Luis David Morales por su gran colaboración.

Muchas gracias al Laboratorio de Fundición de la Universidad de Antioquia y compañeros que allí aportaron sus ideas y trabajo durante este proceso.

Al grupo de investigación GIPIMME, por acogerme entre sus integrantes y por su aporte en mi formación profesional.

Al grupo de investigación GEA por su apoyo en el desarrollo del proyecto.

A COLOLOMBIA CIENTIFICA, SÉNECA y SAPIENCIA por el apoyo económico que realizaron al proyecto.

A la Universidad de Antioquia, donde me formé profesionalmente.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Turbinas hidrocínicas de flujo cruzado [10].	14
<b>Figura 2.</b> Turbina hidrocínica de eje horizontal [14].	15
<b>Figura 3.</b> Rotor tipo H [28].	18
<b>Figura 4.</b> Turbina hidrocínica vertical tipo H-Darrieus [10].	18
<b>Figura 5.</b> Influencia del ángulo de impacto en la velocidad de erosión de aluminio y alúmina con partículas de SiC a 152 m/s [40].	21
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática de la erosión causada por el mecanismo de deformación en impacto normal y el mecanismo de corte en impacto oblicuo en materiales a) dúctiles y b) frágiles [45].	22
<b>Figura 7.</b> Ilustración esquemática de a) mecanismo de erosión por microarado y b) por microcorte [43].	23
<b>Figura 8.</b> Ilustraciones esquemáticas de los pasos de remoción de metal a) capa erosionada y deformada, b) propagación de grietas debajo de la superficie y c) fractura de la capa deformada [45].	23
<b>Figura 9.</b> Ilustración esquemática de los pasos de remoción de metal a baja velocidad y alto ángulo de impacto. a) capa erosionada y deformada, b) deformación plástica y aplanamiento de crestas y c) Fractura y eliminación de labios vulnerables [45].	24
<b>Figura 10.</b> Ilustración esquemática de los pasos del proceso de corte secundario a alta velocidad y alto ángulo de impacto [45].	24
<b>Figura 11.</b> Parámetros importantes que influyen en la erosión por sedimentos [43].	25
<b>Figura 12.</b> Daño causado por efecto combinado de cavitación y erosión en el álabe [47].	26
<b>Figura 13.</b> Cráteres producidos por colapso simple en (a) una turbina Francis, (b) un túnel de cavitación hidrodinámica, (c) un generador de cavitación de vórtice y (d) un dispositivo vibratorio magnetoestrictivo. (Las escalas están indicadas por líneas debajo de cada fotografía.) [50].	27
<b>Figura 14.</b> Curva de polarización potenciodinámica del acero bajo pH=4, fuente: autor.	30
<b>Figura 15.</b> Componentes del RDA [36].	33
<b>Figura 16.</b> Respuesta al temple de un acero inoxidable martensítico con 12% de Cr [74].	35
<b>Figura 17.</b> Microestructura templada martensítica acicular típica de martensita no templada con presencia de carburos globulares de un acero inoxidable UNS S42000 a) micrografía óptica, b) micrografía SEM a 10000X [75].	36
<b>Figura 18.</b> Diagrama de fase cobre-estaño [78].	38
<b>Figura 19.</b> Macroestructura de la sección longitudinal de lingotes de la aleación Cu-8%Sn-0,25%P: a) sin adición de Zr, b) con adición de 0,08% de Zr [80].	39
<b>Figura 20.</b> Relación entre el tiempo t, el sobrecalentamiento y la naturaleza de la aleación para diferentes módulos de piezas [81].	44
<b>Figura 21.</b> Dimensiones de la unión relacionadas con el diámetro del alimentador [84].	48
<b>Figura 22.</b> Molde de fundición en arena. En la imagen (a) se representa un molde abierto, en la (b) se presenta un molde con un macho o corazón y una mazarota ciega.	50
<b>Figura 23.</b> Sistema de llenado colada y alimentadores y mazarotas [85].	51
<b>Figura 24.</b> Resultados de operaciones booleanas en un cubo y esfera [77].	52
<b>Figura 25.</b> Clasificación de los procesos de fundición [82].	57
<b>Figura 26.</b> Cadena de proceso RP típica [94].	59
<b>Figura 27.</b> Pasos en la secuencia de producción de la fundición en arena [76].	60
<b>Figura 28.</b> Metodología utilizada en la ejecución del proyecto.	63
<b>Figura 29.</b> Diseño CAD de álabe tipo Darrieus (mm).	65
<b>Figura 30.</b> Diseño CAD del sistema de colada para álabes tipo Darrieus.	66
<b>Figura 31.</b> Dimensiones de muestras para ensayos experimentales (mm).	66
<b>Figura 32.</b> Diseño CAD del sistema de colada para la obtención de muestras (mm).	67
<b>Figura 33.</b> Prototipo del sistema de colada y álabes.	70

<b>Figura 34.</b> Prototipo del modelo de fundición. ....	70
<b>Figura 35.</b> Prototipo del sistema de colada de barras.....	71
<b>Figura 36.</b> Molde cerámico para fundición de álabes. ....	72
<b>Figura 37.</b> Tratamiento térmico de sinterizado y eliminación de PLA para el molde. ....	72
<b>Figura 38.</b> Molde de arena para fundición de cuerpos de prueba. ....	73
<b>Figura 39.</b> Muestras de bronce y acero inoxidable para los ensayos experimentales. ....	75
<b>Figura 40.</b> Curva RPM vs % Potencia del variador. ....	77
<b>Figura 41.</b> Distribución granulométrica de la arena de sílice usada en los ensayos de erosión.....	78
<b>Figura 42.</b> RDA habilitado para <b>a)</b> ensayo de erosión, <b>b)</b> ensayo de cavitación.....	78
<b>Figura 43.</b> Potenciostato/galvanostato. ....	79
<b>Figura 44.</b> Simulación de llenado de álabes para la aleación a) UNS S42000 y b) UNS C52400 refinada con Zr. ....	82
<b>Figura 45.</b> Simulación de llenado de barras para obtención de muestras para la aleación a) UNS S42000 y b) UNS C52400 refinada con Zr. ....	83
<b>Figura 46.</b> Predicción de defectos de fundición de álabes a) Acero UNS S42000 y b) bronce UNS C52400. ....	84
<b>Figura 47.</b> Predicción de defectos de fundición de álabes a) Acero UNS S42000 y b) bronce UNS C52400. ....	85
<b>Figura 48.</b> Álabes fundidos. ....	86
<b>Figura 49.</b> Barra fundida para obtención de cuerpos de prueba. ....	87
<b>Figura 50.</b> MDE promedio de los ensayos de erosión. ....	91
<b>Figura 51.</b> MDE promedio de los ensayos de cavitación.....	91
<b>Figura 52.</b> Micrografías de muestra de acero inoxidable, a) 200x b) 1000x. ....	92
<b>Figura 53.</b> Micrografía de muestra de Bronce-10%Sn refinado con circonio a) 200x y b) 1000x...	93
<b>Figura 54.</b> Desgaste producido en el acero inoxidable debida a erosión en medio básico (pH=10) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.....	94
<b>Figura 55.</b> Desgaste producido en el acero inoxidable debida a erosión en medio ácido (pH=4) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM Zona 2 a 1000X. ....	95
<b>Figura 56.</b> Desgaste producido en el bronce debida a erosión en medio básico (pH=10) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.....	97
<b>Figura 57.</b> Desgaste producido en el bronce debido a erosión en medio ácido (pH=4) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.....	98
<b>Figura 58.</b> Desgaste producido en el acero inoxidable debido a cavitación en medio básico (pH=10). a) Estereoscopio, b) SEM a 600X, c) SEM a 1000X.....	100
<b>Figura 59.</b> Desgaste producido en el acero inoxidable debida a cavitación en medio ácido (pH=4). a) Estereoscopio, b) SEM a 600X, c) SEM a 5000X.....	101
<b>Figura 60.</b> Imágenes SEM de cráter superficial causado por cavitación en RDA de a) Aluminio después 5 h a 20X, b) Acero 1020 después de 5 h a 500X, c) Latón después 15 h a 500X [67].....	102
<b>Figura 61.</b> Desgaste producido en el bronce debida a cavitación en medio básico (pH=10). a) Estereoscopio, b) SEM a 1000X, c) SEM a 5000X.....	104
<b>Figura 62.</b> Desgaste producido en el bronce debida a cavitación en medio ácido (pH=4). a) Estereoscopio, b) SEM a 2500X, c) SEM a 10000X.....	105
<b>Figura 63.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en medio básico (pH=10).....	106
<b>Figura 64.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en medio ácido (pH=4). ....	106
<b>Figura 65.</b> Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en solución de NaCl al 3,5%. ....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Tipos de turbinas más utilizadas. ....	12
<b>Tabla 2.</b> Constantes de los materiales para determinar la velocidad de corrosión. ....	32
<b>Tabla 3.</b> Coeficiente o factor de forma [75]. ....	48
<b>Tabla 4.</b> Programas de simulación de fundición [14]. ....	54
<b>Tabla 5.</b> Metodología de simulación y optimización de colada [3], [15]. ....	55
<b>Tabla 6.</b> Composición química nominal de las aleaciones en estudio [99], [100]. ....	64
<b>Tabla 7.</b> Propiedades de entrada de los materiales para la simulación de fundición. ....	68
<b>Tabla 8.</b> Parámetros de entrada del programa de simulación para cada material. ....	68
<b>Tabla 9.</b> Parámetros de impresión 3D. ....	69
<b>Tabla 10.</b> Materias primas usadas para la fabricación del acero inoxidable UNS S42000. ....	73
<b>Tabla 11.</b> Materias primas usadas para la fabricación del bronce UNS C52400. ....	74
<b>Tabla 12.</b> Nomenclatura y rugosidad promedio de probetas usadas para ensayos experimentales. .	75
<b>Tabla 13.</b> Parámetros de los ensayos de erosión y cavitación. ....	79
<b>Tabla 14.</b> Parámetros de los ensayos de corrosión. ....	80
<b>Tabla 15.</b> Procedimiento metalográfico para análisis microestructural. ....	80
<b>Tabla 16.</b> Composición química de las aleaciones fabricadas. ....	87
<b>Tabla 17.</b> Resultados de los ensayos de erosión y cavitación en RDA. ....	88
<b>Tabla 18.</b> Dureza de las aleaciones fundidas. ....	92
<b>Tabla 19.</b> Corriente de corrosión. ....	107
<b>Tabla 20.</b> Velocidad de penetración. ....	108
<b>Tabla 21.</b> Velocidad de corrosión. ....	108

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	9
2	OBJETIVOS .....	11
2.1	Objetivo general .....	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3	MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	11
3.1	TURBINAS HIDROCINÉTICAS .....	13
3.1.1	Turbinas de eje vertical .....	16
3.1.2	Turbina de tres álabes .....	17
3.1.3	Rotores tipo H .....	17
3.1.4	Turbinas tipo Darrieus .....	18
3.2	EROSIÓN.....	19
3.3	CAVITACIÓN .....	25
3.4	CORROSIÓN.....	28
3.5	APARATO DE DISCO ROTATIVO (RDA) .....	32
3.6	SELECCIÓN DE MATERIALES .....	33
3.6.1	Acero inoxidable .....	34
3.6.2	Aleaciones Cu-Sn.....	36
3.7	SISTEMAS DE COLADA.....	39
3.7.1	Posición de las mazarotas .....	40
3.7.2	Modo o forma de solidificación de las aleaciones .....	40
3.7.3	Grado de oxidación de la aleación en estado líquido.....	40
3.7.4	Forma de la pieza .....	41
3.7.5	Naturaleza del material del molde .....	41
3.7.6	Sanidad interna y externa de la pieza.....	42
3.7.7	Tiempo de colada .....	43
3.7.8	Tiempo de solidificación.....	44
3.8	SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	46
3.9	MOLDEO.....	50
3.10	DISEÑO CAD DE UN SISTEMA DE COLADA.....	51
3.10.1	Extrusión y barrido.....	51
3.10.2	Geometría sólida constructiva.....	52
3.10.3	Modelado basado en características .....	52
3.10.4	Técnicas especiales .....	52
3.11	SIMULACIÓN DE FUNDICIÓN.....	53
3.11.1	Software de simulación: SOLIDCast®, FLOWCast® y OPTICast®: .....	56
3.12	PROCESO DE FUNDICIÓN.....	56
3.12.1	FUNDICIÓN POR CERA PERDIDA.....	58

3.12.2	FUNDICIÓN EN ARENA.....	59
3.13	FABRICACIÓN DEL MODELO .....	60
3.14	MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DEL MODELO.....	61
3.15	IMPRESIÓN 3D.....	62
4	METODOLOGÍA .....	63
4.1	Reconocimiento y búsqueda de la información. ....	63
4.2	Preselección de materiales de estudio .....	64
4.3	Diseño CAD de sistemas de colada.....	64
4.4	Simulación de la fundición.....	67
4.5	Prototipado 3D de modelos de fundición.....	69
4.6	Fabricación de moldes de fundición.....	71
4.7	Proceso de fundición. ....	73
4.8	Fabricación de cuerpos de prueba. ....	74
4.9	Caracterización de erosión, cavitación y corrosión.....	76
4.10	Caracterización microestructural.....	80
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	81
5.1.1	Simulación de fundición .....	81
5.1.2	Proceso de fundición.....	86
5.1.3	Caracterización de erosión, cavitación y corrosión .....	87
5.1.4	Caracterización microestructural .....	92
5.1.5	Ensayos de Corrosión.....	106
6	CONCLUSIONES .....	112
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113

## SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

<b>Cm</b>	Centímetros
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b>MSc</b>	Magister Scientiae
<b>UdeA</b>	Universidad de Antioquia
<b>RDA</b>	Aparato de disco rotativo
<b>UNS</b>	Unified numbering system
<b>CEPAL</b>	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
<b>MW</b>	Mega watts
<b>ZNI</b>	Zonas no interconectadas
<b>RCECS</b>	River Current Energy Conversion System
<b>WCT</b>	Turbinas de corriente de agua
<b>SEM-EDS</b>	Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive Spectroscopy
<b>CFD</b>	Computational Fluid Dynamics
$\lambda$	Conductividad térmica del material, cal/cm*s*°C
<b>c</b>	Calor específico del material, cal/g*°C
<b>mv</b>	Masa volumétrica del material, g/mm <sup>3</sup>

## RESUMEN

Colombia posee una gran riqueza hídrica propicia para la producción de energía eléctrica, y con el avance ingenieril y tecnológico se están implementando nuevas tecnologías de energías alternativas como son las turbinas hidrocínicas. En la actualidad, su implementación es novedosa y se ha avanzado en su diseño y desarrollo para ser aplicadas en zonas no interconectadas (ZNI). En estas zonas la infraestructura para el suministro de energía eléctrica es precaria y se ha convertido en objeto de estudio y desarrollo para mejorar la calidad de vida de estas poblaciones. Por esta razón, en el marco del proyecto SENECA 60611 “Generación de energía eléctrica a pequeña escala mediante turbinas hidráulicas e hidrocínicas” se planteó en este trabajo de investigación evaluar el comportamiento de un acero inoxidable UNS S42000 y un bronce UNS C52400 refinado con Zr ante fenómenos de erosión, cavitación y corrosión para su potencial aplicación en la fabricación de los álabes de turbinas hidrocínicas de eje vertical. Por esta razón, fue necesario establecer las condiciones de procesamiento para los materiales mencionados haciendo uso de los diseños de perfil hidrodinámico propuestos en el proyecto SENECA 60611 y optimizando las condiciones de fabricación para obtener resultados confiables. Esto se llevó a cabo haciendo uso de predicción de defectos por medio de simulación de fundición utilizando el programa SolidCast. Se obtuvieron parámetros como geometrías, temperaturas, tiempo de vaciado y comportamiento del metal fundido dentro de la cavidad del molde adecuados para obtener piezas libres de defectos, además de ser útil en la ejecución del prototipado 3D de los modelos usados en el moldeo de las piezas de interés. A los cuerpos de prueba obtenidos se les realizó medición de dureza y rugosidad, posteriormente se llevaron a cabo ensayos de erosión y cavitación durante 18 horas en agua potable con pH=10 y pH=4 a 1250 RPM y en el caso de los ensayos de erosión se usó arena de sílice con tamaño de partícula en el rango de 0,5 a 2 mm haciendo uso de un RDA (aparato de disco rotativo), además se realizaron ensayos de corrosión en un potencióstato a pH=10, PH=4 y una solución de NaCl al 3,5% usada como referencia. Se encontró que el acero inoxidable presenta valores promedio de MDE a pH=10 más bajos (55% en erosión y 35% en cavitación) respecto al bronce, caso contrario para un pH=4 con valores mal altos (24% en erosión y 64% en cavitación) respecto al bronce. El comportamiento fue similar para la velocidad de corrosión donde a pH=10 y pH=4 su valor fue de 86% y 64% más bajo que para el bronce respectivamente, al igual que con los valores de velocidad de penetración donde a pH=10 y pH=4 su valor fue de 85% y 61% más bajo que para el bronce respectivamente. También se analizó por microscopía óptica la microestructura presentada por dichas aleaciones y por microscopía electrónica de barrido el grado de deterioro sufrido por los cuerpos de prueba, donde se presentó un mayor daño sufrido debido a la erosión por sedimentos (arena de sílice) donde no se encontraron evidencias claras de daño por cavitación. Finalmente, en base a los resultados obtenidos se recomendó que según las características de pH del recurso hídrico se elija el acero inoxidable UNS S42000 para

medios básicos o el bronce UNS C52400 refinado para medios ácidos como el material para la fabricación de los de álabes de turbinas hidrocínéticas de eje vertical.

**Palabras clave:** *cavitación, erosión, corrosión, desgaste, turbina hidrocínética.*

## **ABSTRACT**

Colombia has a great wealth of water that is propitious for the production of electricity, and with engineering and technological progress, new alternative energy technologies such as hydrokinetic turbines are being implemented. Currently, their implementation is novel and progress has been made in their design and development to be applied in non-interconnected zones (ZNI). In these areas, the infrastructure for the supply of electricity is precarious and has become the object of study and development to improve the quality of life of these populations. For this reason, within the framework of the SENECA 60611 project "Small-scale electric power generation by means of hydraulic and hydrokinetic turbines", this research work was proposed to evaluate the behavior of a stainless steel UNS S42000 and a bronze UNS C52400 refined with Zr against erosion, cavitation and corrosion phenomena for its potential application in the manufacture of vertical axis hydrokinetic turbine blades. For this reason, it was necessary to establish the processing conditions for the mentioned materials making use of the hydrodynamic profile designs proposed in the SENECA 60611 project and optimizing the manufacturing conditions to obtain reliable results. This was carried out making use of defect prediction by means of casting simulation using the SolidCast program. Parameters such as geometries, temperatures, casting time and behavior of the molten metal inside the mold cavity adequate to obtain defect-free parts were obtained, besides being useful in the execution of 3D prototyping of the models used in the molding of the parts of interest. The test bodies obtained were measured for hardness and roughness, then erosion and cavitation tests were carried out for 18 hours in drinking water with pH=10 and pH=4 at 1250 RPM and in the case of erosion tests, silica sand was used with particle size in the range of 0, 5 to 2 mm using a RDA (rotating disk apparatus), in addition, corrosion tests were carried out in a potentiostat at pH=10, PH=4 and a 3.5% NaCl solution used as reference. It was found that stainless steel presents lower average MDE values at pH=10 (55% in erosion and 35% in cavitation) with respect to bronze, the opposite case for pH=4 with poorly high values (24% in erosion and 64% in cavitation) with respect to bronze. The behavior was similar for the corrosion rate where at pH=10 and pH=4 its value was 86% and 64% lower than for bronze respectively, as well as with the penetration rate values where at pH=10 and pH=4 its value was 85% and 61% lower than for bronze respectively. The microstructure presented by these alloys was also analyzed by optical microscopy and by scanning electron microscopy the degree of deterioration suffered by the test bodies, where a greater damage suffered due to erosion by sediments (silica sand)

was presented, where no clear evidence of damage by cavitation was found. Finally, based on the results obtained, it was recommended that according to the pH characteristics of the water resource, UNS S42000 stainless steel for basic media or refined UNS C52400 bronze for acid media be chosen as the material for the manufacture of vertical axis hydrokinetic turbine blades.

**Keywords:** cavitation, erosion, corrosion, wear, hydrokinetic turbine.

## 1 INTRODUCCIÓN

Muchos países de América latina dependen de recursos hídricos como fuente importante de la economía, especialmente en la producción de energía eléctrica y para comercialización de minerales. Según datos expuestos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), para los países suramericanos, la producción de la industria gira en torno a la explotación hidroeléctrica y la minería, donde para 2015 la potencia instalada en el cono sur del continente supera los 275.000 MW y la producción minera representaba entre el 15 y el 45% del PIB [1]. Estas actividades implican transporte de material particulado propio del lodo como naturalmente se encuentra en el lecho de los ríos, como también el proveniente de otras actividades como la minería. La acción mecánica de las partículas y el ataque químico tienen como consecuencia el aumento de los tipos y frecuencia de fallo de componentes de turbinas para la generación de energía. En algunos casos, la erosión y la corrosión actúan de forma conjunta, lo que conduce a daños más graves que los causados de forma individual presentando sinergia positiva en el proceso de daño material. Además, se presentan fenómenos de erosión y cavitación, que también dan lugar a la sustitución de componentes con cortos periodos de operación [2].

La cavitación y la erosión en diferentes metales fue estudiada por Richman y McNaughton [3], quienes compararon varias aleaciones tradicionales ferrosas, algunas series de aluminio, diferentes aleaciones base cobre, además de aleaciones base níquel y cobalto. Los resultados mostraron que los metales puros presentan mayor tasa de erosión respecto a sus aleaciones, lo cual puede deberse a la formación de fases que incrementan su dureza y favoreciendo tanto su resistencia a la erosión como también a la cavitación disminuyendo pérdida de masa.

Con base en la revisión bibliográfica y teniendo en cuenta las necesidades en las cuales se deben desempeñar los álabes de turbinas hidrocinéticas, se proponen dos materiales metálicos que pueden ser usados en su fabricación, los cuales respondan satisfactoriamente a los fenómenos de erosión, corrosión y cavitación bajo diferentes condiciones hidráulicas de instalación.

En la actualidad, existen en Colombia regiones del territorio donde se presentan deficiencias en el suministro de energía eléctrica. La necesidad de infraestructura para suplir estas necesidades en zonas

no interconectadas (ZNI) se ha convertido en un foco de estudio en los últimos años apuntando a su desarrollo e implementación para mejorar la calidad de vida de esta población. Por esta razón, es clave impulsar el desarrollo de proyectos que promuevan la implementación de tecnologías sostenibles para la generación de energía eléctrica.

La generación de energía eléctrica con tecnologías que utilicen fuentes renovables se considera como estrategia central para dar solución a esta problemática con el uso de biomasa, energía solar, eólica y pequeñas centrales hidroeléctricas a partir de proyectos piloto en localidades determinadas para su posterior réplica en otros lugares con alto grado de pobreza y sin oportunidades de desarrollo socioeconómico. Se ha identificado, que las turbinas hidrocínéticas tienen algunas ventajas frente a las demás tecnologías en aspectos como facilidad de fabricación, versatilidad, adaptación, además de no requerir gran infraestructura y mantenimiento para su funcionamiento.

En las pequeñas centrales hidroeléctricas, la turbina es la pieza principal debido al papel que desempeña en la conversión de la energía hidráulica del agua en energía mecánica de rotación. Las características de cabeza y caudal del lugar de aplicación son también importantes para determinar el tipo de turbina óptimo, donde se puede encontrar algunas como la Francis, la Kaplan y la Pelton como las más utilizadas a nivel mundial, pero se encuentran algunas otras menos utilizadas como la turbina Turgo y la Michell Banki a las cuales se recurre en proyectos hidroeléctricos de menor escala. En una turbina hidrocínética además del diseño de perfil hidráulico y el comportamiento del material ante la interacción con el medio, es de suma importancia tener en cuenta algunas características como eficiencia, viabilidad económica, impacto ambiental, confiabilidad y sostenibilidad, para realizar la selección de materiales adecuados para la fabricación de los componentes principales.

Las turbinas hidrocínéticas se han venido implementando en mini y micro centrales con el propósito de incursionar en la aplicación de esta tecnología en el país, teniendo en cuenta que este tipo de turbinas es adecuado en condiciones de medianas alturas y medianos caudales. Ventajas como su facilidad de instalación, de fabricación y su mínima afectación debida a fenómenos de cavitación gracias a su diseño, hacen de las turbinas hidrocínéticas una tecnología destacada para su aplicación en la generación de energía eléctrica. El reto se presenta en su diseño, debido a su complejidad en la geometría y acabado superficial de sus componentes críticos como los álabes, que se convierte en un aspecto importante a la hora de realizar la selección de materiales para su fabricación y de lo cual depende en gran medida su rendimiento y vida útil en operación, ya que se ha identificado que estos componentes han sido afectados en condiciones como erosión, corrosión y cavitación induciendo de esta manera a un deterioro superficial que puede lograr desencadenar fragilidad estructural y cambios en su comportamiento hidrodinámico. Por esta razón, es preciso obtener mediante una adecuada selección de materiales para la fabricación, minimizar el efecto de estos fenómenos de desgaste sobre los componentes para reducir costos de mantenimiento o reparación y extender su vida útil.

Con este trabajo se busca responder a la pregunta de ¿Cuál de los materiales metálicos estudiados presenta el mejor comportamiento ante los fenómenos de corrosión, erosión y cavitación para su potencial aplicación en álabes tipo Darrieus de turbinas hidrocínicas de eje vertical?

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo general**

Evaluar el comportamiento ante fenómenos de erosión, corrosión y cavitación de un acero inoxidable UNS S42000 y un bronce UNS C52400 para su potencial aplicación en álabes tipo Darrieus de turbinas hidrocínicas de eje vertical.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Establecer las condiciones de procesamiento necesarias para la obtención de álabes tipo Darrieus en aleaciones fundidas.
- Evaluar la influencia de los fenómenos de erosión, cavitación y corrosión sobre las aleaciones propuestas bajo condiciones hidráulicas específicas de laboratorio.
- Determinar la aleación que presente mejor comportamiento para su aplicación en álabes tipo Darrieus.

## **3 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

La energía que proporciona el caudal de un río se considera de carácter limpio y constante, y para continuar con la premisa de implementar tecnologías con estas características es importante pensar en las ventajas de minimizar la necesidad de construir una infraestructura civil como tradicionalmente se hace en el montaje de las grandes represas hidroeléctricas. Debido a esto, se ha desarrollado hasta la actualidad una serie de turbinas sumergibles en el cauce de los ríos que se han denominado turbinas hidrocínicas, teniendo como propósito principal generar energía eléctrica para abastecer poblaciones apartadas de las zonas urbanas y del sistema de interconexión eléctrico, también llamadas zonas no interconectadas (ZNI). La inserción de este tipo de tecnología dentro del mercado de las llamadas energías renovables tiene algunas ventajas; por ejemplo, la versatilidad para ser usadas en diferentes escenarios donde no es posible o es inadecuado instalar otro tipo de tecnologías. También permite el aprovechamiento del recurso energético de ríos, mares, o sistemas de canales artificiales evitando la necesidad de construir grandes instalaciones como casa de máquinas o presas, así como

el desvío del cauce natural de los ríos, lo que minimiza el impacto ambiental en el lugar de instalación [4].

Gómez et al. en una investigación para la Secretaría de Participación Ciudadana de la Gobernación de Antioquia dejan claro que tanto la turbina Pelton como la Francis son las más usadas en minicentrales, pero en general en micro centrales eléctricas la Pelton es la dominante en el país. Sin embargo, enfatizan que, a pesar de la hegemonía de estos tipos de turbina, en el país ha sido instalada la turbina hidrocinéticas en minicentrales (10 a 1000 KW) y en micro centrales (10 a 100 KW). Las turbinas pueden ser clasificadas según su principio de operación, ya sean de acción o de reacción. Las turbinas de acción aprovechan sólo la velocidad del flujo de agua para producir un movimiento de rotación, mientras que las turbinas de reacción además de esto también aprovechan la pérdida de presión producida en su interior. En la **Tabla 1**, es posible observar los tipos de turbinas relacionando la cabeza como característica de comparación y en ella se detallan que además de las turbinas Pelton existen otros tipos como la turbina Turgo y la turbina de flujo cruzado [5].

**Tabla 1.** Tipos de turbinas más utilizadas.

Tipo de turbina	Cabeza (> 50 m)	Cabeza (10-50 m)	Cabeza (< 10 m)
Impulso	Pelton	Flujo cruzado	
	Turgo	Turgo	Flujo cruzado
		Pelton multi-inyectores	
Reacción		Francis	Francis
			Kaplan

Por otro lado, se conoce que la mayoría de los países latinoamericanos dependen de recursos hídricos como fuente importante de la economía, especialmente en la producción de energía eléctrica y para comercialización de minerales. Según datos expuestos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), para esta región hasta el año 2015 la potencia instalada superaba los 275.000 MW y la producción minera representaba entre el 15 y el 45% del PIB [1]. Estas actividades implican transporte de material particulado propio del lodo, como naturalmente se encuentra en el lecho de los ríos. La acción mecánica de las partículas y el ataque químico tienen como consecuencia el aumento de los tipos y frecuencia de fallo de componentes de este tipo de turbinas. En algunos casos, la erosión y la corrosión se ayudan mutuamente, además se presentan fenómenos de cavitación que también dan lugar a la sustitución de componentes con cortos periodos de operación [2].

El daño debido a la erosión por cavitación es un fenómeno que aún no está completamente comprendido, debido a que en él intervienen diferentes parámetros de manera simultánea como lo

son la hidrodinámica, el diseño de componentes, el medio ambiente y la química del material. Por tal motivo, es difícil pensar que solo una propiedad caracterice completamente un material respecto a la resistencia a la erosión y la cavitación [6].

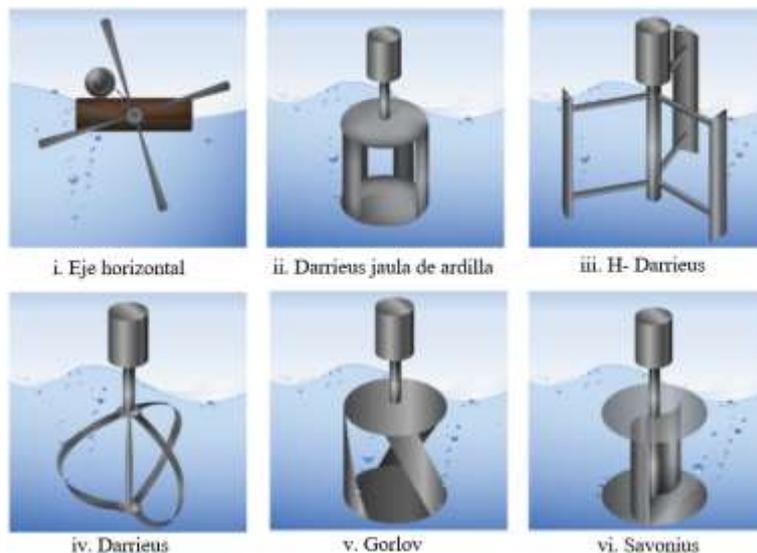
En este sentido, se ha encontrado que la cavitación y la erosión en diferentes metales ha sido estudiada por científicos como Richman y McNaughtonm [3], quienes observaron que los metales puros presentan una mayor tasa de erosión respecto a sus aleaciones y atribuyen esto a la formación de fases que incrementen la dureza del metal favoreciendo su resistencia a la erosión y la cavitación, disminuyendo la tasa de pérdida de masa del metal.

Así, se evidencia que uno de los materiales más utilizados para la fabricación de componentes de turbinas es el acero inoxidable martensítico, el cual presenta una resistencia mecánica superior a la de otros, pero con menor resistencia a la corrosión, presentando problemas como corrosión intergranular, corrosión por picado y corrosión uniforme, contrario al acero inoxidable austenítico el cual presenta una mejor resistencia a la corrosión, pero su resistencia mecánica es baja comparada con la de los aceros martensíticos [7], [8], [9].

### **3.1 TURBINAS HIDROCINÉTICAS**

Los sistemas que son usados para la conversión de la energía que proporciona un río son conocidos como RCECS (River Current Energy Conversion System). Otros autores los denominan con términos tales como turbinas de corriente de agua (WCT), turbina hidráulica de baja cabeza, turbina hidrocinética, turbina de flujo libre (la cual no requiere de embalses o presas), o turbina hidráulica de cabeza cero.

Vermaak H. et al. mencionan que este tipo de turbinas llamadas hidrocinéticas, presentan varias características propias del diseño y se pueden diferenciar en dos clases diferentes por aspectos como la orientación del eje rotacional con respecto a la dirección en la que fluye la corriente del río. Por un lado, existen turbinas hidrocinéticas de flujo cruzado o transversal como se observa en la **Figura 1** y por otro lado las de flujo axial. Las de flujo cruzado pueden ser clasificadas además como de eje horizontal (i) o como de eje vertical (ii, iii, iv, v, vi). Zanette J. et al. mencionan que este tipo de turbinas tienen la fuerza de sustentación como principio de funcionamiento y son muy usadas en aplicaciones de generación de energía hidroeléctrica. Presentan algunas ventajas como la eficiencia, pero su diseño y comportamiento hidráulico son más complejos [10], [11].



**Figura 1.** Turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado [10].

Las turbinas hidrocínéticas de flujo cruzado basan su operación en el flujo de agua que pasa a través de los álabes, que están unidos al rotor, el cual es considerado como uno de los componentes principales de la turbina debido a que por allí el agua pasa dos veces causando un par de torsión sobre el rotor en ambos casos. Miller V. et al. explican que aunque en la primera interacción se aprovecha la mayor parte de la energía, aproximadamente el 75%, la segunda pasada del agua también es de gran importancia e induce una ventaja debido a que ésta cumple una función de limpieza sobre los componentes más críticos del rotor, los álabes. Resaltan que esta labor de limpieza influye de manera importante en la reducción de paradas para realizar trabajos de mantenimiento, lo cual eleva su indicador de utilización [12]. Esto, en contraste con las turbinas hidrocínéticas de flujo axial, las cuales aprovechan la energía cinética de la corriente en una sola pasada provocando que trabajen a revoluciones más elevadas que las de flujo cruzado y siendo más vulnerables ante el impacto de cuerpos sólidos que lleve el río en su cauce.

La energía contenida en una corriente de agua es directamente proporcional a la densidad del fluido, el área de la sección transversal y al cubo de la velocidad del fluido. Por esta razón, si se comparan las turbinas hidrocínéticas, que su velocidad se encuentra en un rango entre 11 a 13 m/s, contra turbinas eólicas que manejan velocidades en un rango entre 1,75 a 2,25 m/s, es de esperarse una gran diferencia respecto al potencial de generación eléctrica debido a que la densidad del agua es 835 veces mayor que la del aire. Además, como lo afirman Zanette J. et al, otra de las características que convierte a las turbinas hidrocínéticas en la tecnología alternativa más atractiva para ser implementada, es la capacidad de ser modular y expansible. Ellas pueden ser dispuestas en múltiples

arreglos modulares y con múltiples unidades para extraer mayor cantidad de energía de las corrientes de agua [11].

En la actualidad, se cree que algunos países en desarrollo como China, India y Brasil serán los impulsores clave en la nueva era de energía [13]. Sin embargo, según el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, más de 2 mil millones de personas tienen cero acceso a la electricidad, mil millones de personas adoptan fuentes de energía mundanas (pilas secas, velas y queroseno) y 2,5 mil millones de personas en los países en desarrollo, principalmente en zonas rurales, tienen acceso marginal a la red eléctrica nacional [14]. Tal contraste implica una necesidad aguda de una opción energética adecuada para las zonas rurales del mundo en vía de desarrollo.

Khan M. et al. mencionan que existe una correlación interesante entre la población, la necesidad de electrificación, la pobreza y la distribución del río. Además, que esta correlación es más dominante en Asia, África Central y América del Sur [13]. Por este motivo, un análisis detallado puede apuntar a la importancia socioeconómica del río como fuente de energía.

Con relación al avance en la implementación de tecnologías para la producción de energías renovables en Colombia, Chica E. et al. diseñaron, fabricaron y caracterizaron una turbina hidrocíntrica horizontal de eje axial de 1 KW (**Figura 2**) [15]. Esta turbina fue probada rigurosamente en el río Sinú en el departamento de Córdoba, Colombia y gracias a su desempeño fue catalogada como la mejor alternativa para implementar la electrificación descentralizada de los ríos. Además, impulsa la futura implementación de esta tecnología promisoriosa para el país e incentiva el desarrollo de nuevas turbinas hidrocíntricas como las de eje vertical.



**Figura 2.** Turbina hidrocíntrica de eje horizontal [14].

Con esta investigación, Chica E. et al. encontraron que la turbina hidrocínética implementada puede ser una solución completa de energía renovable para las comunidades remotas de países en vía de desarrollo y que este tipo de tecnología calificada como “verde”, se posiciona como la mejor alternativa para la electrificación descentralizada a lo largo de los ríos beneficiando regiones apartadas [15].

### ***3.1.1 Turbinas de eje vertical***

Tummala A. et al, describen que en las últimas décadas uno de los problemas reales es la mejora de la cantidad de energía producida por las tecnologías de turbinas de marea [16]. Como demuestra Tjiu et al. quienes estudiaron la oportunidad del desarrollo de varios megavatios utilizando rotores Darrieus y sus desafíos en comparación con la Turbina de viento de eje horizontal [17].

Como se mencionó anteriormente, si el eje de rotación del rotor de la turbina es perpendicular a la superficie del agua, dichas turbinas se denominan verticales; Ejemplos típicos de eje vertical son Darrieus y la turbina helicoidal. Alternative Hydro Solution Ltd. menciona que la turbina tipo Darrieus es la mejor opción para sitios de ríos pequeños y medianos [18]. Ellos explican que su sistema puede tener un diámetro mayor que la profundidad, lo que permite barrer más área en una corriente poco profunda y, por lo tanto, más producción de energía por turbina. El eje vertical puede garantizar que el generador y los cojinetes estén sobre el agua [19].

Fertahi S. et al. muestran que se han realizado trabajos de investigación científica relevantes en la literatura para evaluar el diseño y el rendimiento de las turbinas tipo Darrieus a través de procedimientos experimentales, así como simulaciones numéricas [20]. Se observa que el rendimiento de las turbinas Darrieus está relacionado principalmente con el rendimiento aerodinámico de los álabes que funcionan de acuerdo con un rango de velocidades específicas. Con respecto al primer factor, el enfoque numérico CFD (Computational Fluid Dynamics) permite predecir, evaluar y optimizar el rendimiento aerodinámico de Darrieus. De hecho, recientemente se han publicado estudios avanzados de CFD para evaluar los aspectos aerodinámicos de las turbinas eólicas Darrieus. Por ejemplo, Zamani et al. [20] han realizado simulación 3D de una turbina Darrieus de eje vertical. Utilizaron un perfil NACA0015. Sus resultados indicaron que la región de estela detrás del rotor está libre de vorticidades y posee mucho menos turbulencia. Otro estudio ha sido publicado por Bianchini et al. realizaron simulaciones CFD experimentales y 2D aplicadas a las turbinas verticales tipo Darrieus para evaluar su efectividad. Sus resultados mostraron claramente que las simulaciones 2D CFD podrían describir con precisión el campo de flujo asistido alrededor de este rotor y la estructura de estela que afecta el rendimiento [21].

### 3.1.2 *Turbina de tres álabes*

Thresher R. y Dodge D. afirman que una reducción favorable en el peso del rotor y los costos de fabricación se producen con el uso de menos álabes. Sin embargo, las dificultades dinámicas, estructurales y de equilibrio del rotor asimétrico son evidentes [22]. El aumento del desgaste, las cualidades estéticas inferiores y los problemas ambientales también se asocian con rotores de uno y dos álabes [23], [24]. La turbina de tres álabes ha sido ampliamente adoptada como el diseño más eficiente para cumplir con las restricciones ambientales, comerciales y económicas y, por lo tanto, domina la industria de turbinas eólicas a gran escala de la actualidad [25].

Existen diferentes configuraciones para el rotor de las turbinas, el sistema de tres álabes ha sido fabricado por Verdant Power [26]. Se instala bajo el agua para generar electricidad a partir de la corriente. Este sistema es similar a la turbina eólica de tres álabes. La turbina de flujo axial de tres álabes está diseñada para proporcionar una alta eficiencia en un amplio rango de velocidad del agua. La turbina gira aproximadamente a 35 rpm por las corrientes naturales [27]. Verdant Power ha aplicado dos proyectos fluviales para la aplicación en ríos, el proyecto RITE y el proyecto CORE. El proyecto RITE se ha realizado en Nueva York. Aquí se ha instalado una nueva turbina de 5 m de diámetro. Esta turbina ofrece una capacidad de 35 KW y gira a 32 rpm [28], esta compañía planea expandir este proyecto. El proyecto CORE se ha planeado realizar en dos fases y se aplicará en el río Saint Lawrence en Ontario, Canadá. Este proyecto será financiado por el Ministerio de Investigación e Innovación de Ontario [27], [28].

### 3.1.3 *Rotores tipo H*

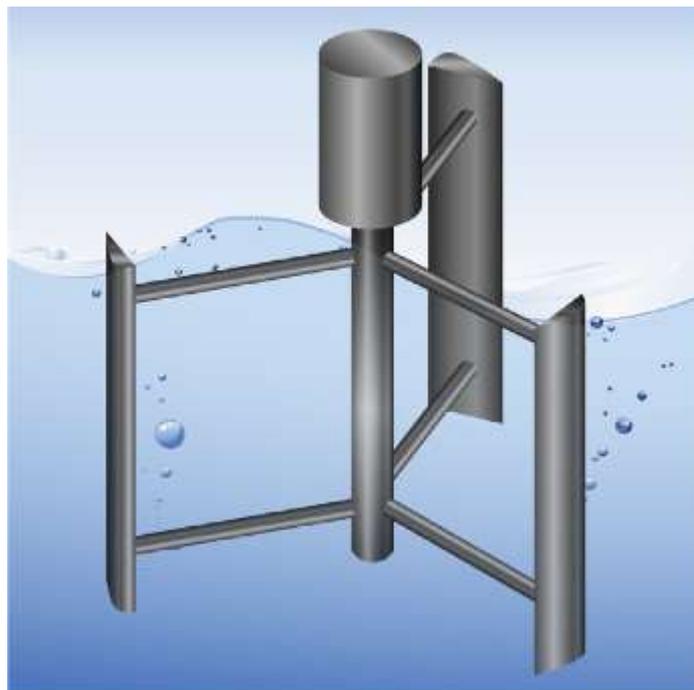
Como muestra Islam M, Ting D y Fartaj A. un rotor tipo H, observado en la **Figura 3**, se desarrolló en el Reino Unido, cuando se estableció que los mecanismos elaborados para ensamblar los álabes Darrieus VAWT (turbina eólica axial vertical) de hoja recta eran innecesarios. Se descubrió que el efecto de arrastre/pérdida creada por un álabe que deja el flujo del viento limitaría la velocidad en que el álabe opuesto (en el flujo del viento) podría impulsar toda la configuración del álabe hacia adelante. Por lo tanto, el rotor tipo H se autorregula en todas las velocidades del viento, alcanzando su velocidad de rotación óptima poco después de su velocidad de viento de corte [29].



**Figura 3.** Rotor tipo H [28].

### **3.1.4 Turbinas tipo Darrieus**

En la actualidad, según Islam M. et al se presenta una tendencia respecto a un interés creciente sobre las turbinas de eje vertical, ya que numerosas universidades e instituciones de investigación en el mundo han desarrollado diseños basados en modelos computacionales. Estos modelos son esenciales para deducir parámetros óptimos de diseño y predecir el rendimiento del equipo. De acuerdo a estas investigaciones, se ha encontrado que los modelos más utilizados son las turbinas Darrieus de eje vertical y hoja recta como la observada en la **Figura 4**, las cuales pueden ser de sección uniforme lo que las hace relativamente más fáciles de fabricar en comparación con las de eje horizontal que deben ser curvas para un rendimiento óptimo [29].



**Figura 4.** Turbina hidrocínética vertical tipo H-Darrieus [10].

El moderno diseño Darrieus fue inventado por el ingeniero francés George Jean Mary Darrieus, quien patentó su diseño en Francia en 1925 y en Estados Unidos en 1931 [30], [17]. La turbina consta de dos o más álabes que están unidos a un eje vertical giratorio que en el mercado a menudo son llamadas Gyromill, el cual es más atractivo por su diseño de álabe simple. Tal configuración se clasifica en dos categorías, de paso fijo y paso variable, pero como lo mencionan Kirke B. y Lazauskas L., dado que las turbinas Darrieus de paso fijo presentan problemas inherentes al diseño, los autores han estudiado el potencial de los de paso variable, con base en la experiencia con los aerogeneradores Darrieus de paso variable en los años ochenta y noventa [31], [32]. Al reducir o eliminar el bloqueo del álabe, el paso variable puede en principio lograr un alto par de arranque y una alta eficiencia [32]. Tjiu W. et al. mencionan que lo descubierto por SNL Energy de mejorar el rendimiento mediante el diseño de perfiles creados específicamente para turbinas Darrieus axiales de eje vertical era lo indicado [33], [34]. Argumentaron que los perfiles de aviación estándar no están destinados a Darrieus ya que el régimen operativo de un álabe de estos es muy diferente al de un avión. Por lo cual, tal como afirman Kirke B. y Lazauskas L., que el concepto de paso variable ahora está comenzando a implementarse, y menciona casos en los cuales ha logrado un coeficiente de potencia ( $C_p$ ) de 0.5 y donde el paso variable también puede reducir los problemas de vibración [32].

### **3.2 EROSIÓN**

Este fenómeno es una forma de desgaste causado por los impactos de partículas sólidas o líquidas en una superficie sólida. El medio del flujo contiene partículas que poseen suficiente energía cinética para dañar una superficie metálica. En general el desgaste debido a erosión por partículas sólidas depende del material expuesto al fluido y de las propiedades de las partículas transportadas por el mismo. A su vez el proceso de abrasión de las superficies de un sólido está determinado por la velocidad relativa y el ángulo de impacto de las partículas [35], [36].

El sistema de álabes se ve altamente afectado por la erosión por sedimentación debido a la alta velocidad absoluta y aceleración. La erosión en el álabe director puede ser clasificada como erosión por turbulencia en la región de salida de las placas frontales debido a la alta velocidad de partículas finas, erosión por flujo secundario en la esquina entre el álabe director y las placas frontales, erosión por fugas en el espacio libre entre el álabe director y las placas frontales y erosión por aceleración debido a la separación de partículas de las líneas de partículas del flujo principal causada por rotación del agua en frente del rotor [35], [36].

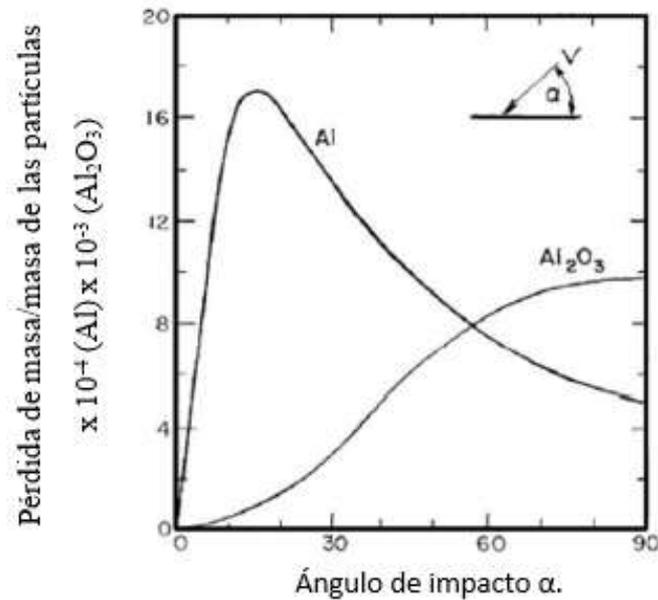
Como lo mencionan Padhy et al, la erosión se denota como el proceso continuo de eliminación gradual de material en la superficie del componente expuesto [37]. Este tipo de desgaste, Neopane H. se lo atribuye a la alta velocidad del flujo y al impacto de los sedimentos abrasivos sobre la superficie de los componentes críticos de las turbinas [38]. La forma como ocurre este fenómeno inicia con la eliminación de la capa de óxido que cubre la superficie del material por donde pasa el flujo, lo que instantáneamente conduce a la formación de irregularidades en la superficie que guía el flujo dando paso a los efectos de la cavitación [39].

Este fenómeno de desgaste ha sido estudiado durante años, sin embargo, a pesar de que se tiene conocimiento del comportamiento de muchos materiales ante la erosión, se ha intentado modelar este a través de la relación entre la tasa de desgaste erosivo y las propiedades mecánicas con algunas dificultades. De acuerdo con esto, el daño causado por el impacto de partículas sólidas, líquidas o gaseosas e inclusive la combinación de ellas es considerada como desgaste erosivo. Con ello, se hace necesario caracterizar la resistencia del material mediante la cuantificación de la tasa de erosión o pérdida de material que se traduce en pérdida de masa y volumen en determinado tiempo [2].

El desgaste erosivo es un fenómeno dinámico debido a que los tiempos de interacción entre partículas, fluido y superficie son muy cortos, lo que lo hace complejo. Las propiedades que se evalúan para caracterizar el comportamiento de materiales no son suficientes y no corresponden con el estado real de las tensiones y deformaciones en condiciones dinámicas. Es por ello que aún no existe un modelo preciso que pueda explicar este fenómeno de desgaste por completo. A pesar de que la erosión se deriva de la conjunción de diferentes eventos, en la literatura se describe como el resultado de un evento que se repite, además el modelado tiene un problema común en el estudio de diferentes tipos de desgaste relacionado con las variables del sistema tribológico y que pueden afectar la tasa de pérdida de material. Por lo general, los modelos existentes representan solo los resultados experimentales, a partir de los cuales fueron construidos [2].

Uno de los parámetros importantes es el ángulo con el cual las partículas impactan, lo que determina los mecanismos para eliminar material de la superficie sometida a desgaste erosivo. En la **Figura 5** se pueden observar curvas experimentales realizadas por Finnie de la tasa de desgaste erosivo en función del ángulo de impacto para materiales dúctiles o frágiles [40]. Allí, es posible observar que el material dúctil (aleación de Al) evidencia desgaste a un ángulo de 20° aproximadamente, mientras que el material con una mayor dureza ( $Al_2O_3$ ) muestra desgaste erosivo máximo para un impacto normal (90°). Es importante destacar que existen diferencias en las escalas en las que se leen las

pérdidas de masa del material dúctil y el frágil, de un orden de magnitud, ya que muchas referencias en la literatura no enfatizan este detalle [41], [42].



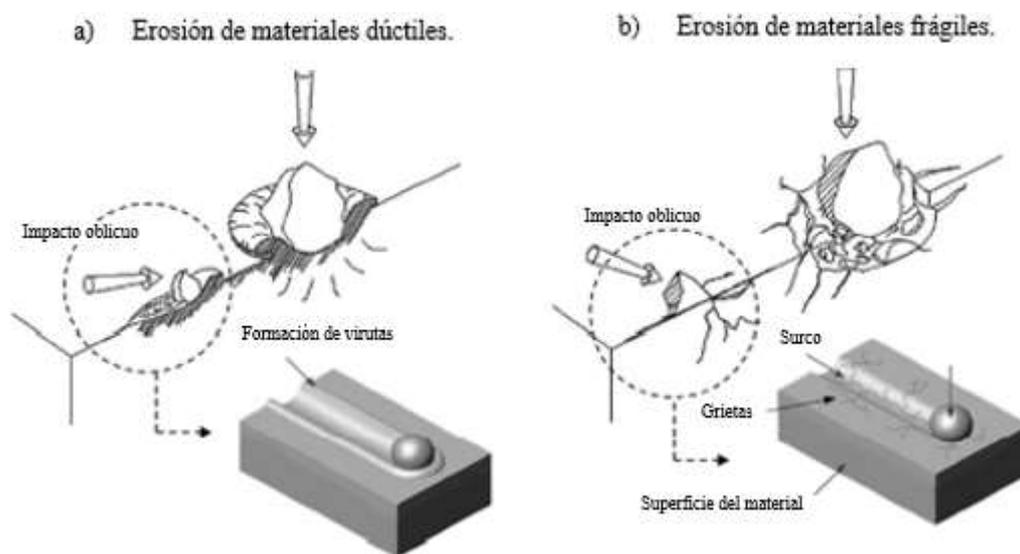
**Figura 5.** Influencia del ángulo de impacto en la velocidad de erosión de aluminio y alúmina con partículas de SiC a 152 m/s [40].

En el análisis del desgaste por erosión, es importante tener en cuenta las principales características de los fluidos causantes del desgaste, los cuales se definen por su reología. Esta propiedad mencionada puede ser dinámica en el tiempo y se ve afectada por factores como la forma, la viscosidad y la densidad del fluido portador de las partículas. Estos fluidos también llamados lodos se clasifican generalmente como: lodos sedimentados y lodos no sedimentados, dependiendo del tamaño de sus partículas sólidas, pues se decantan o flotan permaneciendo en suspensión.

El transporte de estas partículas implica abrasión, erosión y corrosión generalmente, y bajo condiciones específicas de operación se puede presentar cavitación. La erosión comúnmente representa la mayor parte del desgaste total del material debida a la pérdida progresiva, fractura o desplazamiento de material por el impacto repetido de partículas sólidas sobre la superficie. Es común que confundan abrasión con erosión y aunque tienen similitudes, la principal diferencia es que la erosión implica una transferencia de energía cinética desde la partícula erosiva hacia la superficie en tiempos de interacción muy cortos, mientras que en la abrasión las partículas pasan sobre la superficie generando el desgaste y el contacto es por periodos más prolongados [43].

Como lo mencionan diferentes investigadores, la erosión es un fenómeno que aún no se ha terminado de comprender totalmente y en el cual están implicados muchos parámetros como las características de las partículas erosivas, las propiedades del material erosionado, las condiciones de operación de

los equipos y los diferentes mecanismos de erosión. Desde el inicio de su estudio investigadores como Finnie [44] encontraron que independientemente de la fragilidad o ductilidad de un material, la erosión se produce por dos mecanismos principales denominados “corte” y “deformación” que en la actualidad no son tomados como la definición más apropiada, pues no tienen el mismo significado que se le da a estos términos en el ámbito metalúrgico y en ocasiones causan confusión. No obstante, el mecanismo de corte ha sido asociado a partículas que impactan la superficie del material en un ángulo oblicuo para desprender material, mientras que el mecanismo de deformación ha sido asociado con partículas que impactan perpendicularmente la superficie con suficiente energía para causar una deformación plástica o formación de grietas como se observa en la **Figura 6** [43].

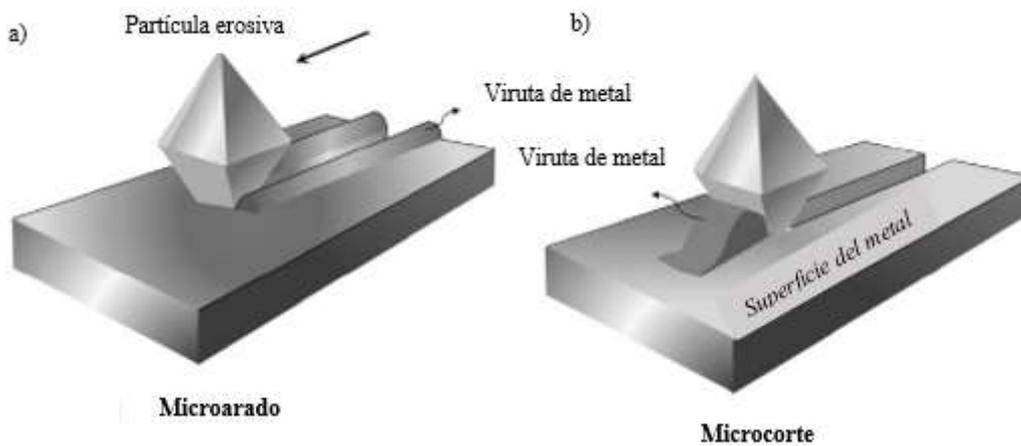


**Figura 6.** Representación esquemática de la erosión causada por el mecanismo de deformación en impacto normal y el mecanismo de corte en impacto oblicuo en materiales a) dúctiles y b) frágiles [45].

Desde esta perspectiva, es posible clasificar la erosión en términos generales como erosión dúctil y erosión frágil. La erosión dúctil bajo impacto oblicuo implica remoción de material por corte/arado, mientras bajo impacto normal implica formación de cráteres con labios extruidos y consecuente fractura frágil, mientras que la erosión frágil ocurre por la formación e intersección de grietas. Dependiendo de las condiciones de impacto y propiedades del material, es posible que se presente la combinación de diferentes mecanismos de erosión, pero uno suele predominar.

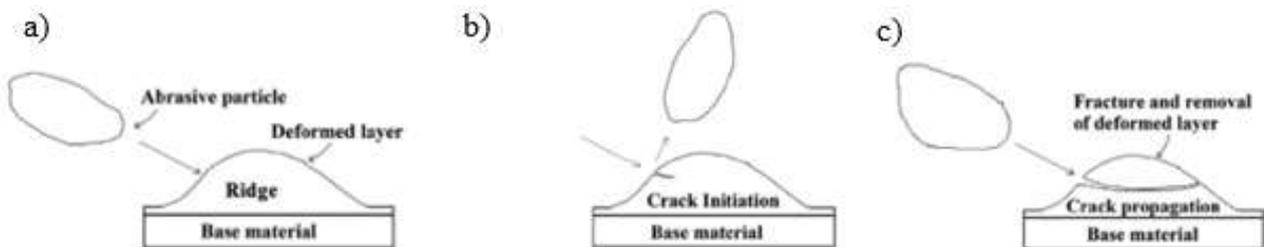
Con bajo ángulo de impacto y baja velocidad de las partículas, estas presionan el metal hacia adelante y hacia los costados para formar crestas, por lo tanto, el arado es el mecanismo predominante. Se diferencia arar de cortar principalmente porque el arado no elimina material de la superficie, solo lo desplaza a los costados para formar surcos y el corte forma debris (viruta) al frente de la partícula

erosiva y se pierde un volumen del surco formado en la superficie del material como se observa en la **Figura 7** [43].



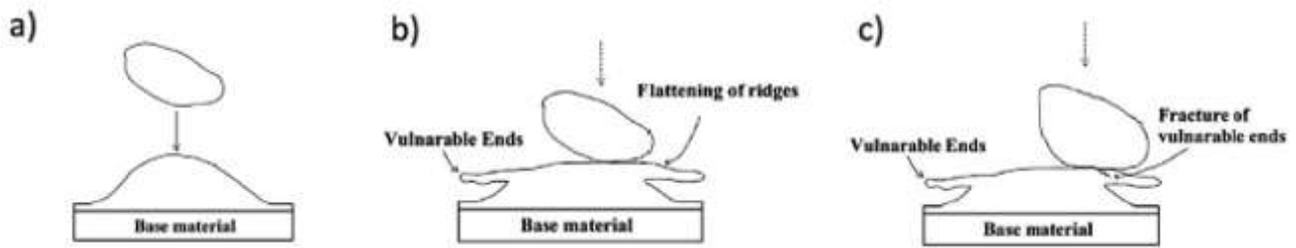
**Figura 7.** Ilustración esquemática de a) mecanismo de erosión por microarado y b) por microcorte [43].

Con bajo ángulo de impacto y alta velocidad de las partículas, el corte es el principal mecanismo de erosión. Allí la remoción de material se da por la fractura de las crestas debido al impacto repetido de las partículas sobre la superficie endurecida como efecto de ello, la cual tiende a agrietarse y fracturarse como se puede ver en la **Figura 8** [43].



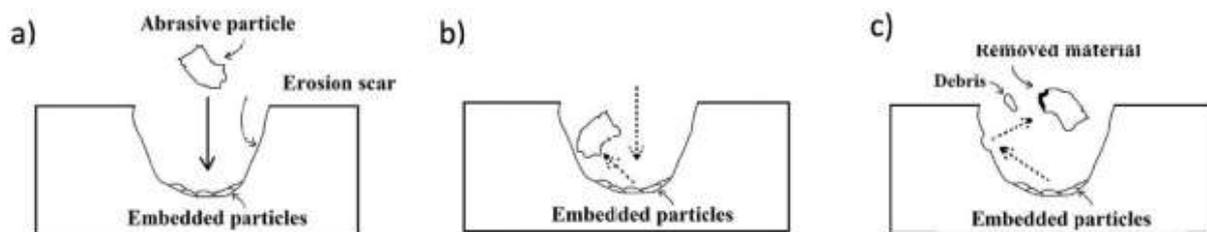
**Figura 8.** Ilustraciones esquemáticas de los pasos de remoción de metal a) capa erosionada y deformada, b) propagación de grietas debajo de la superficie y c) fractura de la capa deformada [45].

Con alto ángulo de impacto y baja velocidad de las partículas, la deformación plástica y el aplanamiento de crestas es el mecanismo principal. Allí el impacto repetido de las partículas produce fractura y eliminación de labios vulnerables como se observa en la **Figura 9** [43].



**Figura 9.** Ilustración esquemática de los pasos de remoción de metal a baja velocidad y alto ángulo de impacto. a) capa erosionada y deformada, b) deformación plástica y aplanamiento de crestas y c) Fractura y eliminación de labios vulnerables [45].

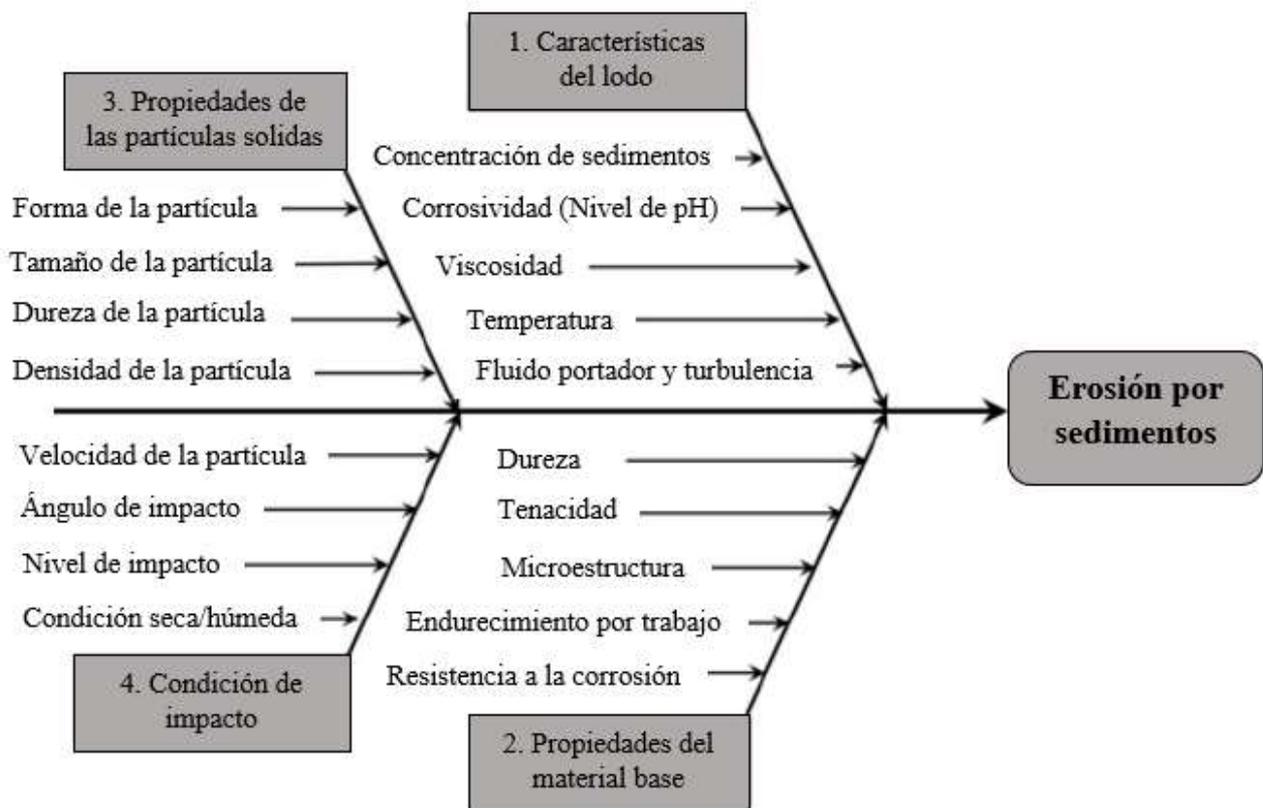
Con alto ángulo de impacto y alta velocidad de las partículas, la fractura de partículas y el corte de metal son el mecanismo de erosión principal. Las partículas que impactan son desviadas por otras que previamente se incrustaron provocando eliminación de una partícula de metal de la superficie. El corte secundario se ilustra en la **Figura 10** [43].



**Figura 10.** Ilustración esquemática de los pasos del proceso de corte secundario a alta velocidad y alto ángulo de impacto [45].

Los mecanismos mencionados no son absolutos, pues se pueden presentar combinaciones entre ellos en el tiempo, y están afectados por diferentes parámetros que se clasifican en cuatro grupos (**Figura 11**) [43]:

- La naturaleza de la superficie erosionada.
- La naturaleza de las partículas erosivas.
- Las características del flujo de lodo.
- Las condiciones de contacto o impacto.



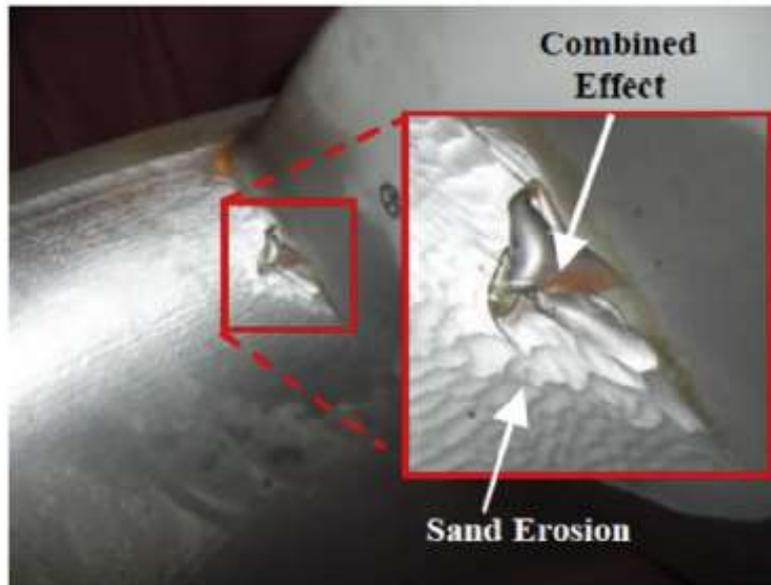
*Figura 11.* Parámetros importantes que influyen en la erosión por sedimentos [43].

### 3.3 CAVITACIÓN

La cavitación se genera por diferencias de presión en el fluido, en el cual se alcanza la presión de vapor y el líquido se vaporiza instantáneamente, formando vapor de cavitación en forma de burbuja. La forma y el tamaño de la burbuja también varían como consecuencia de la acción de los campos de presión y velocidad. Cuando esta implosiona, la presión en la superficie del material incrementa, promoviendo la erosión en el álabe. Las fallas causadas llevan a una reducción en la eficiencia de la turbina [46].

La cavitación puede ocurrir cerca de los álabes o de la salida de la turbina, donde existen grandes diferencias de la presión del fluido entre los componentes estáticos y dinámicos. Dorji et al. presentaron una revisión sobre el mecanismo de falla de la cavitación en las turbinas hidráulicas. Allí, se observa que la formación y el colapso repetido de burbujas de vapor durante el flujo del fluido deteriora la superficie de los componentes de la máquina debido a la acción de picaduras [47]. En otros estudios realizados por Khurana et al. se evaluó la magnitud de la presión localizada donde se registraron valores hasta de 700 atm [48]. De esta manera, se confirma lo dicho de igual manera por Kjolle, que la superficie se deteriora por picadura de los componentes debido al colapso repetitivo de burbujas de vapor en movimiento [39] y que este tipo de daño por cavitación puede generar una

penetración hasta de 10 mm por año en componentes críticos como álabes [49]. Un ejemplo del daño ocasionado por cavitación se muestra en la **Figura 12**, donde se observa la zona erosionada por la combinación de cavitación y erosión en un álabe de turbina.



**Figura 12.** Daño causado por efecto combinado de cavitación y erosión en el álabe [47].

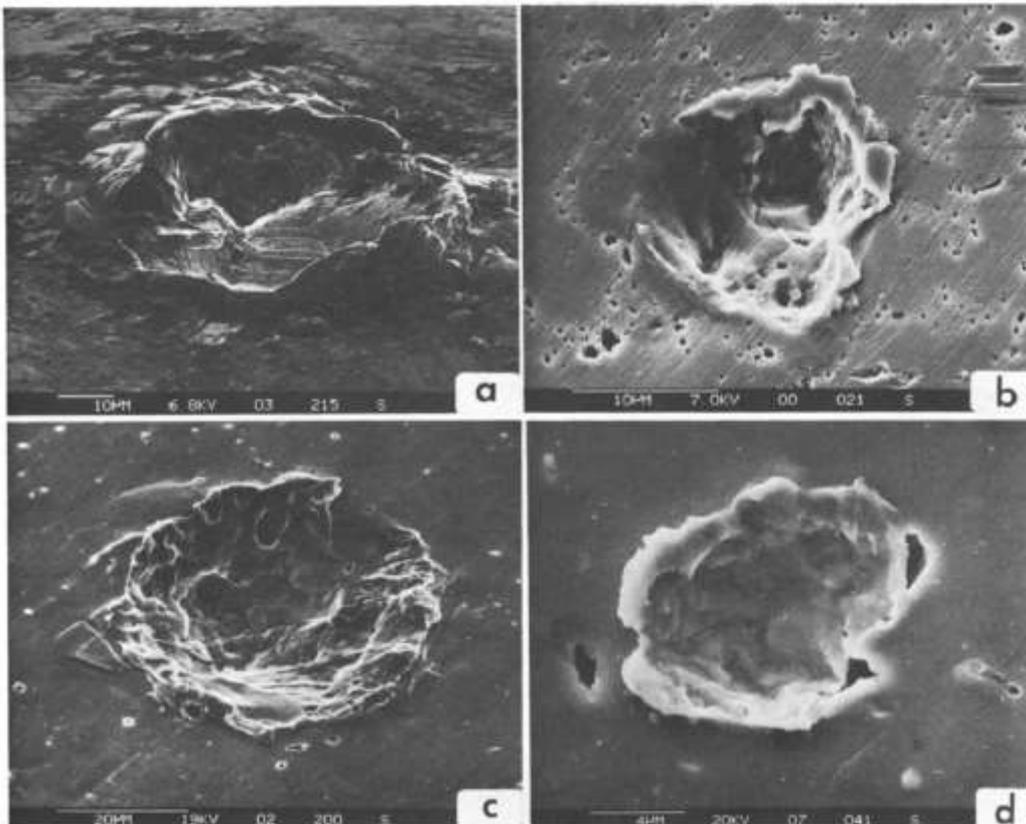
Como lo menciona Karimi A. en el ataque de cavitación hidrodinámica, el daño material se inicia con la formación de hoyos y cráteres aislados producidos por pulsos de tensión que se originan en el colapso de la cavidad. La acumulación de impactos promueve la acumulación de endurecimiento por fatiga sobre la superficie. A medida que continúa el endurecimiento, la tensión interna de las capas superficiales se vuelve lo suficientemente alta como para iniciar la fractura y la subsiguiente pérdida de material. La parte principal de los pulsos de tensión es lo suficientemente alta como para inducir deformación y fractura en todas partes de la superficie. Tanto los límites como los granos están deformados [50].

Raghuvir et al, afirman que se presentan algunos factores o condiciones especiales para que se dé lugar a la cavitación como lo es el perfil de diseño, y el cambio frecuente de las condiciones de funcionamiento [6]. Debido a que los cambios constantes en las condiciones de presión hidrodinámica y velocidad del fluido pueden producir vibraciones estructurales, es posible evaluar la probabilidad de formación de cavidades originadas por cavitación [51]. Hay cuatro posibles casos de cavitación que ha detectado Kumar en una turbina que muestra como la cavitación de borde de ataque, la cavitación de borde de salida, la cavitación de remolino y la cavitación de vórtice entre álabes pueden causar daños [52]. Además, Kumar menciona que el fenómeno de cavitación puede no ser completamente evitable en todas las turbinas, pero que podría reducirse de manera óptima para elevar

el tiempo de uso de los componentes. Sin embargo, Spannhake en su trabajo sugirió que el problema podría evitarse completamente si [53]:

- Se diseña la turbina para funcionar con giro hacia adelante;
- Se mejora la distribución de presión a lo largo de la parte posterior de los álabes;
- Se cambia el perfil del álabe.

Para comprender de mejor manera el mecanismo que produce la erosión en un ensayo de cavitación en particular, es necesario examinar el daño producido por el colapso de una sola cavidad. La duración de cada prueba debe satisfacer dos condiciones: 1) debe ser lo suficientemente larga para obtener características de daño de un solo impacto que sean estadísticamente consistentes y 2) debe ser lo suficientemente corto para evitar la superposición de daños por impacto. Estas condiciones implican tiempos que varían en tipos de pruebas como la de magnoestricción con tiempos de 1 s, o en pruebas de cavitación de vórtice de 1 min, o pruebas de cavitación en túnel de agua en alrededor de 10 minutos, hasta pruebas del modelo de turbina Francis de aproximadamente 10 h, además la morfología, diámetro y profundidad de las marcas también pueden cambiar según el material y el tipo de ensayo de cavitación realizado como se puede observar en la **Figura 13** [50].



**Figura 13.** Cráteres producidos por colapso simple en (a) una turbina Francis, (b) un túnel de cavitación hidrodinámica, (c) un generador de cavitación de vórtice y (d) un dispositivo vibratorio magnetoestrictivo. (Las escalas están indicadas por líneas debajo de cada fotografía.) [50].

### 3.4 CORROSIÓN

La corrosión se entiende como el deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno o de manera más general, la tendencia que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna. Siempre que la corrosión este originada por una reacción electroquímica, la velocidad a la que tiene lugar dependerá en alguna medida de la temperatura, de la salinidad del fluido en contacto con el metal y de las propiedades de los metales en cuestión [36].

Cuando se estudia la corrosión es de gran importancia examinar la velocidad de corrosión, la cinética de la corrosión, los productos formados en la superficie, el tipo de corrosión y un posible enlace entre los productos formados en la superficie. La técnica de pérdida de peso con probetas metálicas es de las más usadas para el cálculo de la velocidad de corrosión. Existe cierto número de métodos electroquímicos para la medición de corrosión y las técnicas de polarización potenciodinámicas se encuentra en las más populares. El SEM-EDS (Scanning Electron Microscope - Energy Dispersive Spectroscopy) provee información acerca de la superficie metálica, específicamente respecto a morfología y tipo de corrosión, y el EDS se utiliza para análisis químico elemental [36].

Como se ha mencionado, el acero inoxidable es uno de los materiales más usados en este tipo de aplicaciones, por lo cual Sedricks et al. afirman en sus estudios que los aceros inoxidables tienen tasas de corrosión bajas debido a la capa pasiva formada superficialmente, de algunos nanómetros de grosor, al exponerse el material a la atmósfera u otros medios oxidantes. Esta pasivación la definen como la capacidad del material a formar una capa de óxido superficial muy delgada, que actúa como barrera de difusión con propiedades eléctricas específicas que logran disminuir la tasa de corrosión de los metales [54], [55]. Aun así, se considera que solo bajo algunas condiciones específicas estas velocidades de corrosión en los aceros inoxidables llegan a ser bajas, debido a la inestabilidad de esta capa pasiva ya que necesita de condiciones termodinámicas y cinéticas para su formación y mantenimiento, y las propiedades pasivas están relacionadas con su composición química, espesor, estructura cristalina y defectos, propiedades eléctricas y mecánicas. Los aceros inoxidables presentan problemas comúnmente relacionados con corrosión y en ese sentido Lula destaca cuatro formas fundamentales de ataque como lo son la corrosión intergranular, corrosión por picado, corrosión por rendija y corrosión bajo tensión, además de toda forma localizada de ataque y generado por imperfecciones en la capa pasiva [56]. Sin embargo, existen otras formas de corrosión no localizada que se pueden presentar, como la corrosión por erosión, la corrosión galvánica y la corrosión uniforme, y pueden representar una gran importancia en el deterioro de estos materiales.

La corrosión electroquímica en los materiales metálicos es la consecuencia de la formación de iones debido a la pérdida de electrones que sufren sus átomos. Mientras el metal se consume, es decir,

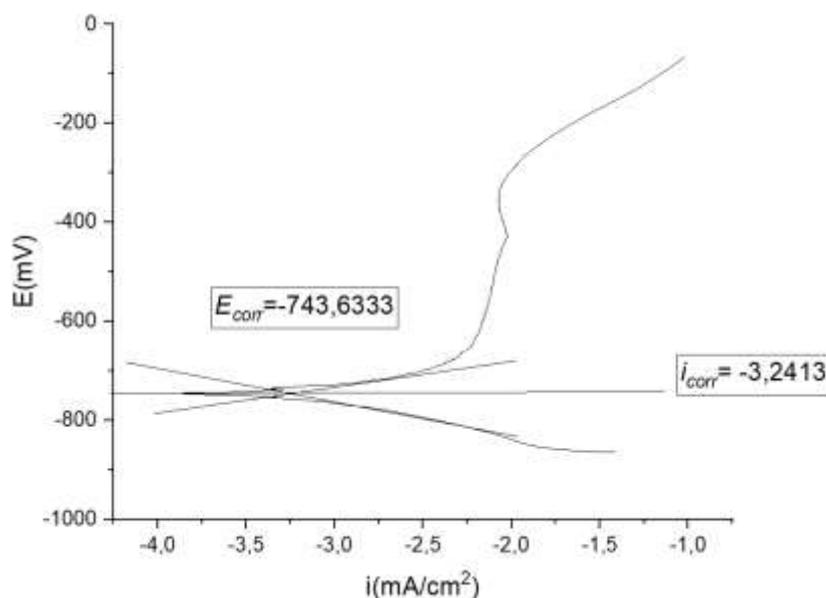
aporta átomos para la formación de iones, se genera normalmente un subproducto del proceso de corrosión. Este tipo de corrosión se observa con mayor frecuencia en ambientes acuosos con iones presentes o ambientes con presencia de aire húmedo. El proceso de corrosión consiste en la formación de un circuito eléctrico y este sistema recibe el nombre de celda electroquímica la cual se basa en 4 elementos fundamentales para que ocurra la reacción. El ánodo y el cátodo son los componentes principales y deben estar conectados eléctricamente para que ocurra una transferencia de electrones, además debe existir un conductor adicional que complete el circuito y permita el movimiento de los iones metálicos que van desde el ánodo al cátodo [57], otorgando así la posibilidad de que se den las reacciones de óxido-reducción. Las reacciones de oxidación en los metales se presentan cuando hay pérdida de electrones del elemento, y las reacciones de reducción hacen referencia a la ganancia de estos por la presencia de iones positivos. Las superficies metálicas que actúan como donadoras de electrones se denominan ánodos, y las superficies que aceptan estos electrones se denominan cátodos. Existen diferentes tipos de corrosión, entre las cuales por efecto de interés del trabajo destacan la corrosión uniforme, corrosión por picado e intergranular. La corrosión uniforme se presenta cuando la formación de los iones producto del desprendimiento de sus electrones es uniforme, lo que produce una pérdida de espesor constante en el área expuesta. La corrosión por picado hace referencia a un ataque localizado en el ánodo, el cual provoca la aparición de cavidades en el mismo, formadas rápidamente con profundidad y longitud considerables. La corrosión intergranular se da en la interface de los límites de grano de una aleación metálica, la cual es más susceptible a esta reacción que las demás áreas expuestas [58].

Para obtener información acerca del comportamiento de los materiales frente a los distintos medios se realiza un análisis de polarización potenciodinámica, la cual proporciona datos acerca de la cinética de la corrosión y tendencia a pasivarse, además de las condiciones requeridas para una corrosión uniforme y corrosión localizada. En el eje de las ordenadas se utiliza el voltaje aplicado en  $\mu\text{V}$  y en el eje de las abscisas se utiliza el logaritmo base 10 de la densidad de corriente. El rango de potencial que se implementa para este tipo de técnica es mayor al usado en las gráficas de Tafel permitiendo así la obtención de más información respecto al comportamiento del material [59] en determinado ambiente.

La cinética de la corrosión es un parámetro de gran interés en la predicción del comportamiento de los materiales frente a su aplicación final, por lo tanto, utilizando la gráfica potenciodinámica se demarca el intervalo al usado para las gráficas de Tafel y posteriormente se procede a obtener la densidad de corriente de corrosión utilizando el potencial de corrosión que corresponde al valor del potencial en el cual se intercepta la curva de polarización catódica y anódica, y con este dato se

interpola la porción recta de la curva catódica obteniéndose dicho valor al realizar la lectura en el eje correspondiente a la densidad de corriente.

La curva anódica no es utilizada comúnmente para realizar el procedimiento anterior ya que generalmente la porción lineal no alcanza por lo menos una década de corriente para muchos de los metales y aleaciones que presentan un comportamiento activo-pasivo [60] a diferencia de la curva catódica. Una década es definida como una unidad en magnitud de la densidad de corriente. La **Figura 14** es un ejemplo donde se muestra la forma en cómo se obtienen estos valores utilizando la gráfica potenciodinámica del acero inoxidable bajo condiciones de pH=4.



**Figura 14.** Curva de polarización potenciodinámica del acero bajo pH=4, fuente: autor.

Esta técnica de evaluación es entonces útil como método para predecir la corrosión localizada y también la tendencia a la pasivación de un material. Cabe resaltar que los valores que se predicen para un material bajo condiciones dadas, como temperatura o presencia de iones agresivos es único y no se debe considerar constante [61].

En la **Figura 14** se observa que después del potencial de corrosión en la rama anódica, la densidad de corriente disminuye notablemente a punto denominado potencial Flade o potencial de pasivación primaria. Esta disminución se debe a la formación de la capa pasiva en la superficie del metal. Con un aumento mayor del potencial en la región pasiva se evidencia un rápido incremento de la densidad de corriente anódica, la cual es debida a la descomposición del agua produciendo a su vez oxígeno gaseoso o la rotura de la película pasiva y posterior corrosión localizada. Esta última situación ocurre

cuando en el ambiente corrosivo hay presencia de iones agresivos y se da la rotura de la película de óxido promoviendo así la aparición de picaduras de corrosión.

Cuando es realizado el proceso anteriormente descrito y se obtiene la corriente de corrosión para cada material se utiliza la ley de Faraday para calcular la velocidad de penetración Ecuación 1 o en términos de pérdida de masa Ecuación 2 [62].

$$r = \frac{k_1 i_{corr} EW}{\rho} \quad (1)$$

$$r = k_2 i_{corr} EW \quad (2)$$

Donde  $k_1$  y  $k_2$  son constantes con un valor de  $3,27 \times 10^{-3}$  mm·g/ $\mu$ A·cm·año y  $8,954 \times 10^{-3}$  g·cm<sup>2</sup>/ $\mu$ A·m<sup>2</sup>·día respectivamente y EW corresponde al peso equivalente, el cual se puede obtener por medio de la Ecuación 3 para elementos puros o Ecuación 4 para elementos aleados.

$$EW = \frac{M}{n} \quad (3)$$

$$x = \frac{1}{\sum \frac{n_i f_i}{M_i}} \quad (4)$$

En las cuales n, f y M representan la valencia involucrada en la reacción de óxido-reducción, la fracción en masa y el peso atómico del i-ésimo elemento, teniendo en consideración para la Ecuación 4 sólo los elementos que superen el 1% en masa de la aleación [62].

Dentro de estas curvas potenciodinámicas existen dos comportamientos a resaltar, uno es el comportamiento activo y el otro corresponde al pasivo. El primero se refiere a la zona catódica y parte de la anódica en la cual es visible la corrosión en la superficie y es normalmente una capa de óxido o hidróxido poroso que se deposita en el material metálico y no genera protección posterior contra la corrosión. La corrosión uniforme y la corrosión por picado generalmente aparece cuando un metal se someta a una zona activa. El comportamiento pasivo se presenta cuando esta capa depositada sobre la superficie del metal posee la propiedad de protegerlo frente a la corrosión por lo que puede ocurrir que se inhiba el efecto de corrosión o la velocidad de corrosión sea muy baja como para no comprometer significativamente la vida útil del metal [63]. En la **Tabla 2** se presentan las constantes para determinar la velocidad de corrosión.

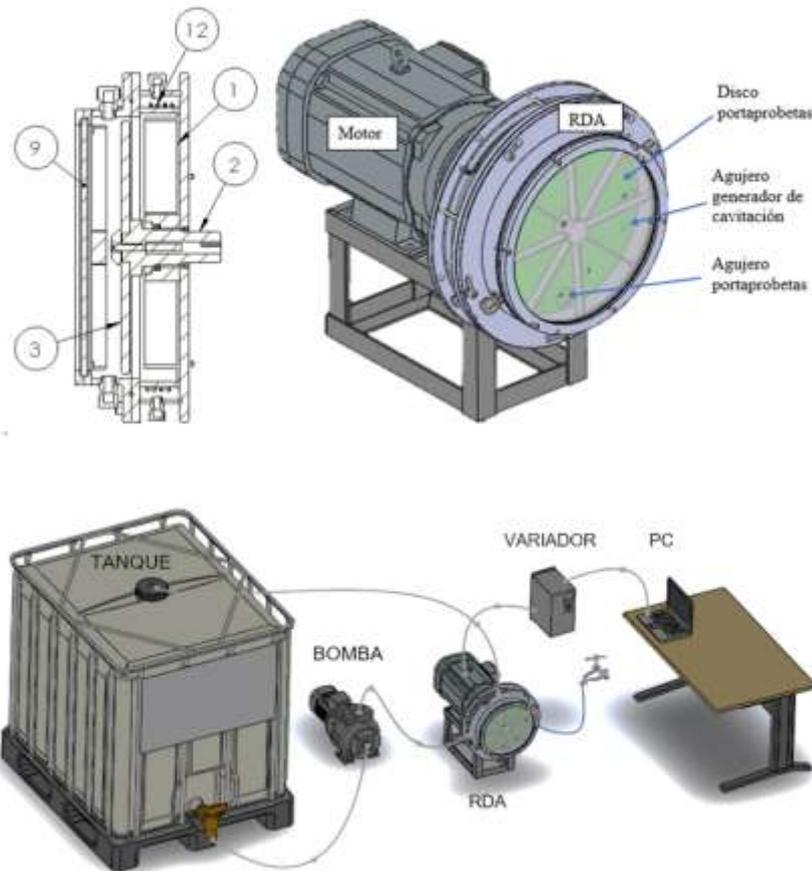
**Tabla 2.** Constantes de los materiales para determinar la velocidad de corrosión.

Constantes	
K [mm.g/uA.cm.año]	0,0033
K2 [g.cm <sup>2</sup> /uA.m <sup>2</sup> .día]	0,0090
EW (Bronce) pH=4	31,5500
EW (Bronce) pH=10	57,0400
EW (Bronce) NaCl	57,0400
EW (Acero) PH=4	25,9400
EW (Acero) pH=10	18,4500
EW (Acero) NaCl	18,4500
EW (Fundición) pH=4	27,8824
EW (Fundición) pH=10	14,2625
EW (Fundición) NaCl	20,9455
Densidad bronce [g/cm <sup>3</sup> ]	8,4346
Densidad acero [g/cm <sup>3</sup> ]	7,7464
Densidad fundición [g/cm <sup>3</sup> ]	8,7464

### 3.5 APARATO DE DISCO ROTATIVO (RDA)

El *RDA* por sus siglas en inglés (Rotatory Disc Apparatus), usualmente es utilizado para realizar pruebas experimentales sobre diferentes materiales ante fenómenos de desgaste como la erosión y la cavitación gracias a un flujo de agua con o sin presencia de sedimentos a altas velocidades. El principal objetivo es someter el material a unas condiciones similares a las que estaría expuesto en campo y así poder determinar su comportamiento frente a otros materiales y seleccionar el más adecuado para ciertas aplicaciones.

Este equipo consta de un disco giratorio ensamblado a un eje principal que es accionado por un motor. A su vez, este disco es el portador de las muestras de los materiales estudiados y se encuentra dentro de una recámara en la cual se introducen elementos como agua y arena para simular las condiciones a las que se podría enfrentar un álabe en un río, además el *RDA* dispone de circulación continua de agua por la parte externa de la carcasa para la refrigeración del sistema. Según la norma ASTM G32 hay una serie de parámetros que se deben tener en cuenta para realizar el análisis del desgaste o pérdida de masa producida en el material expuesto [64]. En la **Figura 15** se muestra un esquema donde se detallan las partes principales que componen el *RDA*.



**Figura 15.** Componentes del RDA [36].

### 3.6 SELECCIÓN DE MATERIALES

Realizar la selección de los materiales para la construcción de una turbina es una decisión importante para lograr la implementación sostenible de la tecnología, tradicionalmente se han utilizado materiales como los aceros inoxidable martensíticos para la fabricación de álabes. Estos materiales debido a sus características microestructurales les confieren alta resistencia a fenómenos de desgaste como erosión y cavitación, además, presentan buena soldabilidad lo que facilita su proceso de reparación a nivel local lo cual puede minimizar costos. También, se han realizado estudios para el uso de algunas aleaciones base cobre y base aluminio donde se evidencia que la formación de fases secundarias incrementa la dureza del material favoreciendo de esta manera su resistencia a fenómenos como erosión y cavitación disminuyendo así la pérdida de masa [3].

En el trabajo realizado por Rodríguez J. en la Universidad Nacional de Colombia se presenta una revisión acerca del desempeño de los aceros inoxidable en cuanto a la resistencia a la erosión por cavitación. Se detalla que el desgaste por cavitación en materiales blandos ocurre por el colapso de burbujas que generan cráteres en la superficie del material. Ya en materiales duros y frágiles, este

desgaste por cavitación ocurre por agrietamiento, se genera un daño subsuperficial que da lugar a la acumulación de endurecimiento por deformación y así la formación de grietas [36].

Para las aleaciones de cobre se ha evidenciado una resistencia mayor a la corrosión por parte de los bronce, respecto a los latones y el cobre puro [36]. Sin embargo, los bronce con altos valores de estaño y plomo presentan una resistencia a la cavitación inferior respecto aquellos bronce al aluminio, debido en gran medida a su baja dureza, frente a éstos; los bronce al aluminio una mayor resistencia, igualando a determinados grupos de aceros [65].

### **3.6.1 Acero inoxidable**

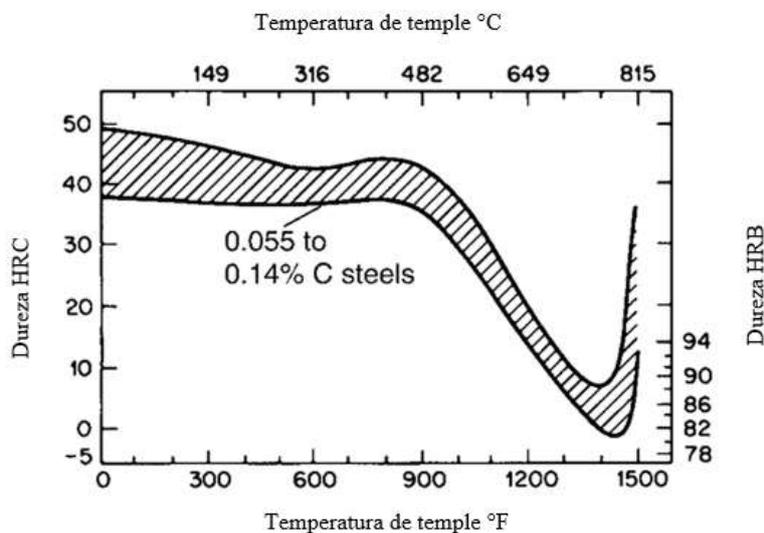
Dentro de las familias de aceros inoxidables podemos encontrar aquellos de naturaleza austenítica, ferrítica y martensítica. Estos se diferencian por la microestructura y la composición química. En el caso de los austeníticos, estos se caracterizan por un alto porcentaje de níquel (>8%) y cromo (>15%) en su composición química, el níquel permite la estabilización de la fase austenita a temperatura ambiente, esta austenita es la que confiere las propiedades inoxidables al acero sumada con el efecto pasivante del cromo en la superficie del acero. En los aceros inoxidables ferríticos el bajo contenido de carbono y la alta fracción de cromo (>10%) evitan la formación en todo el rango de temperatura de austenita, y su resistencia a la corrosión es dada por el cromo. Por último, el acero inoxidable martensítico se caracteriza por la formación de martensita en su microestructura, esta fase se caracteriza por su alta dureza y su moderada resistencia a la corrosión, este tipo de aceros suelen poseer alta concentración de carbono (0.1-1.2%) y adiciones de cromo superiores al 12% [66]. La elevada dureza de las aleaciones martensíticas es el principal atractivo para aplicaciones donde se requiere resistencia a la cavitación, debido a que se ha encontrado una relación entre esta y la dureza de un material [3], presentando un mejor desempeño frente aceros inoxidables austeníticos y ferríticos. En la literatura se ha reportado mucho el uso de acero inoxidable martensítico UNS S42000 debido a su fácil disponibilidad y sus buenas propiedades tanto mecánicas como químicas frente a procesos de cavitación erosión [67], [68], [6], [69], [70], [71], [72].

En el sistema de designación UNS (sistema de numeración unificado) los aceros martensíticos se clasifican del S41000 al S44004 indicando que entre mayor sea el grado, el contenido de carbono y elementos aleantes principales incrementa [73].

Como bien lo indica su nombre, los aceros inoxidables martensíticos pueden ser tratados térmicamente para formar una microestructura martensítica. Tienen una alta templabilidad por lo que generalmente se enfrían al aire y se debe tener precaución con los medios de enfriamiento de mayor velocidad de extracción de calor en aceros con alto contenido de carbono con el fin de evitar agrietamiento en la pieza. En general los tiempos de tratamiento térmico para este tipo de aceros son

mayores que para otros aceros como los de baja aleación y al carbono debido a que los carburos tardan más tiempo en disolverse durante el proceso de austenización y además la conductividad térmica es mayor lo que provoca altos gradientes de temperatura y a su vez la formación de grietas y deformación en la pieza según su geometría, eso también se puede presentar durante el calentamiento de la pieza. La dureza de este tipo de aceros aumenta con el contenido de carbono, al igual que con el contenido de cromo presente. La resistencia a la corrosión de los aceros martensíticos generalmente es menor que los aceros austeníticos y ferríticos y esto se debe a los efectos del mayor contenido de carbono que presentan estos aceros martensíticos. Niveles más altos de carbono reducen la cantidad de cromo que se disolverá y además se aumenta la posibilidad de formación de carburos K1. Estas partículas poseen un alto contenido de cromo por lo que su formación implica el agotamiento de estos átomos en la matriz circundante de hierro, y cuando el porcentaje de cromo en la matriz cae por debajo del 12% esta se vuelve susceptible a la corrosión y se denominan “sensibilizados”, además este tipo de carburos se forman en los límites de grano por lo que la corrosión que se presenta es intergranular [74].

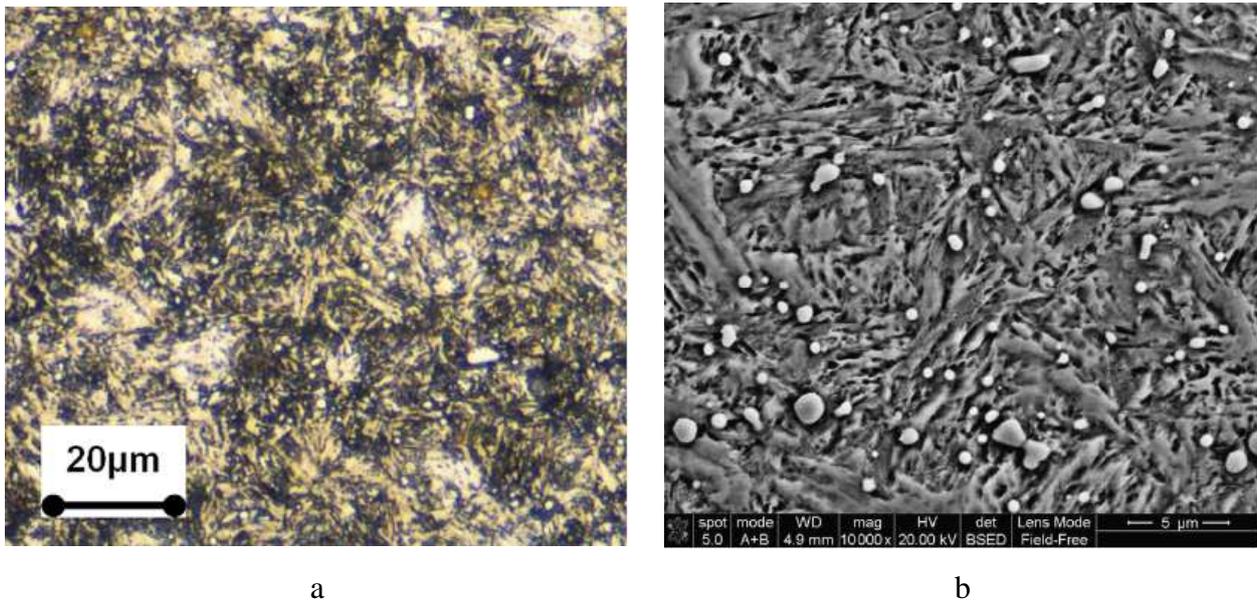
Los aceros inoxidable martensíticos se templen para mejorar algunas propiedades mecánicas. La variación de la dureza según las condiciones de temple de los distintos aceros inoxidable martensíticos con un porcentaje de cromo de 12% se pueden evidenciar en la **Figura 16**.



**Figura 16.** Respuesta al temple de un acero inoxidable martensítico con 12% de Cr [74].

Las durezas más altas en el rango presentado en la **Figura 16** corresponden a los valores de % C más altos, y se nota una gran disminución de la dureza después que la temperatura excede aproximadamente 480 ° C, esto en consecuencia de la formación de las partículas del precipitado de carburo K1. En un trabajo realizado por S. Dodds et al. para mejorar el desempeño tribológico de un

acero UNS S42000 modificando la microestructura mediante soldadura por fricción, obtuvieron resultados donde muestran que se puede alcanzar una mayor dureza y un mejor desempeño frente al desgaste que con los tratamientos térmicos convencionales y, en algunas regiones, una mejor dureza y rendimiento tribológico que el acero para herramientas D2. En la **Figura 17** se observa una microestructura templada martensítica acicular típica de martensita no templada y se observan algunos carburos globulares [75].



**Figura 17.** Microestructura templada martensítica acicular típica de martensita no templada con presencia de carburos globulares de un acero inoxidable UNS S42000 a) micrografía óptica, b) micrografía SEM a 10000X [75].

### 3.6.2 Aleaciones Cu-Sn

El Sistema de numeración unificado (UNS) es el sistema de designación de aleación aceptado en América del Norte para los productos de cobre. Los números de C10000 a C79999 indican aleaciones forjadas, es decir, laminadas, estiradas, forjadas o extruidas. Las aleaciones para fundición están numeradas de C80000 a C99999 [76].

En términos generales, los bronce son aleaciones de cobre en las que el principal elemento de aleación es el estaño. Hoy en día, el término generalmente no se usa solo sino con un adjetivo modificador. Para aleaciones forjadas, hay cuatro familias principales de bronce: aleaciones de cobre-estaño-fósforo (bronce fosforado UNS C50000), aleaciones de cobre-estaño-plomo-fósforo (bronce fosforado con plomo), aleaciones de cobre-aluminio (bronce de aluminio) y cobre-silicio aleaciones (bronce de silicio) [76].

Desde el punto de vista del diseño de ingeniería, las propiedades físicas más buscadas son las conductividades eléctricas y térmicas. Debido a que estas propiedades se basan en estructuras electrónicas y reticulares, ambas afectadas por la presencia de átomos de soluto, la conductividad está fuertemente influenciada por la presencia de elementos de aleación (o impurezas). El efecto varía ampliamente con el (los) elemento (s) en cuestión y con su concentración. Los metales como la plata, el plomo, el cadmio y el zinc, por ejemplo, tienen una pequeña influencia a concentraciones diluidas ( $< 0.10$  at. %), Aunque su efecto a altas concentraciones es mayor. Otros elementos, especialmente el fósforo, el silicio, el arsénico y el estaño, son más potentes en todas las concentraciones. La magnitud del efecto también depende fuertemente del estado del elemento de aleación, es decir, si existe en solución sólida (efecto más fuerte) o está presente en una forma combinada, tal como un óxido o compuesto intermetálico [76].

Sin embargo, es útil señalar que las aleaciones de cobre son notables por sus muchas combinaciones de propiedades beneficiosas físicas y mecánicas (así como químicas, por ejemplo, resistencia a la corrosión). La aleación generalmente sirve para mejorar las propiedades mecánicas y a menudo tiene una influencia positiva en el comportamiento a la corrosión; por lo tanto, la selección de una aleación de cobre para una aplicación dada a menudo implica un compromiso razonable entre las diversas propiedades requeridas [76].

Los bronce se clasifican según el elemento de aleación principal. Los bronce fosforados son aleaciones de cobre, estaño y fósforo caracterizadas por alta dureza, buena resistencia al desgaste, buena tenacidad, buenas propiedades en aplicaciones de rodamientos y buena resistencia a la corrosión. En términos de rango de solidificación, es decir, la diferencia entre la temperatura de *solidus* y *liquidus*, los bronce al estaño tienen un alto rango de solidificación (100-170°C), en la **Figura 18** es posible observar el diagrama de fase cobre-estaño, el cual es de gran ayuda para obtener algunos parámetros esenciales de temperatura que serán utilizados más adelante en la simulación de fundición en la sección experimental [77].



un mecanismo de nucleación heterogénea de la fase primaria (Cu- $\alpha$ ) sobre un precipitado rico en Zr [80].



**Figura 19.** Macroestructura de la sección longitudinal de lingotes de la aleación Cu-8%Sn-0,25%P: a) sin adición de Zr, b) con adición de 0,08% de Zr [80].

### 3.7 SISTEMAS DE COLADA

El llenado o colada de los moldes se define como la introducción de un volumen conocido de metal o aleación líquida dentro de una cavidad, en un tiempo calculado de antemano con el fin de obtener piezas completas, exentas de defectos [81].

El cálculo de los sistemas de colada en fundición se basa en la aplicación de las siguientes leyes [81]:

- Ley de la conservación de la energía (ecuación de Bernoulli).
- Ley de Torricelli, que, aunque expuesta un siglo antes que la anterior, es una aplicación específica de ella.
- Ley de la continuidad.
- Ley de Pascal.
- Leyes de Newton.

Estas leyes, sencillas en sus aplicaciones, son, sin embargo, transgredidas con frecuencia en el diseño de los sistemas de colada.

La selección del sistema de conductos para que el metal líquido llene el molde debe de hacerse considerando el comportamiento del flujo, naturaleza del material de los moldes, factores metalúrgicos y económicos que permitan elegir el más adecuado. La influencia que ejercen ciertos factores en el diseño de los sistemas de colada es importante, y se pueden ver a continuación [81]:

### **3.7.1 *Posición de las mazarotas***

La posición de las mazarotas en la pieza es el factor que prima en la concepción del sistema de llenado. Sin embargo, a veces es necesario establecer un paralelismo con otros factores relacionados con el proceso de moldeo, o por exigencia de presentación o de calidad de una cara determinada de la pieza. Por ejemplo, las superficies de las piezas que van a sufrir un mecanizado pueden en un determinado momento influir notoriamente en la posición de la pieza en el molde, y por ende en la posición de los ataques [81].

### **3.7.2 *Modo o forma de solidificación de las aleaciones***

El modo o forma de solidificación de las aleaciones ejerce también una influencia notoria en el diseño de los sistemas de colada. Aquellas aleaciones que solidifican en capa delgada, en las cuales se recomienda una solidificación dirigida para obtener piezas exentas de defectos originados por la contracción; se recomienda el llenado a través de las mazarotas con el uso eventual de enfriadores. De esta forma el sistema de llenado refuerza la acción de las mazarotas, o al menos no la contraria. La colocación de los ataques en las mazarotas asociado con un llenado relativamente lento es la forma recomendada para colar piezas en estas aleaciones.

En la fabricación de piezas en aleaciones que solidifican en capa gruesa, en particular piezas pequeñas o de espesores delgados, se recomienda realizar el llenado de manera uniforme, con el fin de que la temperatura del molde varíe poco en todas sus secciones. Es decir, se busca mantener la pieza lo más isoterma posible. Bajo este mismo criterio, las piezas que presentan una superficie extensa y espesores relativamente delgados, se recomienda que el flujo del metal sea rápido, mediante la colocación de numerosos ataques, con un recorrido dentro del molde lo más corto posible [81].

### **3.7.3 *Grado de oxidación de la aleación en estado líquido***

En una primera aproximación se pueden clasificar las aleaciones en dos categorías según la sensibilidad a la oxidación en el estado líquido. Las que forman fácilmente capas de óxidos durante el llenado; es decir, las que contienen en su composición, en porciones considerables, elementos como el aluminio, el manganeso, el magnesio, el zinc, el cromo, etc., y, que requieren por esta razón ser

coladas a velocidades relativamente bajas, por debajo de 1 m/s. las otras aleaciones; fundiciones grises, blancas, aceros al carbono y los bronce, que se consideran que no son oxidables en el estado líquido; por lo tanto, se pueden colar a mayores velocidades [81].

#### **3.7.4 Forma de la pieza**

Cuando se cuelean piezas de forma geométrica simple, como cilindros, camisas, prismas, etc., se recomienda que el principio de solidificación dirigida rija durante el enfriamiento. Lo anterior se lleva a cabo mediante un llenado relativamente lento al colar en caída directa a través de pequeños bebederos. Si se está en presencia de una pieza compleja de diferentes espesores, se recomienda colocar los ataques de tal manera que contraríen lo menos posible la acción de las mazarotas. En estos casos, el diseño de la pieza, el material del molde y los alimentadores, gobiernan el orden en enfriamiento de la pieza; por esto, es conveniente colar relativamente rápido [81].

#### **3.7.5 Naturaleza del material del molde**

Cuando se cuele en un molde, el metal líquido degrada en diferentes grados el material del molde. Cuando este es de arena, los mecanismos que intervienen en la degradación son [81]:

- Degradación termo-mecánica conocida como erosión.
- Degradación física, que origina una penetración mecánica del metal en la arena bajo la acción de la presión metalostática, estática o dinámica, capaz de vencer las fuerzas de cohesión.
- Degradación térmica que se pone de manifiesto generalmente en el techo del molde.
- Degradación fisicoquímica como resultado de una reacción metal- molde.

Son pues, muchos los mecanismos que intervienen en la degradación del molde y en ciertos casos actúan contradictoriamente. Cuando se usa una arena gruesa es muy posible la aparición de la degradación física. Si se usa una arena fina, en cambio, la aparición de la degradación fisicoquímica es muy factible al formarse productos de bajo punto de fusión; en especial si la aleación está oxidada. Existen además de la fineza de la arena, otros factores que intervienen en la degradación del material del molde como lo son [81]:

- El grado de apisonado de los moldes.
- La naturaleza de la aleación que se cuele.
- La naturaleza de la arena de moldeo.
- La presión metalostática.
- La naturaleza de la atmósfera reinante en el molde durante la colada.
- La posición de los ataques en la pieza.

El sistema de llenado ejerce fuerte influencia al crear los mecanismos en los tres primeros tipos de degradación. En el cuarto tipo, su influencia no es tan notoria, puesto que la degradación fisicoquímica, puede presentarse tanto en las aleaciones líquidas en movimiento como en reposo. En definitiva, el material del molde tiene un tiempo determinado para resistir la acción degradante del metal líquido. Después de este tiempo crítico, aparecerán defectos en la pieza, dependientes en su amplitud de la naturaleza de la arena. Este tiempo conocido por algunos autores con el galicismo de tiempo de dardado, viene a limitar en su duración el tiempo de colada de las piezas [81]. El tiempo de colada estará regulado por la Ecuación 5.

$$t_c < t_{cr} \quad (5)$$

Donde,

$t_c$ : es el tiempo de colada

$t_{cr}$ : es el tiempo crítico donde se pueden presentar defectos originados por la degradación del material del molde.

### 3.7.6 *Sanidad interna y externa de la pieza*

El sistema de colada debe permitir la obtención de piezas completas y sanas. La sanidad se refiere en este caso, como se indica en la definición, a la ausencia de escoria, porosidad y en general de inclusiones de tipo metálico y no metálico en las piezas moldeadas [81].

Si se reconsidera la definición de colada, se observa que el cálculo del volumen de la pieza es fácil de determinar; en cambio, el cálculo del tiempo de colada ha permanecido como una noción vaga, relacionado generalmente con el peso de la pieza. Se menciona la fórmula de E.W Dietert, promulgada en la década de los años treinta en los Estados Unidos, que expresa [81]:

$$t_c = N\sqrt{P} \quad (6)$$

En donde N representa un coeficiente numérico, dependiente de P, el peso de la pieza. Es evidente, que si se quiere que la pieza salga completa, el tiempo de colada debe ser menor que su tiempo de enfriamiento; o más exactamente, menor que el tiempo de enfriamiento del espesor más delgado [81].

### 3.7.7 *Tiempo de colada*

De acuerdo con lo indicado anteriormente, el sistema de llenado debe en primer término, permitir la obtención de piezas completas. Para lograrlo, el tiempo de colada  $t_c$ , debe de estar relacionado con el tiempo de enfriamiento de la aleación, desde la temperatura de colada  $T_c$ , hasta la temperatura de líquido  $T_l$ , este tiempo se indica como  $t_l$ . Cuando se fabrican piezas de espesores uniformes, el tiempo de llenado no reviste mayor dificultad en su cálculo. Sin embargo, cuando se cuelan piezas de espesores diferentes, caso general en fundición, su determinación requiere de mayor reflexión. Se presentan dos casos según el tipo de colada. Si la colada es de tipo lateral, se debe cumplir que [81]:

$$t_c < t_l \quad (7)$$

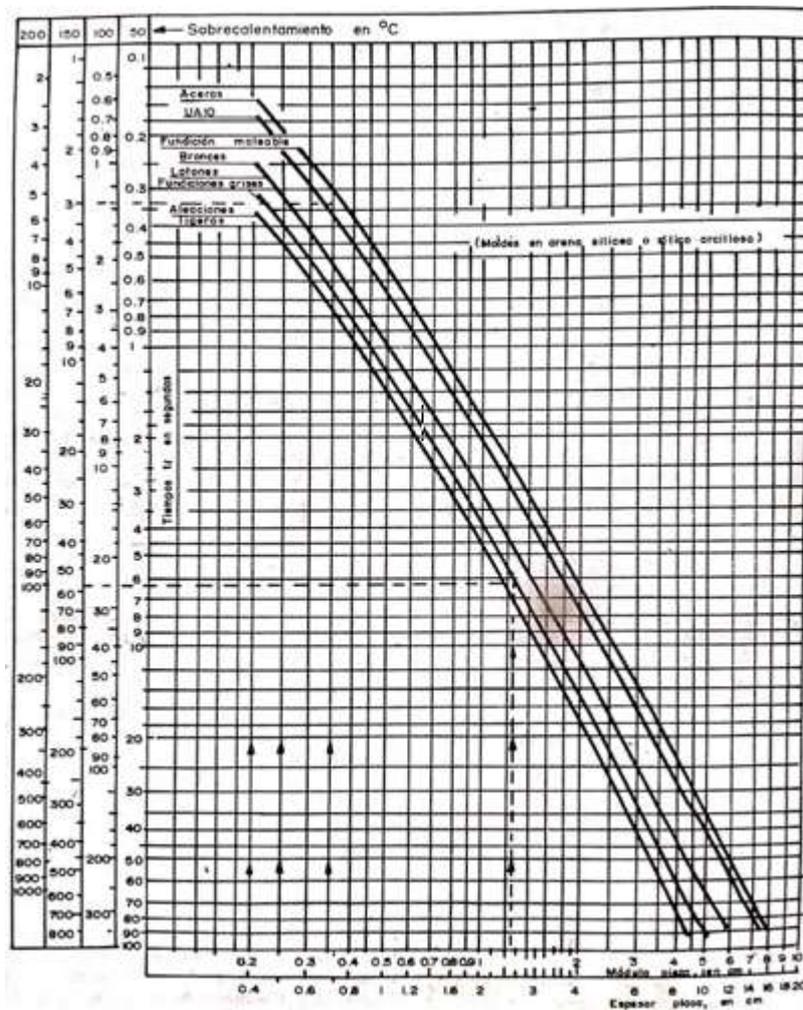
Si se utiliza la colada en caída directa, en donde el principio de la solidificación dirigida o direccionada es recomendable, un inicio de la solidificación antes de terminar el llenado puede ser buscado en aras de tal principio; lo que permite colar los moldes en un tiempo más largo que el tiempo de enfriamiento. En este caso, la expresión del tiempo de llenado se expresa [81]:

$$t_c = 2t_l \quad (8)$$

o aún:

$$t_c = 3t_l \quad (9)$$

Lo anterior indica que el tiempo de enfriamiento de la aleación, es un parámetro para tener en cuenta en el cálculo del tiempo de colada de los moldes. Dicho tiempo estará regido por el grado de sobrecalentamiento de la aleación en el momento de la colada, y por el módulo de enfriamiento de la pieza. La **Figura 20**, indica los tiempos de enfriamiento hasta el líquido de diferentes aleaciones, para diversos grados de sobrecalentamiento y módulos de enfriamiento de piezas. Los valores fueron deducidos a partir de consideraciones teóricas, basadas en la ley del choque térmico, y por datos obtenidos en laboratorios y en talleres de fundición [81].



**Figura 20.** Relación entre el tiempo  $t$ , el sobrecalentamiento y la naturaleza de la aleación para diferentes módulos de piezas [81].

### 3.7.8 Tiempo de solidificación

El enfriamiento de una pieza colada se relaciona teóricamente con el choque térmico, en donde dos medios con temperaturas iniciales muy diferentes son bruscamente puestos en contacto. El enfriamiento de uno de los medios y el calentamiento del otro constituyen un problema de transferencia de calor en régimen transitorio. Este fenómeno está regido por las ecuaciones de Fourier, una de cuyas expresiones más comunes es [81]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c * m_v} \left( \frac{\delta^2 T}{\partial X^2} + \frac{\delta^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\delta^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad (10)$$

En donde:

$\frac{\lambda}{c \cdot m_v}$  : Relación que indica la capacidad de difusión térmica.

Si se calcula el flujo de calor evacuado por el material a partir de la ecuación de Fourier, aparece el producto  $\lambda \cdot m_v \cdot C$  conocido con el nombre de coeficiente de difusión térmica  $b$ , que se expresa según [81]:

$$b = \sqrt{\lambda * m_v * C} \quad (11)$$

En donde:

$\lambda$ : Conductividad térmica del material, cal/cm\*s\*°C

$c$ : Calor específico del material, cal/g\*°C

$m_v$ : Masa volumétrica del material, g/mm<sup>3</sup>

Este coeficiente determina la difusión del flujo de calor, y permite; por lo tanto, calcular de manera directa el tiempo de enfriamiento de las piezas moldeadas [81].

Esta manera de relacionar el tiempo de colada con el sobrecalentamiento de la aleación, la caída de temperatura en el sistema de llenado y el módulo de enfriamiento de la pieza o de su espesor característico; es más racional que la formula empírica establecida por Dietert [81].

La simulación de la transferencia térmica entre el metal líquido y el molde durante la solidificación de la pieza, está definida por la solución de las ecuaciones de Fourier; que de manera general, se expresan [81]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\delta H}{\delta t} = m_v \left( c - L \frac{\delta f_s}{\delta T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

En donde:

T: temperatura

H: entalpía de la masa unitaria en el instante t

$\lambda$ : conductividad térmica

$c$ : calor específico

$m_v$ : masa volumétrica

L: calor latente de fusión

t: tiempo

La solución de estas ecuaciones parte del conocimiento del perfil de las temperaturas y de las condiciones existentes en las fronteras del sistema. (Límites físicos, interfaces etc.). Las primeras simulaciones numéricas en computadores fueron desarrolladas por investigadores estadounidenses Sarajant y Slack en 1974 y Henzel y Keveryan en 1965, en piezas de formas simples mediante la utilización de métodos de diferencias finitas. Estas simulaciones visualizan el comportamiento de las temperaturas en todos los puntos de la red, lo cual permite deducir sus perfiles en todo el sistema, y los tiempos de solidificación en los vértices de las mallas. Hoy en día estos métodos se consideran clásicos en la materia [81].

Un paso importante en la simulación de la solidificación de piezas de formas sencillas en diferentes aleaciones y coladas en arena, lo construyó los trabajos realizados en la década de los setenta por los investigadores estadounidenses Marrone, Wilkes y Pehlke utilizando diferentes alternativas de los métodos de diferencias finitas, encontraron equivalencias entre la simulación de la solidificación y las pruebas experimentales. Estos trabajos complementados por estudios en otros países han permitido establecer las siguientes conclusiones [81]:

- La simulación numérica es una herramienta de gran utilidad en el mejoramiento de la calidad de las piezas moldeadas, siempre y cuando sea utilizada por personas con buen conocimiento de los fenómenos físicos que intervienen en el proceso, y si se alimenta con datos confiables.
- La simulación no debe dejar de considerar, al menos en la fase de estudios, la necesidad de verificaciones experimentales sistemáticas.
- Una vez presentado el problema y establecido el programa, la simulación se resalta con resultados de alta precisión, por su rapidez y su gran sensibilidad.

Así, por ejemplo, la variación de la temperatura de colada, el cambio del material del molde, o la colocación o supresión de enfriadores, requiere de poco tiempo para efectuar los cálculos.

### **3.8 SISTEMA DE ALIMENTACIÓN**

La fundición con arena requiere un modelo, es decir, un “patrón” de tamaño real de la pieza, aunque más grande para que se tome en cuenta las tolerancias por contracción y maquinado en el fundido final. Los materiales que se usan para fabricar modelos incluyen madera, polímeros y metales [82].

El sistema de alimentación consiste en una serie de depósitos que se diseñan con el fin que estén en capacidad de proporcionar metal fundido a las partes de la pieza que puedan presentar defectos asociados a la contracción durante la solidificación del metal.

Para el diseño de la alimentación existen tres criterios principales que deben cumplirse:

1. Criterio térmico.
2. Criterio volumétrico
3. Distancia de alimentación

### 3.8.1.1 Criterio térmico

El módulo geométrico se define como la relación entre el volumen (V) y el área que disipa calor ( $A_C$ ) como lo indica la Ecuación 13 [83].

$$M_g = V / A_C \quad (13)$$

El módulo geométrico se convierte en módulo de solidificación al utilizar factores de forma  $C_F$ .

Es importante para el proceso de fundición que el alimentador o mazarota solidifique después de la pieza de interés que se está alimentando, para que esto suceda es clave que se cumpla la expresión detallada en la ecuación 14 [83].

$$M_{SP} < M_{SU} < M_{SA} \quad (14)$$

Donde,

$M_{SP}$ : módulo de solidificación de la pieza.

$M_{SU}$ : módulo de solidificación de la unión.

$M_{SA}$ : módulo de solidificación del alimentador.

El módulo solidificación de un volumen definido está dado por la ecuación 15:

$$M_S = C_F \times M_G \quad (15)$$

Donde,

$C_F$ : factor de forma.

$M_G$ : modulo geométrico.

En términos del módulo de solidificación implica que los módulos de la unión y del alimentador deben ser mayores que los módulos de la parte de la pieza que se desea alimentar [83]. En la **Tabla**

3 se presentan los factores de forma, el criterio térmico y los módulos geométricos para geometrías simples.

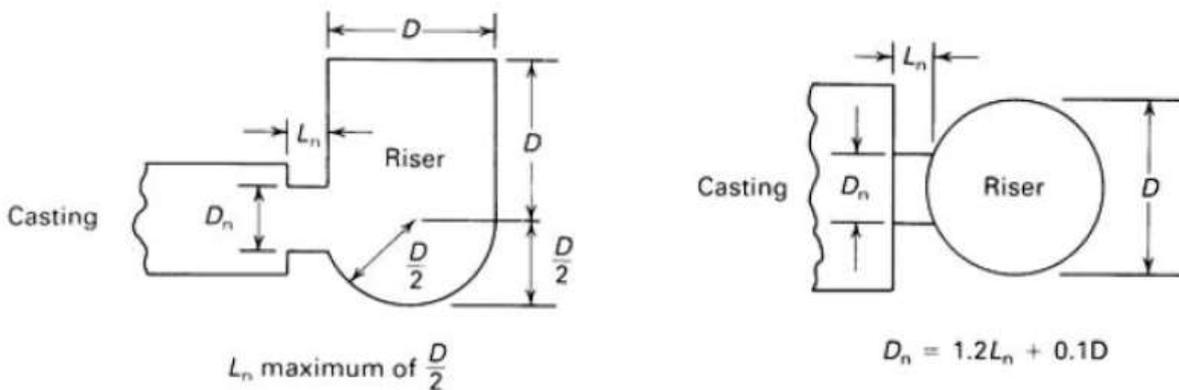
**Tabla 3.** Coeficiente o factor de forma [75].

<b>Criterio térmico – Módulos geométricos y factores de forma para geometrías simples</b>			
Geometría	Nota	Módulo geométrico	Cf
Placa infinita de longitud L y espesor e	$L/e > 10$	$M=e/2$	1
Paralelepípedos infinitos de longitud L y espesor e	$L/e > 10$	$M=e/2$	0,95
Barras cuadradas infinitas de longitud L y lado a	$L/a > 10$	$M=a/4$	0,90
Paralelepípedos finitos de longitud L, alto a y ancho b	$L/e < 10$	$M=a*b/2(a+b)$	0,80
Cilindros infinitos de longitud L y diámetro D	$L/e > 10$	$M=DL/(2D+4L)$	0,80
Barras cuadradas cortas de longitud L y lado a	$L/e < 10$	$M=a/4$	0,80
Cilindros finitos de longitud L y diámetro D	$L/e < 10$	$M=D/4$	0,75
Esfera de diámetro D	$L/e < 10$	$M=D/6$	0,72

Para aleaciones ligeras como los bronce se debe procurar que las relaciones entre los módulos de solidificación de la pieza y el alimentador estén relacionadas como lo indica la Ecuación 16:

$$M_{SA} \geq 1.3 M_{SP} \quad (16)$$

Las dimensiones del alimentador y la unión están relacionadas como se observa en la **Figura 21**.



**Figura 21.** Dimensiones de la unión relacionadas con el diámetro del alimentador [84].

### 3.8.1.2 Criterio volumétrico

El sistema de alimentación debe estar en capacidad de proporcionar como mínimo el volumen de metal que la pieza contrae durante la solidificación. Para que esto ocurra se debe cumplir la ecuación 17 [83].

$$V_A \geq 6 \times \left(\frac{\%C}{100}\right) V_P \quad (17)$$

Donde,

$V_A$ : volumen del alimentador.

$\%C$ : porcentaje de contracción volumétrica de la aleación.

$V_P$ : volumen de la pieza a fundir.

### 3.8.1.3 Distancia de alimentación

Este criterio dicta que los alimentadores deben estar en la capacidad de llevar el metal fundido hasta todas las partes de la pieza que se requieran, así como lo expresa la Ecuación 18 [83].

$$\# \text{ Alimentadores} = \frac{\text{Distancia a alimentar}}{\text{Distancia de alimentación}} \quad (18)$$

La distancia efectiva de alimentación está determinada por el diámetro del alimentador ( $D_A$ ) y el espesor de la placa ( $T$ ) de la pieza a alimentar [84].

### 3.8.1.4 Sección de control

La sección de control en el sistema de colada es el área más reducida del bajante o bebedero donde se controla la velocidad de llenado del molde. Para determinar el área de la sección de control se utiliza la expresión descrita en la Ecuación 19 [83].

$$S_C = \frac{V_T F}{t \sqrt{2 g h}} \quad (19)$$

Donde,

$V_T$ : volumen total a llenar.

F: factor de pérdidas.  
 t: tiempo de llenado.  
 g: gravedad.  
 h: altura metalostática.

$$h = H - \frac{P^2}{2C} \quad (20)$$

Donde,

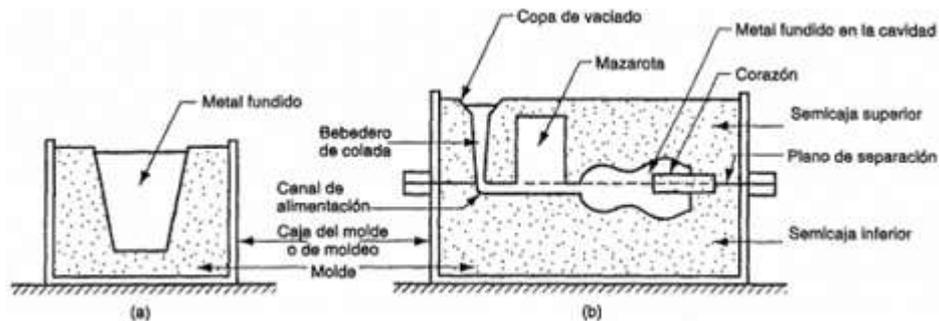
H: altura del bajante.

C: altura total de la cavidad a llenar.

P: altura del modelo en la caja superior.

### 3.9 MOLDEO

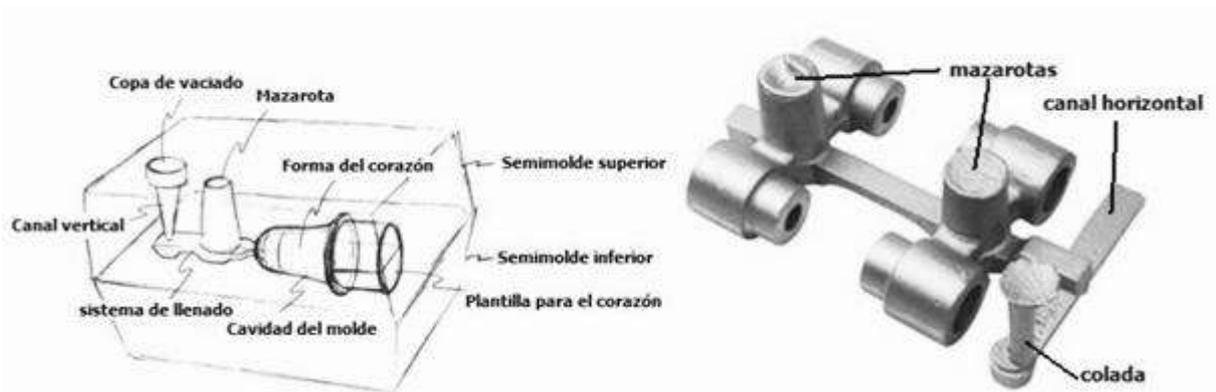
La fundición en arena es un proceso en particular que utiliza una mezcla seca donde se aplican resinas o agentes químicos líquidos a la arena que, al reaccionar con un catalizador a la temperatura adecuada, produce un molde de resistencia suficiente para que resista el peso de la pieza fundida, permitiendo ser manipulado sin que se rompa. El molde tradicional consiste en dos mitades: el semimolde superior y el inferior como se observa en la **Figura 22** [85].



**Figura 22.** Molde de fundición en arena. En la imagen (a) se representa un molde abierto, en la (b) se presenta un molde con un macho o corazón y una mazarota ciega.

El sistema de vaciado (**Figura 23**) en un molde de fundición es el canal o red de canales por donde fluye el metal fundido hacia la cavidad desde el exterior del molde. El sistema de vaciado consiste típicamente de un bebedero de colada (también llamado simplemente bebedero) a través del cual entra el metal a un canal de alimentación que conduce a la cavidad principal. En la parte superior del

bebedero existe frecuentemente una copa de vaciado para minimizar las salpicaduras y la turbulencia del metal que fluye en el bebedero [85].



**Figura 23.** Sistema de llenado colada y alimentadores y mazarotas [85].

En cualquier fundición cuya contracción sea significativa se requiere, además del sistema de vaciado, una mazarota conectada a la cavidad principal. A medida que el metal fluye dentro del molde, tanto el aire que ocupaba previamente la cavidad, como los gases calientes formados por la reacción del metal fundido deben evacuarse para que el metal llene completamente el espacio vacío. En la fundición en arena, la porosidad natural del molde permite que el aire y los gases escapen a través de las paredes de la cavidad. [85]

### **3.10 DISEÑO CAD DE UN SISTEMA DE COLADA**

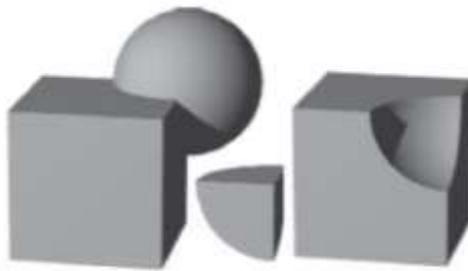
Los enfoques más comunes para el modelado de sólidos se encuentran a continuación.

#### **3.10.1 Extrusión y barrido**

Esta técnica implica dibujar una sección transversal en un plano y extruirlo a través de una trayectoria recta o curva. La sección transversal puede tener bucles internos que conducen a formas huecas. Dependiendo de la ruta, podemos tener formas extruidas rectas y barridos sólidos de revolución. Para la extrusión directa, se debe proporcionar la distancia. La revolución puede ser a lo largo del círculo completo o una parte de él. También es posible tener una extrusión negativa, denominada extrusión de corte, que produce características de depresión en un sólido existente. Por ejemplo, un círculo de extrusión de corte produce un agujero [77].

### 3.10.2 Geometría sólida constructiva

Esta técnica utiliza operaciones booleanas: unión, intersección y diferencia en pares de modelos más simples para crear la forma deseada (**Figura 24**). Se proporciona una biblioteca de formas primitivas sólidas como cubo, cilindro, esfera, cono y otros para iniciar el modelado. Cada uno de estos se instancia al proporcionar los valores de sus dimensiones, ubicación y orientación. El modelo creado por extrusión o combinando sólidos primitivos se combina luego con otras primitivas u otros sólidos para obtener eventualmente la forma diseñada del componente. Los modelos finales e intermedios están representados en un árbol que muestra las formas y los pasos utilizados para hacer el modelo [77].



**Figura 24.** Resultados de operaciones booleanas en un cubo y esfera [77].

### 3.10.3 Modelado basado en características

Las características estándar incluyen agujero, bolsillo, ranura, protuberancia, costilla y filete. Estos pueden ser modelados por operaciones booleanas; por ejemplo, se puede producir un orificio al restar un cilindro de la base sólida. El modelado basado en características hace que esta operación sea más intuitiva para los ingenieros al agregar una función de orificio (en lugar de sustraer un cilindro), que es esencialmente un cilindro negativo. El usuario selecciona una cara (en la función base) o un conjunto de bordes / caras (como en el caso de un filete) y especifica los parámetros de características. El árbol de características se conserva para que el usuario pueda mover, modificar o eliminar fácilmente una función específica [77].

### 3.10.4 Técnicas especiales

Esto incluye superficies analíticas, lifting y bombing. Las superficies analíticas incluyen Coons, Bezier, B-spline y B-spline racional no uniforme, que son útiles para definir superficies intrincadamente curvas o contorneadas. Lofting implica definir una serie de secciones transversales a lo largo de una trayectoria recta o curva, y unir las utilizando una superficie analítica. El

descascarillado implica la creación de una superficie desplazada, generalmente dentro, y la eliminación de la parte interna para obtener un caparazón [77].

La mayoría de los sistemas recientes también admiten modelos paramétricos. El usuario puede especificar relaciones entre elementos geométricos (por ejemplo, la distancia de un agujero desde una costilla dada). El software vuelve a evaluar automáticamente estas relaciones cuando se modifican los parámetros relevantes (por ejemplo, el diámetro del orificio o el grosor de la nervadura) y posiciona la función de manera apropiada. Esto también implica que se pueden crear formas estándar de piezas moldeadas (como ruedas dentadas y cigüeñales), así como características de herramientas (como alimentadores) en términos de unos pocos parámetros seleccionados. La forma apropiada se puede crear automáticamente suministrando los valores de los parámetros involucrados [77].

### ***3.11 SIMULACIÓN DE FUNDICIÓN***

La industria tradicional de fundición tiene una larga historia que ha sido la base de la industria mecánica, sin embargo, a pesar de su antigüedad aún enfrenta varios inconvenientes como la dificultad en el control de calidad, la baja producción, la baja eficiencia energética, la reducción del consumo de materiales y el impacto ambiental que produce [86]. Choudhari et al. [87] han indicado que una de las razones es la complejidad del proceso de fundición actual, donde generalmente se diseña de acuerdo con la experiencia e intuición de muchos diseñadores. Esto ha llevado inevitablemente a repeticiones y reajustes en la práctica, dando lugar a más desechos y un mayor costo. Choudhari et al. [77] investigaron diversos defectos de fundición, que no se pueden eliminar haciendo cambios en las herramientas y/o en los parámetros del proceso, estos defectos se pueden atribuir a problemas de diseño de la pieza con respecto a la capacidad de fabricación. Uno de los defectos más comunes es la porosidad debida a la contracción, por este motivo se usa la simulación de la fundición para reducir este tipo de problemas.

La simulación de fundición se ha convertido en una poderosa herramienta para visualizar el llenado, conocer la solidificación y enfriamiento del metal en el interior de la cavidad del molde, además de predecir la ubicación de defectos internos tales como porosidad por contracción y juntas frías. Se puede utilizar para solucionar problemas de fundiciones existentes y para desarrollar nuevas piezas fundidas sin pruebas en el taller. La simulación es el proceso de imitar un fenómeno real utilizando un conjunto de ecuaciones matemáticas implementadas en un programa de computadora, la **Tabla 4** muestra algunos de los programas de simulación de fundición de metales y aleaciones que actualmente están disponibles en el mercado [88].

**Tabla 4.** Programas de simulación de fundición [14].

<b>Programa</b>	<b>Compañía y locación</b>
AutoCast	Advantage Reasoning Technologies P. Ltd., Mumbai
Cap/WRAFTS	EKK, Inc., Walled Lake, Michigan, USA
CastCAE	CT-Castech Inc. Oy, Espoo, Finland
Castflow, Casttherm	Walkington Engineering, Inc., Australia
JSCast	Komatsu Soft Ltd., Osaka, Japan
MAGMASoft	MAGMA GmbH, Aachen, Germany
MAVIS	Alphacast Software, Swansea, UK
Nova-Solid/Flow	Novacast AB, Ronneby, Swenden
PAM-CAST/ProCast	ESI Group, Paris, France
RAPID/CAST	Concurrent Technologies Corp., USA
SIMTEC	RWP GmbH, Roeteng, Germany
SOLIDCast	Finite Solutions, Inc., Illinois, USA

La entrada principal a un programa de simulación es el modelo CAD de la pieza a fundir y del sistema de alimentación. El modelo de pieza CAD debe ser modificado eliminando los agujeros creados por el mecanizado (no por núcleos) y agregando corrientes de aire y diversas tolerancias (contracción, mecanizado, distorsión, etc.) Esto es seguido por el diseño y modelado del molde, núcleos, alimentadores, auxiliares de alimentación (si los hay) y sistema de colada [77]. Otras entradas incluyen la especificación de materiales (metal fundido, molde, núcleo, auxiliares de alimentación) y los parámetros del proceso (tipo de molde, coeficiente de transferencia de calor del molde, temperatura del vaciado, etc.) [88].

Las principales salidas de los programas de simulación incluyen la visualización animada de llenado de molde, solidificación de colada y enfriamiento adicional a temperatura ambiente. La simulación de llenado del molde ayuda a predecir el tiempo de llenado total, la posible erosión del molde (que conduce a inclusiones de arena), el llenado incompleto (juntas frías y fallas) y el atrapamiento de aire. La simulación de solidificación de fundición muestra las temperaturas, gradientes y velocidades de enfriamiento dentro de la fundición en función de Niyama y otros criterios [88].

Existen tres aplicaciones en las cuales se aplican programas de simulación de fundición:

- Solución de problemas de fundición: esto es necesario para fundiciones que tienen un nivel inusualmente alto o inesperadamente variable de defectos internos (principalmente porosidad

de contracción, inclusiones de arena, juntas frías, etc.), o se sospecha que tienen un rendimiento bajo. El método exacto utilizado en la fundición para producir el molde se modela y simula en la computadora. La ubicación simulada y real de los defectos se compara para ver que tan bien coinciden y se calibran los parámetros del programa, si es necesario [88].

- Optimización del método: esto es útil tanto para las fundiciones existentes como para las que se están desarrollando por primera vez, al eliminar las pruebas en el taller. El diseño del método se modifica en un programa de CAD 3D y se simula para verificar si hay defectos, luego se llevan a cabo varias iteraciones hasta que se logra la calidad y el rendimiento deseados. Incluso pequeñas mejoras en las piezas moldeadas existentes, pueden conducir a mejoras significativas en la utilización de materiales, energía, equipos y recursos de mano de obra [87].
- Mejora del diseño de la pieza: esto se debe a la constatación de que el diseño de la pieza generalmente “decide el destino” de una fundición en gran medida. La simulación de fundición de una pieza en una etapa temprana en el diseño de producto puede señalar características propensas a defectos. Estos pueden modificarse para evitar costosas medidas correctivas en la etapa de fundición [88].

Para realizar el análisis de defectos de fundición es necesario hacer uso de un proceso de simulación con el cual se imita un fenómeno real utilizando un conjunto de ecuaciones matemáticas implementadas en un programa de computadora. En la simulación de fundición, el llenado del molde y el análisis de solidificación se realizan utilizando un algoritmo que soluciona las ecuaciones en base a métodos numéricos y permite identificar los puntos y por lo tanto defectos como porosidades de contracción, roturas calientes, grietas, etc. Muchos de los programas se basan en elementos o volúmenes finitos para el análisis de modelos 3D de fundiciones que involucra funciones sofisticadas para la interfaz de usuario, el cálculo y la visualización. El modelo de fundición debe crearse utilizando un sistema de modelado sólido e importarse al programa de simulación [87], [89]. Ravi ha sugerido la metodología de simulación y optimización de colada como se muestra en la **Tabla 5**.

**Tabla 5.** Metodología de simulación y optimización de colada [3], [15].

Paso 1: Recolección de datos	Modelo de pieza, material, parámetros de proceso, diseño de métodos, defectos existentes.
Paso 2: Diseño de métodos	Línea de partición, núcleos, alimentadores, auxiliares de alimentación, sistema de compuerta, diseño de la cavidad del molde.

Paso 3: Simulación	Importación de modelo, generación de malla, material y proceso, computación, visualización.
Paso 4: Optimización	Modificar el diseño, simular, comprobar la calidad, comprobar el rendimiento, verificar el costo.
Paso 5: Cierre del proyecto	Informe de métodos, informe de análisis, diapositivas de imágenes, comparación de resultados, proyecto de archivo.

### **3.11.1 Software de simulación: SOLIDCast®, FLOWCast® y OPTICast®:**

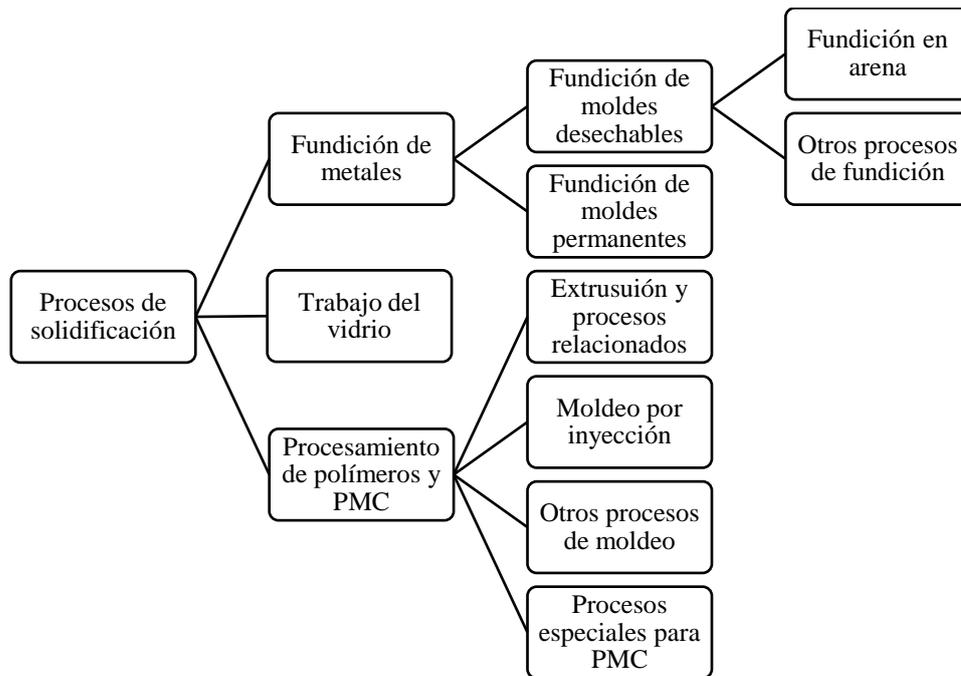
SOLIDCast® es una herramienta informática que permite simular todo el proceso de solidificación gracias a la cual se pueden predecir posibles defectos en la fundición y optimizar los diseños iniciales si es necesario y en la práctica real alcanzar piezas fundidas con alto grado de integridad metalúrgica acortando tiempos de entrega y optimizando recursos [90].

FLOWCast® es una herramienta que trabaja en el modelado del llenado de moldes al igual que el enfriamiento y los gradientes de temperatura que se presenten a través de toda la geometría simulada trabajando en unión con SOLIDCast®. Este software fue desarrollado utilizando la tecnología de simulación de flujo Altair Engineering, Inc. Producto que combina Altair Engineering y las soluciones finitas [90].

OPTICast® es un producto de este software de optimización que funciona en conjunto con el sistema de modelado de solidificación SOLIDCast®. Consiste en una serie de simulaciones en las que se varían las condiciones de diseño, se realizan cambios en el modelo y se evalúan los resultados de simulación, todo de forma completamente automática, hasta que se alcanza el resultado [91].

### **3.12 PROCESO DE FUNDICIÓN**

La fundición es un proceso en el que metal fundido fluye por gravedad u otra fuerza hacia un molde en el que se solidifica con la forma de la cavidad de éste. El principio de la fundición parece sencillo: se funde metal, se vierte en un molde y se deja enfriar y solidificar como se describe en la **Figura 25**; no obstante, hay muchos factores y variables que deben considerarse a fin de lograr una operación de fundido exitosa [82].



**Figura 25.** Clasificación de los procesos de fundición [82].

Existe una variedad de métodos de fundición de formas, lo que la hace uno de los procesos de manufactura más versátiles. Entre sus posibilidades y ventajas se encuentran las siguientes [82]:

- La fundición se utiliza para crear formas complejas para las piezas, incluidas externas e internas.
- Algunos procesos de fundición son capaces de producir piezas de forma neta. No se requieren operaciones adicionales de manufactura para obtener la forma y dimensiones requeridas de las piezas. Otros procesos de fundición son de forma casi neta, para las que se necesita algún procesamiento adicional (por lo general, maquinado) para dar forma, a fin de obtener dimensiones y detalles exactos.
- La fundición se emplea para producir piezas muy grandes. Es posible hacer fundidos que pesan más de 100 toneladas.
- El proceso de fundición se lleva a cabo en cualquier metal que pueda calentarse hasta llegar al estado líquido.
- Algunos métodos de fundición son muy apropiados para la producción en masa.

Para llevar a cabo la operación de fundido, primero se calienta el metal a una temperatura suficientemente alta que lo transforme por completo al estado líquido. Después se vierte, hacia la cavidad del molde. En un molde cerrado se adapta un pasaje denominado sistema de colada, que

permite que el metal derretido fluya desde el exterior del molde hasta la cavidad. El molde cerrado es con mucho la categoría más importante de las operaciones productivas de fundición [82].

Tan pronto como el metal fundido llega al molde, comienza a enfriarse. Cuando la temperatura baja lo suficiente empieza a solidificarse. La solidificación involucra un cambio de fase del metal. Se requiere de tiempo para completar el cambio de fase, y en el proceso se pierde una cantidad considerable de calor. Es durante esta etapa del proceso que el metal adopta la forma sólida de la cavidad del molde, y también cuando se establecen muchas de las propiedades y características del fundido [82].

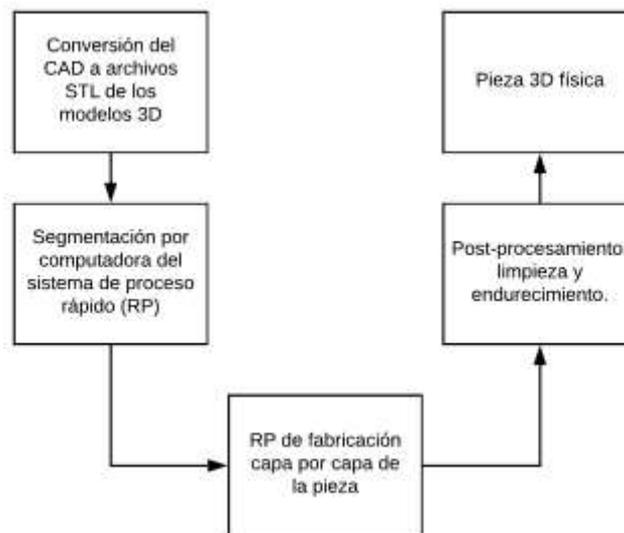
### ***3.12.1 FUNDICIÓN POR CERA PERDIDA***

La fundición a la cera perdida también conocida como fundición de precisión ha sido un proceso ampliamente utilizado durante siglos. Es conocido por su capacidad para producir componentes de excelente acabado superficial, precisión dimensional y formas complejas. Es especialmente útil para hacer piezas fundidas de geometría compleja, donde el mecanizado puede no ser posible o demasiado costoso. También se considera el proceso más antiguo de fabricación de piezas de fundición de arte [92].

Los avances tecnológicos también lo han convertido en el más moderno y versátil de todos los procesos de fundición de metales. Según Barnett [93], la tecnología tuvo una gran evolución en los Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial, debido a la necesidad de componentes de precisión con geometría compleja, incluyendo álabes de turbinas para motores de aviones, etc. Durante la Segunda Guerra Mundial, los procesos de herramental tradicionales no pudieron satisfacer el aumento de la demanda causado por la guerra, por lo que se requerían rutas alternativas. El proceso de fundición por cera perdida se convirtió en una de esas alternativas y este proceso se volvió inevitable para satisfacer una demanda urgente de producir componentes terminados, utilizados en la industria de herramientas de mecanizado. Ofrecía la solución para producir muchos componentes de formas complejas, piezas socavadas con superficies lisas, piezas con dimensiones precisas y detalles finos [92].

La fundición por inversión tradicional (IC) adolece de altos costos de herramientas para producir patrones de cera. Los procesos rápidos de creación de prototipos en cambio, son capaces de convertir un modelo CAD tridimensional en un modelo físico sólido directamente (**Figura 26**). Aprovechando las ventajas de las tecnologías de hardware y software, los datos CAD de un objeto tridimensional se dividen en muchas capas bidimensionales que se pueden crear y unir a las capas anteriores, una por una secuencialmente. Aplicaciones como la fundición de joyas, equipos deportivos, implantes médicos y piezas de alto rendimiento como álabes demuestran que los avances en la creación rápida

de prototipos junto con la fundición a la cera perdida se han convertido en la tecnología líder para producir fundiciones de precisión de forma rápida y económica. Algunas ventajas de este proceso son la alta flexibilidad de fabricación de las piezas producidas que anteriormente era difícil o imposible de fabricar a través del mecanizado, asequibilidad y evaluación rápida de los diseños de herramientas, viabilidad de iteraciones de diseño para detectar fallas en el diseño de fundición o herramientas, capacidad para facilitar la optimización de parámetros de moldeo y capacidad para evaluar los patrones moldeados de manera efectiva [92].



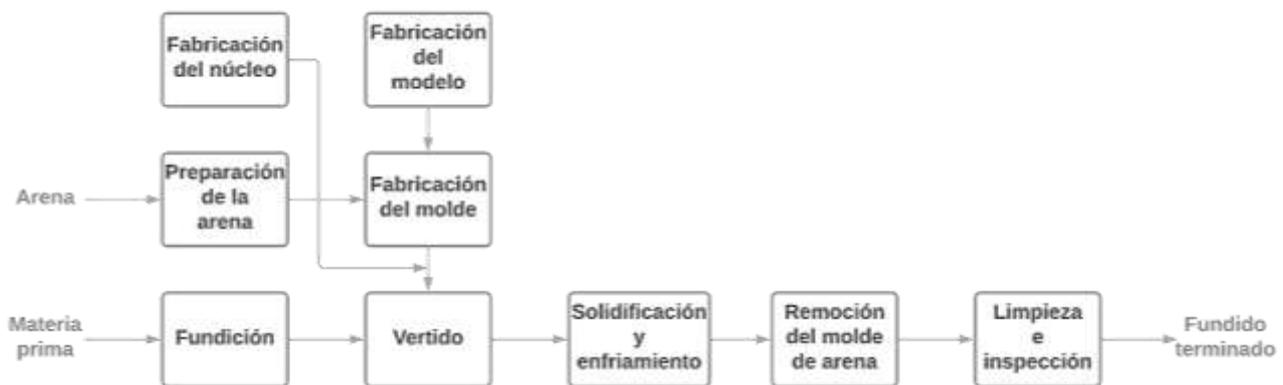
**Figura 26.** Cadena de proceso RP típica [94].

### 3.12.2 FUNDICIÓN EN ARENA

La fundición en arena es por mucho el proceso más utilizado pues es responsable de la mayoría del total de toneladas de material fundido. Casi todas las aleaciones de fundición pueden fundirse con arena; de hecho, es uno de los pocos procesos que pueden usarse para metales con temperaturas de fusión elevadas, tales como aceros, níqueles y titanios. Su versatilidad permite la fundición de piezas cuyo tamaño varía de pequeño a muy grande y en cantidades de producción que van desde uno a millones [82].

La fundición en arena, también conocida como fundición en molde de arena, consiste en verter metal fundido en un molde de arena y dejar que se solidifique, para luego romper el molde y retirar la pieza. El fundido debe limpiarse e inspeccionarse, y a veces se requiere darle tratamiento térmico a fin de mejorar sus propiedades metalúrgicas. La cavidad del molde de arena se forma por la compresión de arena alrededor de un modelo (un duplicado aproximado de la pieza por fundir), y luego se retira el

modelo separando el molde en dos mitades. El molde también contiene el sistema de paso o sistema de vaciado y la mazarota. Además, si el fundido va a tener superficies interiores (por ejemplo, partes huecas o con agujeros), debe incluirse un núcleo en el molde. Como éste se sacrifica para retirar el fundido, debe hacerse un molde nuevo por cada pieza que se produce. De esta descripción breve, se considera que la fundición con arena no sólo es la operación de fundido en sí, sino también la fabricación del modelo y la fabricación del molde. La secuencia de producción se presenta en la **Figura 27** [85].



**Figura 27.** Pasos en la secuencia de producción de la fundición en arena [76].

### 3.13 FABRICACIÓN DEL MODELO

Los modelos en fundición son utilizados para copiar en la arena u otro material la cavidad propia del sistema de colada diseñado previamente y obtener las piezas de interés. La fabricación del modelo puede realizarse en diferentes materiales, pero comúnmente se fabrican en madera o actualmente en polímero por un modelista especializado con amplio conocimiento en moldeo, técnicas de fundición y diseño, el cual tiene en cuenta cavidades internas donde deben ubicarse matachos que también se deben fabricar. Para la fabricación del modelo se debe tener en cuenta los ángulos de salida que permita la extracción de estos y las dimensiones contemplando la contracción del metal y el mecanizado de la pieza una vez solidifique.

En el caso del modelado de prototipos por medio de impresión 3D se debe hacer un diseño CAD el cual debe ser importado en formato .STL donde se parametriza la impresión pensando obtener piezas con buenos acabados y la resistencia requerida para el moldeo.

Una vez se obtiene el modelo impreso en polímero, se debe verificar el acabado del prototipo y si es el caso terminar de pulir con papel de lija para posteriormente ubicar estos ya sea en una placa modelo, o como modelo libre en las cajas de moldeo o para ser usados en *Investment Casting*.

Algunos factores para tener en cuenta con el modelo para un correcto proceso de moldeo son:

**Ángulos de salida:** son necesarios para facilitar la extracción de los modelos sin afectar la integridad del molde fabricado.

**Contracción:** el metal líquido que es vaciado en el interior del molde, con el paso del tiempo experimenta un proceso de solidificación y por ende se presenta contracción de este, por lo que es necesario tener en cuenta en el momento de hacer el diseño un sobredimensionamiento del modelo a fabricar donde se tenga en cuenta esta contracción.

**Utilidad:** es importante que los modelos fabricados presenten una alta precisión en sus dimensiones y que el material en que se fabrican conserve sus propiedades incluso durante el tiempo de almacenamiento y uso.

Además de lo mencionado es claro que los matachos se fabrican mediante un molde o matachera que también se debe fabricar de la misma manera que el modelo, en un material lo suficientemente resistente, preciso y práctico para su uso con características como ángulos de salida y sobredimensionamiento.

### ***3.14 MATERIALES PARA LA FABRICACIÓN DEL MODELO***

La elección del material se realiza teniendo en cuenta el peso, la facilidad de trabajo, la inoxidableidad, las disponibilidades de materias primas, el número de piezas a obtener, el sistema de moldeo, el costo [95].

**Modelos de madera:** son muy baratos, de fabricación rápida, pero muy sensibles a la acción atmosférica, deformables, poco duraderos y de fácil combustión. Son adecuados para el moldeo de una o pocas piezas, tienen poca precisión dimensional [95].

**Modelos metálicos:** son menos deformables, más duraderos, no combustibles y muy adecuados para grandes series de piezas pequeñas o de tamaño medio, o para series repetidas en largos intervalos de tiempo [95].

**Modelos cerámicos:** se tienen materiales como yeso, concreto refractario o arcillas para la fabricación de modelos pero estos materiales son para usos muy específicos y depende del tipo, tamaño y de la cantidad de piezas se requiera fundir [96].

**Modelos poliméricos:** estos modelos en la actualidad son fabricados por medio de impresión 3D debido a que este tipo de fabricación brinda una buena tolerancia dimensional en geometrías complejas, de igual forma se obtienen en tiempos relativamente cortos dependiendo de la complejidad de la geometría y el tamaño de este. Uno de los materiales más usados es el Ácido Poliláctico (PLA) el cual es uno de los polímeros más utilizados en la impresión 3d en la actualidad debido a que es biodegradable y por su bajo costo. Es un polímero bastante versátil ya que permite ser pulido con

baño de acetona y realizar un acabado muy liso, además se puede pegar con facilidad y es fácil de pintar sobre él [97].

### **3.15 IMPRESIÓN 3D**

Entre las últimas tecnologías para tomar la industria por sorpresa están las Tecnologías de Prototipado Rápido. El cambio revolucionario en las técnicas de producción de fábrica y la gestión requiere una participación directa de los sistemas controlados por computadora en todo el proceso de producción. Todo el proceso desde el diseño del producto, hasta la fabricación, el ensamblaje y la inspección del producto, son monitoreados y controlados por computadoras [98].

En los últimos años, esta técnica ha experimentado un desarrollo muy fuerte gracias a la gran difusión en el mercado de impresoras 3D. Utilizan una tecnología FDM (Fuse Deposition Modeling), un tipo de tecnología aditiva, que crea modelos de materiales mediante la superposición de capas de materiales. Este innovador sistema ha permitido un rápido crecimiento de esta tecnología para usos comerciales, permitiendo a los usuarios menos expertos entrar en el mundo de la impresión 3D. Los objetos se realizan rápidamente y con presupuestos bastante bajos, comenzando con modelos numéricos, a menudo con geometrías complejas, convertidos en código G, que es el lenguaje de programación de las máquinas que trabajan con control numérico (CNC). Las impresoras 3D también son máquinas CNC; la única diferencia es que en lugar de eliminar el material lo agregan, lo que los convierte en una tecnología aditiva, lo que permite crear objetos tridimensionales al agregar material a material capa por capa AM: additive manufacturing [98].

Hay varias técnicas utilizadas en la impresión 3D, la técnica más utilizada entre las impresoras, especialmente para las domésticas, es el tipo Fused Filament Fabrication (FFF), que nació de otra técnica anterior Fused Deposition Modeling (FDM) desarrollada por Scott Crump a finales de la década de 1980 y comercializada en la década de 1990 por Stratasys. El funcionamiento es bastante sencillo: una boquilla se calienta para fundir el material (filamento) y se puede mover en tres ejes, horizontalmente (ejes X e Y) y verticalmente (eje Z), desde un motor de control numérico, comandado por un Software CAM. El filamento de plástico (sólido) se desenrolla del carrete en el que se ha colocado, para pasar a través de un área calentada con una temperatura alta. Desde aquí, gracias al impulso de un piñón conectado al motor paso a paso, el plástico líquido es expulsado de la boquilla, donde el flujo puede iniciarse y detenerse [98].

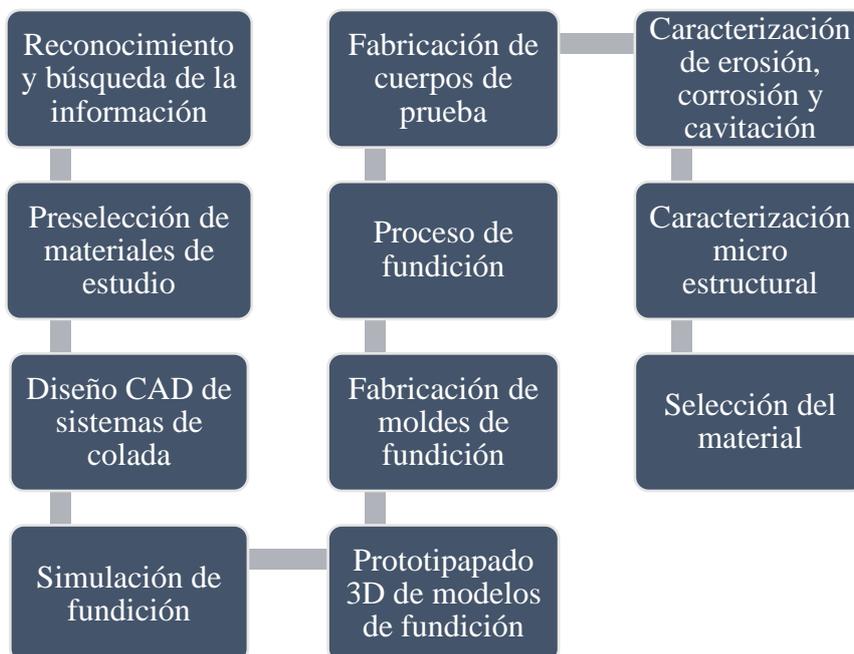
El marco que soporta la estructura de la placa (donde se recoge el material para formar el objeto 3D) y de los motores debe controlarse en una hoja de control con un controlador para los denominados motores paso a paso. Estos motores se utilizan para obtener mayor velocidad y precisión, y porque

garantizan un motor de par elevado y un movimiento de torsión muy satisfactorio. Existen diferentes parámetros que cooperan en la creación de la calidad del producto terminado. En primer lugar, está el tipo de material utilizado como el PLA o el ABS entre otros, la velocidad de impresión, las temperaturas y la resolución obteniendo así diámetros hasta de 100 micras [98].

La técnica FDM también requiere la creación de una estructura de soporte durante la creación del objeto, especialmente para los espacios vacíos o proyecciones. Estos son soportes proyectados directamente desde el software de la impresora. Al final de la producción, será necesario eliminar todos los soportes adicionales generados y no incluidos en el dibujo original. Las impresoras con una boquilla crean soportes con el mismo material del objeto final, lo que implica que los soportes deben retirarse una vez que se completa la impresión [98].

#### 4 METODOLOGÍA

A continuación, en la **Figura 28** se presenta la metodología utilizada en el desarrollo del proyecto, explicando cada paso realizado.



**Figura 28.** Metodología utilizada en la ejecución del proyecto.

##### 4.1 Reconocimiento y búsqueda de la información.

En esta primera sección, se realizó de manera minuciosa una búsqueda constructiva de la literatura científica en el periodo en el cual se llevó a cabo el trabajo, con el fin de mantener en cada momento

actualizado el marco teórico y tener las herramientas adecuadas que permitieran el desarrollo crítico del proyecto. Para esta búsqueda se contó con bases de datos como SCOPUS, Sciencedirect, Engineering Village, etc. También se realizó la búsqueda en bancos de patentes, bases de tesis de posgrado, internet abierto y demás fuentes de información que se consideraron pertinentes.

#### 4.2 Preselección de materiales de estudio

Inicialmente se usó la información consultada para tener un acercamiento con el tipo de aplicación hacia el cual se debía destinar la investigación, teniendo en cuenta tanto los materiales usados comercialmente como otros estudiados por diferentes investigadores en este tipo de turbinas, además de sus hallazgos o recomendaciones con respecto a los fenómenos de desgaste que se trataron en este proyecto.

En esta etapa, y teniendo en cuenta los conceptos necesarios a partir de la literatura, se realizó la preselección de los materiales que fueron objeto de estudio para el desarrollo del proyecto bajo los principales criterios determinados por un juicioso análisis, los cuales se pretendía que garantizaran el cumplimiento de las características específicas que requiere este tipo de aplicaciones como la fabricación de los prototipos de álabes Darrieus usados en turbinas hidrocínéticas.

En base a ello se preseleccionaron dos materiales, el acero UNS S42000, el cual es un acero inoxidable martensítico y un bronce UNS C52400 refinado con Zr, el cual es un bronce fosforado al cual se adicionó Zr en el baño fundido como refinador de grano.

En la **Tabla 6** se puede observar la composición química nominal de los materiales de estudio.

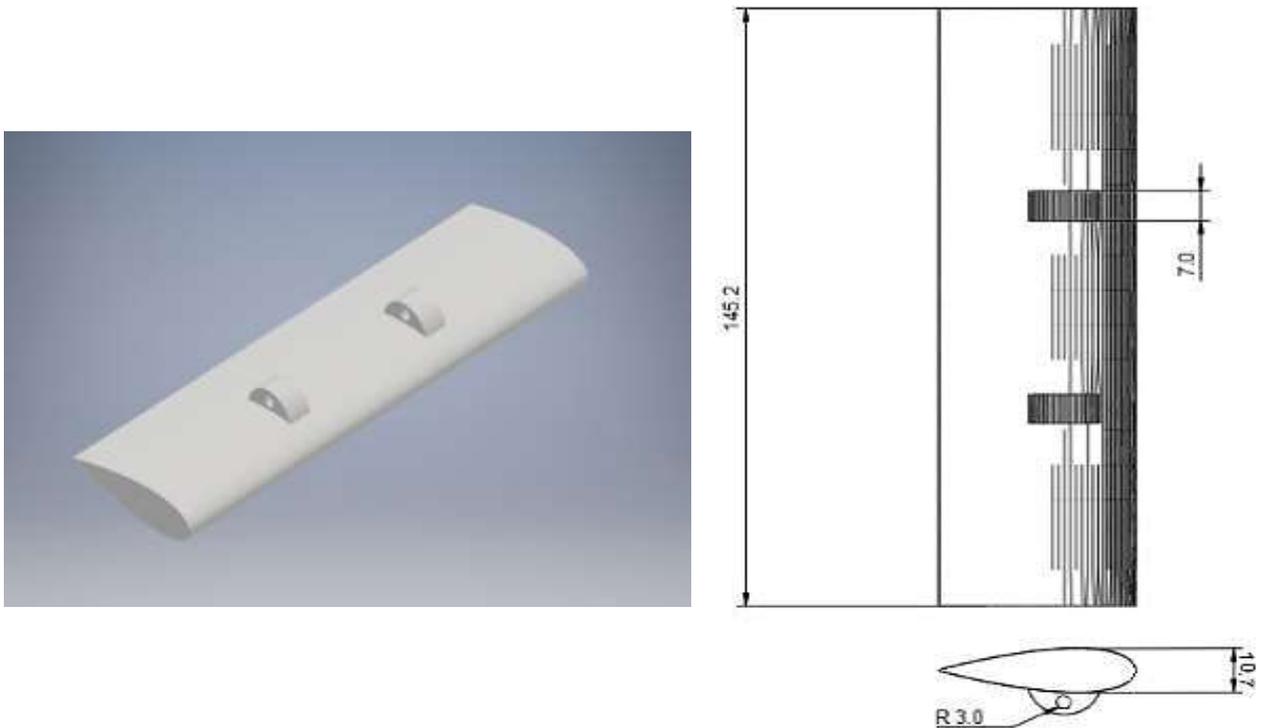
**Tabla 6.** Composición química nominal de las aleaciones en estudio [99], [100].

Aleación	Composición química
Acero UNS S42000	<b>Cr:</b> 12-14% <b>C:</b> 0.15% Max. <b>Ni:</b> 0.75% <b>Mn:</b> 1% Max. <b>Si:</b> 1% Max. <b>P:</b> 0.04% Max. <b>S:</b> 0.03% Max. <b>Fe:</b> Bal%
Bronce UNS C52400	<b>Sn:</b> 9-11% <b>Pb:</b> 0.05% Max. <b>Zn:</b> 0.2% Max. <b>Fe:</b> 0.1% Max. <b>P:</b> 0,03-0,35% <b>Cu:</b> Bal%

#### 4.3 Diseño CAD de sistemas de colada

En esta etapa, se utilizaron los diseños CAD realizados previamente en el proyecto SENECA 60611 “Generación de energía eléctrica a pequeña escala mediante turbinas hidráulicas e hidrocínéticas”. Con estos diseños se realizaron los cálculos requeridos para los sistemas de colada, información que

se utilizó posteriormente para la simulación de la fundición y el prototipado de los modelos de fundición. De esta manera se buscó obtener los parámetros correctos para la fabricación de los álabes de turbina tipo Darrieus buscando predecir la aparición de defectos como porosidad y/o falta de llenado y finalmente obtener piezas con un alto nivel de sanidad. En la **Figura 29** se puede observar el diseño CAD del álabe tipo Darrieus requerido por el proyecto para la generación de energía eléctrica.



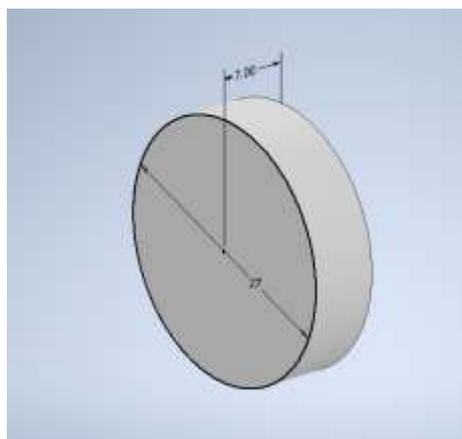
**Figura 29.** Diseño CAD de álabe tipo Darrieus (mm).

Debido a la complejidad que suscita la geometría de la pieza, y la necesidad de optimizar costos, se pensó en la manera de obtener los álabes fundidos con el mejor acabado superficial y la mínima intervención posterior al proceso de fundición. Es por ello, que se utiliza el método de “Investment casting” pero esta vez en lugar de cera, el material usado en el modelo para su conformado fue PLA. De esta manera, el diseño propuesto para el sistema de colada se puede observar en la **Figura 30**.



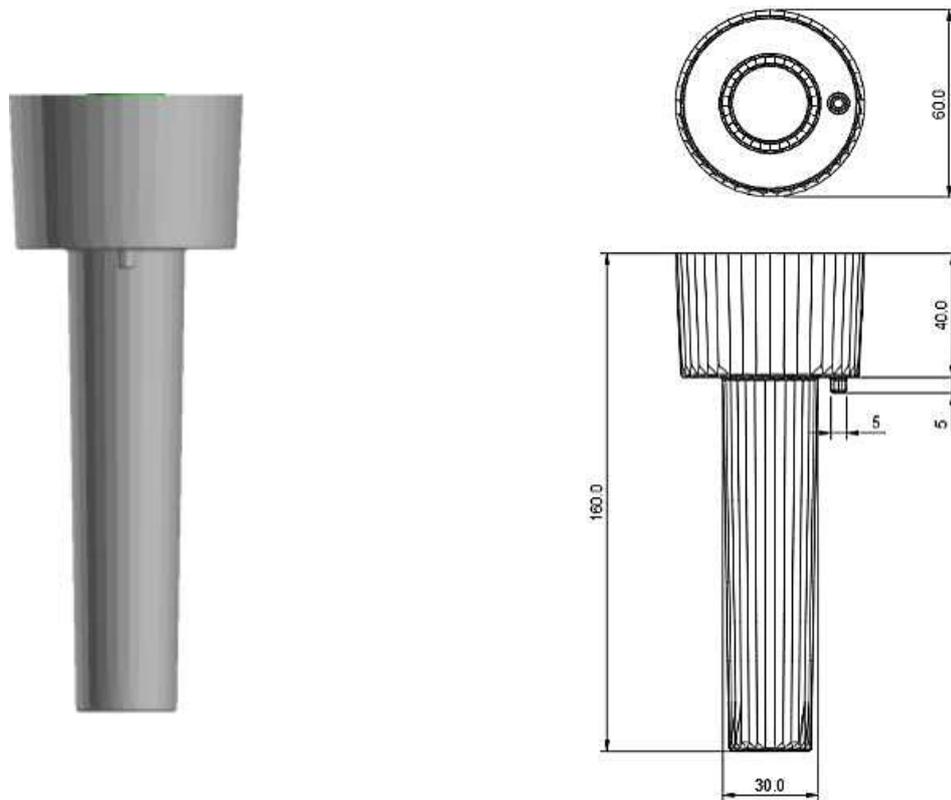
**Figura 30.** Diseño CAD del sistema de colada para álabes tipo Darrieus.

Por otro lado, para la sección experimental del trabajo también se debían obtener las muestras para los ensayos de erosión, corrosión y cavitación. Es por ello que en base al RDA “Rotating Disk Apparatus” y el potencióstato, equipos en los cuales se realizaron los ensayos. Las muestras tienen dimensiones milimétricas especificadas en la **Figura 31**.



**Figura 31.** Dimensiones de muestras para ensayos experimentales (mm).

Para la obtención de estas muestras se recurrió a la norma ASTM A48 [101] y se adaptó haciendo uso del software SolidCast hasta obtener la predicción de piezas sanas para la fundición de barras como se puede observar el sistema de colada en la **Figura 32**.



**Figura 32.** Diseño CAD del sistema de colada para la obtención de muestras (mm).

#### **4.4 Simulación de la fundición**

En esta sección, la simulación de fundición se realizó haciendo uso del programa SolidCast, en el cual se introdujeron diferentes datos de entrada como lo son los materiales y sus propiedades termo físicas **Tabla 7**, el diseño CAD del sistema de colada correspondiente y elegir el método fundición por el cual se requiere lanzar la simulación, por ejemplo, fundición en arena o cera perdida. Además, se debe tener en cuenta otros criterios como la resolución de malla. A continuación, se describe como se llevó a cabo la simulación de fundición.

Inicialmente se importó al programa de simulación el diseño CAD en formato .STL y se determinó la prioridad de solidificación de manera que el programa diferencie cada elemento (pieza, mazarota, ataques, etc.). El siguiente paso fue elegir el material a simular de la base de datos existente o si es necesario introducir los valores de las propiedades termo físicas para crearlo como en el caso del bronce UNS C52400, además se debió elegir el tipo de molde que para las barras fue de arena y para los prototipos de álabes fue cascarón cerámico. Posteriormente se llevó a cabo la parte clave de la simulación, donde se introdujeron diferentes valores como temperatura de vaciado, temperatura de molde, temperatura de solidificación, rango de solidificación, densidad, calor específico, calor latente de fusión, conductividad térmica, la fracción crítica de sólido, punto de Niyama, la contracción del

material y el tiempo de vaciado como se puede observar en la **Tabla 8**. Luego se continuó con el mallado, este software usa un método de diferencias finitas (DFM), lo cual significa que la malla es rectangular compuesta por una serie de nodos cúbicos. Una vez se selecciona el tamaño de los nodos que en este caso fue 2 mm, el software realizó el proceso de mallado.

La ejecución de la simulación se dio una vez se realizaron correctamente todos los pasos anteriores, donde inicialmente se observó el llenado del molde y posteriormente la solidificación de todo el modelo. Las propiedades de entrada usados para la simulación se muestran en la **Tabla 7**, y el procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con el tipo de molde y para cada material de estudio usando los parámetros correspondientes requeridos por el programa como se observan en la **Tabla 8**.

**Tabla 7.** Propiedades de entrada de los materiales para la simulación de fundición.

<b>Aleación</b>		<b>UNS S42000</b>	<b>UNS C52400</b>
Conductividad térmica	W/mK	25	87
Calor específico	J/Kg.K	460	380
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	7753	8775
Temperatura de <i>liquidus</i>	°C	1566	1010
Temperatura de sobrecalentamiento	°C	1666	1110
Temperatura de solidificación	°C	1454	858
Intervalo de solidificación	°C	112	152
Calor latente de fusión	J/Kg	302172	197574
Resolución de malla	mm	2	2

**Tabla 8.** Parámetros de entrada del programa de simulación para cada material.

<b>Parámetro</b>	<b>UNS S42000</b>	<b>UNS C52400</b>
Punto Niyama	30-40%	35% (Investment casting) * 50% (Sand casting) **
Fracción crítica de sólidos	25-30%	30% (Investment casting) * 45% (Sand casting) **
Contracción volumétrica de solidificación	6%	3,5%
Tipo de molde	Cascaron cerámico * Arena **	Cascaron cerámico * Arena **
Propiedades de materiales	Ver tabla 7	Ver tabla 7

Parámetro	UNS S42000	UNS C52400
Tiempo de vaciado	10 segundos *	10 segundos *
	5 segundos **	5 segundos **
Temperatura del molde	26 °C	26 °C

\* Fundición de álabes

\*\* Fundición de barras

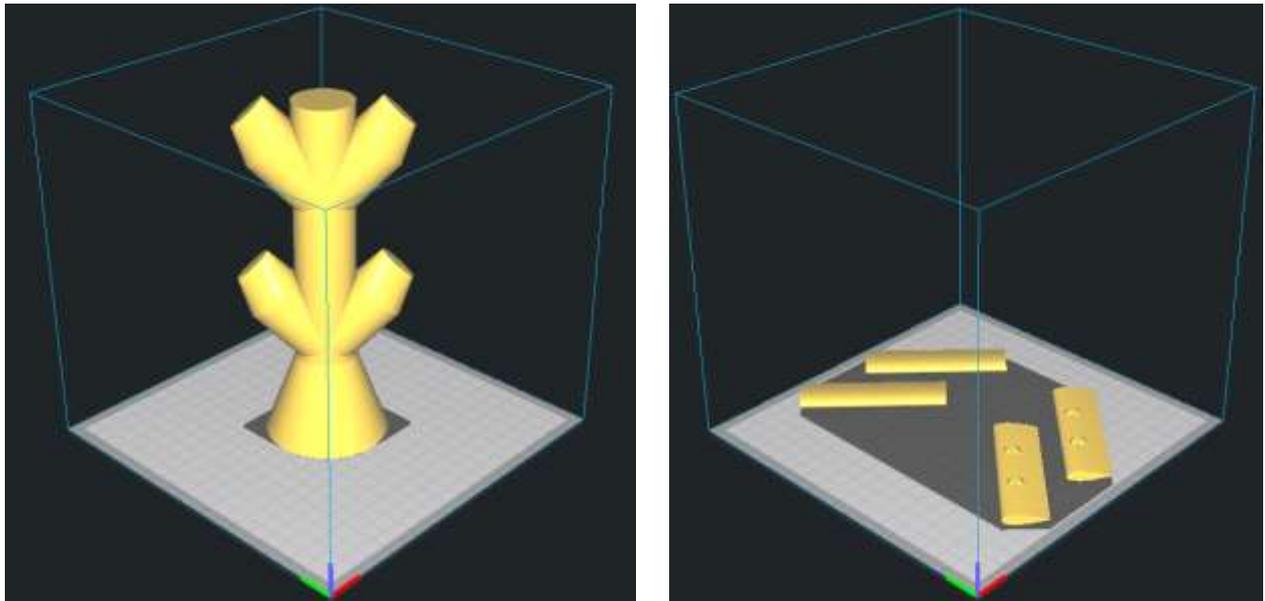
#### 4.5 Prototipado 3D de modelos de fundición.

Haciendo uso de la tecnología de impresión 3D, se llevó a cabo la fabricación de los modelos con alta precisión dimensional con PLA para su uso en el proceso de moldeo y fundición para la obtención de los cuerpos de prueba y los prototipos de álabes de turbina tipo Darrieus que se requieren.

Para la impresión 3D de los modelos fue necesario poner a punto varios parámetros indispensables como la temperatura del extrusor, temperatura de la base, velocidad de impresión, resolución, espesor de pared, llenado de la pieza, entre otros como se especifican en la **Tabla 9**. Esta configuración se realizó con el programa *Ultimaker Cura* con el fin de obtener los modelos con los requerimientos exigidos. En la **Figura 33**, la **Figura 34** y la **Figura 35** se pueden observar los modelos fabricados por impresión 3D.

**Tabla 9.** Parámetros de impresión 3D.

Parámetro	Valor de entrada
Altura de capa (mm)	0.1
Ancho de línea (mm)	0.3
Grosor de pared (mm)	1,2
Densidad de relleno (N°)	3
Temperatura de impresión (°C)	185
Temperatura de impresión inicial (°C)	190
Temperatura de impresión final (°C)	190
Temperatura de la placa de impresión (°C)	70
Diámetro (mm)	1.75
Flujo (%)	100
Velocidad de impresión (mm/s)	60
Ángulo de voladizo del soporte	50°



**Figura 33.** Prototipo del sistema de colada y álabes.



**Figura 34.** Prototipo del modelo de fundición.



**Figura 35.** Prototipo del sistema de colada de barras.

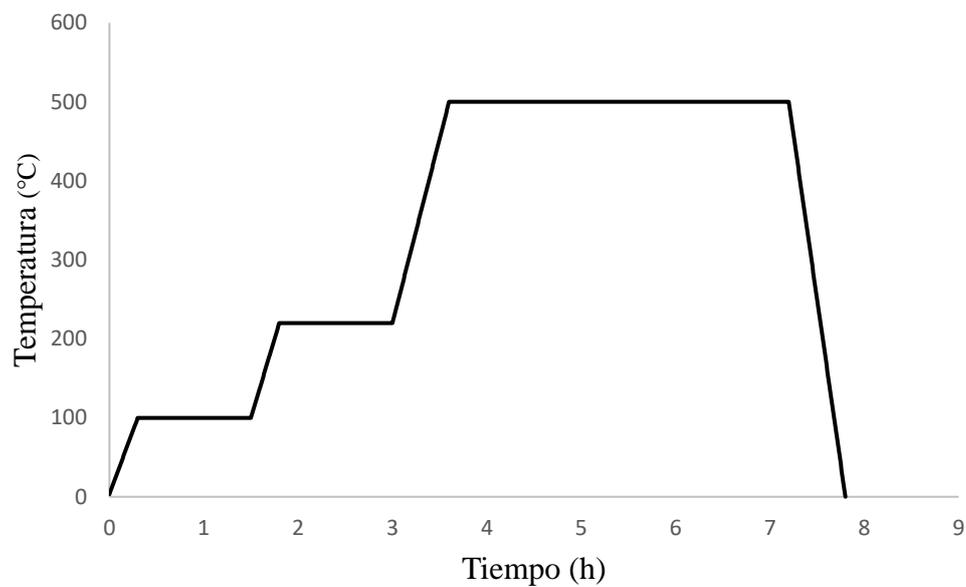
#### **4.6 Fabricación de moldes de fundición.**

En esta etapa, haciendo uso del procesamiento de fundición llamado “*Investment Casting*”, se fabricó un molde o cascarón cerámico que cumpla los requerimientos necesarios para la obtención de los álabes de turbina tipo Darrieus y los moldes de arena para la obtención de los cuerpos de prueba.

Para la fabricación del molde para el proceso de “*Investment Casting*”, inicialmente se realizó un recubrimiento con materiales cerámicos al modelo fabricado por impresión 3D, este cascarón está conformado por circonia, alúmina, chamote, molochita y tensoactivos obteniendo así el molde que se puede observar en la **Figura 36**. Este posteriormente fue sometido a un tratamiento térmico siguiendo la rampa de calentamiento que podemos observar en la **Figura 37**, para eliminar la humedad y el polímero (PLA) del cual está hecho el modelo sin afectar la integridad del cascarón.



**Figura 36.** Molde cerámico para fundición de álabes.



**Figura 37.** Tratamiento térmico de sinterizado y eliminación de PLA para el molde.

Adicionalmente, se fabricaron moldes para la fundición de las muestras para los ensayos de erosión, cavitación y corrosión como los observados en la **Figura 38**. Los moldes con un espesor de pared de 12mm se fabricaron usando el sistema arena-silicato de sodio al 7%, y posteriormente curados con CO<sub>2</sub> gaseoso.



**Figura 38.** Molde de arena para fundición de cuerpos de prueba.

#### **4.7 Proceso de fundición.**

En esta sección, con los sistemas de aleación preseleccionados y los moldes previamente fabricados, se llevó a cabo el proceso de fundición para obtener los cuerpos de prueba y los álabes de turbina tipo Darrieus haciendo uso de un horno de inducción InductoTherm de 75 KW y 50 kg de capacidad. Las aleaciones obtenidas fueron un acero inoxidable UNS S42000 y un bronce UNS C52400 refinado con Zr. Para la fabricación del acero inoxidable se utilizaron las materias primas presentadas en la **Tabla 10**.

**Tabla 10.** Materias primas usadas para la fabricación del acero inoxidable UNS S42000.

<b>Materias primas</b>
FeSi
FeCr
Acero inoxidable 410F
FeMn
Cold rolled
Al

El proceso se llevó a cabo integrando dentro del horno las materias primas a las que previamente por medio de espectrometría de emisión óptica se les verificó la composición química para realizar el cálculo de cargas. Una vez el metal en estado líquido alcanzo una temperatura de 1570 °C

aproximadamente y la composición química estuvo dentro de los rangos requeridos se procedió con el vaciado en los moldes de arena.

De igual forma, para la fabricación del bronce se utilizaron las materias primas presentadas en la **Tabla 11**.

**Tabla 11.** Materias primas usadas para la fabricación del bronce UNS C52400.

<b>Materias primas</b>
Cobre electrolítico
Estaño electrolítico
Cu-30%P
Cu-50%Zr

Este proceso fundición tuvo las mismas consideraciones que para el acero, pero esta vez la temperatura de vaciado fue de 1110 °C aproximadamente. La inoculación con Zr se llevó a cabo introduciendo una capsula de cobre con una determinada cantidad de Cu-Zr granulado en su interior y un sostenimiento de 30 minutos previo al vaciado en los moldes de arena para promover la reacción de inoculación. Es de anotar que el baño fundido fue protegido durante todo el tiempo con una capa de grafito libre de humedad para proteger el metal de la oxidación.

#### **4.8 Fabricación de cuerpos de prueba.**

En esta etapa, se mecanizaron y cortaron las barras resultantes del proceso de fundición para obtener todos los cuerpos de prueba de las aleaciones, este trabajo fue necesario realizarlo con el fin de poner a punto las condiciones de los ensayos que se realizaron en el Aparato de Disco Rotatorio (RDA) para caracterizar los fenómenos de erosión y cavitación, además de los ensayos de corrosión realizados sobre estos materiales para su estudio y establecer comparaciones.

Las muestras necesarias para la sección experimental tienen las dimensiones especificadas en la **Figura 31**, para lograrlo se tomaron las barras tanto de acero inoxidable como de bronce semejantes al ejemplo ilustrado en la **Figura 49** y se mecanizaron en un torno hasta alcanzar un diámetro de 26 mm, posteriormente se llevaron al proceso de corte por electroerosión para lograr muestras de 7 mm de espesor como se puede observar en el ejemplo ilustrado en la **Figura 39**.



**Figura 39.** Muestras de bronce y acero inoxidable para los ensayos experimentales.

Las muestras una vez cortadas se sometieron a ensayos de dureza con un durómetro Novotest TB-BRV-D, los resultados se muestran en la **Tabla 18**.

Posteriormente, en base a las normas ASTM E3-11 [102], ASTM D7127-17 [103] e ISO 4287-97 [104] se realizó la preparación superficial de las muestras para los ensayos, utilizando papel de lija número 80, 150, 320, 400, 800, 1000, 1200 y pasta de diamante de 1  $\mu\text{m}$  y 0,3  $\mu\text{m}$ , además se midió la rugosidad superficial usando un perfilómetro portátil Taylor Hobson Surtonic S-128, lo anterior con el fin de lograr la mínima irregularidad en la superficie a estudiar y evitar ruido en el análisis del desgaste producido en los ensayos. En la **Tabla 12** se presentan las medidas de rugosidad de todas las muestras con su respectiva nomenclatura de identificación y el tipo de ensayo que será sometida.

**Tabla 12.** Nomenclatura y rugosidad promedio de probetas usadas para ensayos experimentales.

<b>Acero UNS</b> <b>S42000</b>	<b>Rugosidad</b> <b>prom.</b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Bronce UNS</b> <b>C52400</b> <b>refinado</b>	<b>Rugosidad</b> <b>prom.</b> <b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tipo de ensayo</b>	<b>pH del</b> <b>agua</b>
S1	0,067	B1	0,315	Erosión	10
S2	0,061	B2	0,432		
S3	0,055	B3	0,224		
S4	0,059	B4	0,154		
S5	0,047	B5	0,229	Erosión	4
S6	0,053	B6	0,215		
S7	0,059	B7	0,453		
S8	0,066	B8	0,271		

Acero UNS	Rugosidad	Bronce UNS	Rugosidad	Tipo de ensayo	pH del agua
S42000	prom. ( $\mu\text{m}$ )	C52400 refinado	prom. ( $\mu\text{m}$ )		
S9	0,074	B9	0,313		
S10	0,060	B10	0,417	Cavitación	10
S11	0,063	B11	0,318		
S12	0,064	B12	0,235		
S13	0,064	B13	0,224		
S14	0,070	B14	0,335	Cavitación	4
S15	0,075	B15	0,240		
S16	0,055	B16	0,153		
S17	0,054	B17	0,268		4
S18	0,059	B18	0,269	Corrosión	10
S19	0,048	B19	0,107		

\*Se realizaron cinco medidas de rugosidad por cada muestra.

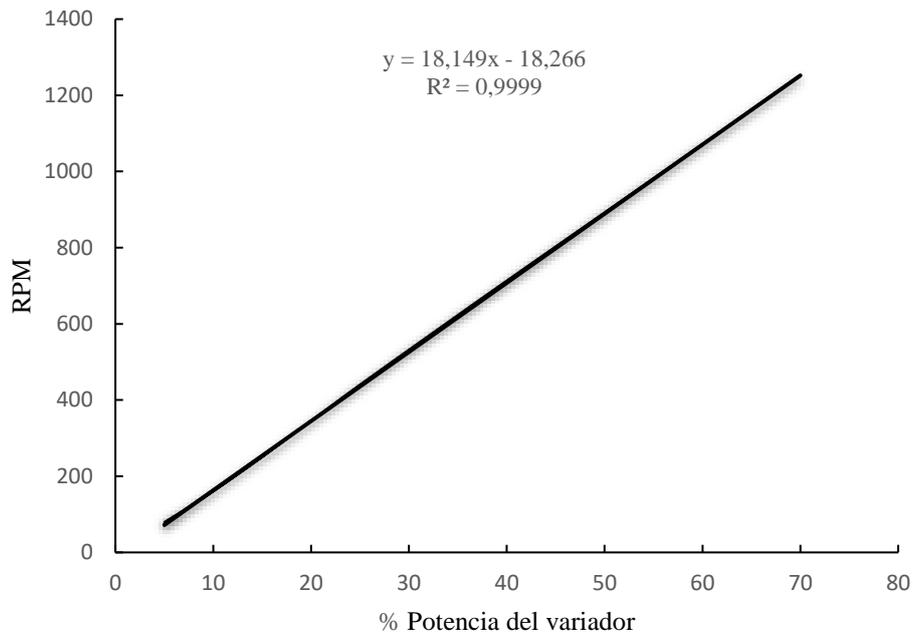
\*\* El promedio de desviación en las medidas de rugosidad fue 0,0110  $\mu\text{m}$  para el acero y 0,0298  $\mu\text{m}$  para el bronce.

#### 4.9 Caracterización de erosión, cavitación y corrosión.

En esta etapa, se determinó a través del estudio de la resistencia al desgaste evaluando la pérdida de masa y la medida del MDE atribuida al efecto de los ensayos, cuál de los materiales cumple los requerimientos necesarios para la fabricación de álabes de una turbina con las características ya mencionadas, tanto este análisis como la caracterización microestructural fueron muy importantes en la selección del material adecuado para la fabricación de los prototipos de álabes tipo Darrieus.

Los ensayos de erosión y cavitación se realizaron en un Aparato de disco rotatorio (RDA) para las condiciones más críticas a las cuales pueden estar sometidos los álabes una vez se encuentren en servicio según lo planteado en el proyecto SENECA 60611.

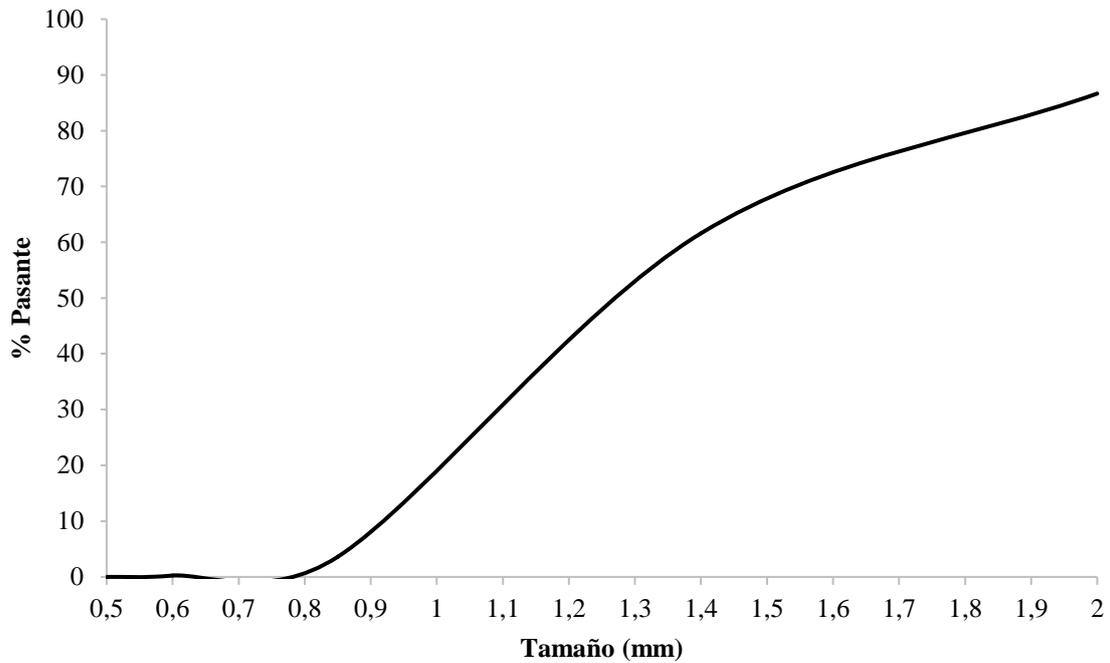
Previo al inicio de los ensayos en el Aparato de Disco Rotativo *RDA*, se realizó la puesta a punto del equipo para procurar un buen funcionamiento y determinar a qué porcentaje de potencia del variador correspondían las 1250 RPM, para lo cual se verificó con la curva presentada en la **Figura 40**. Para esta curva se tomaron los valores de subida y bajada de velocidad de rotación, con respecto al porcentaje de potencia programado en el variador para lo cual se usó un tacómetro. Así fue como se determinó que 71% de potencia corresponde a las 1250 RPM que serán usadas en los ensayos.



**Figura 40.** Curva RPM vs % Potencia del variador.

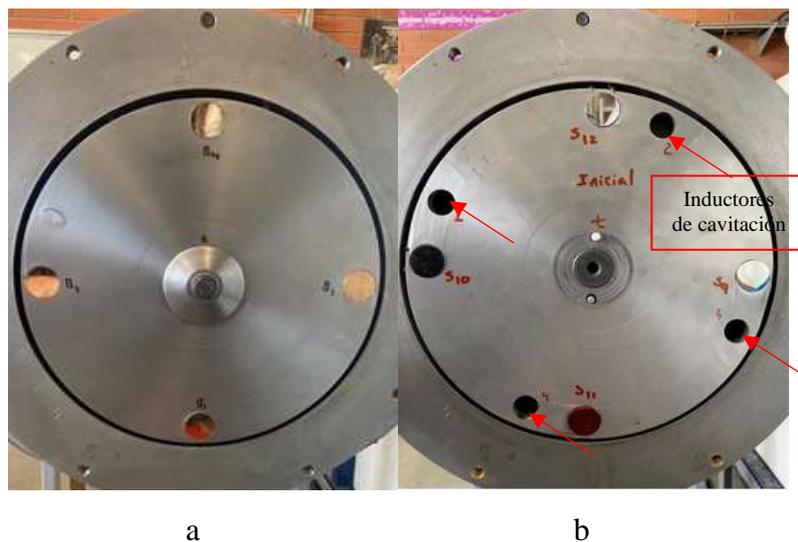
**Ensayo de erosión.** Para este ensayo se hizo uso de agua potable a pH ácido y básico con valores de 4 y 10 respectivamente, el cual fue regulado por niveladores de pH. Dentro de la recámara de RDA (**Figura 15**) se agregaron sedimentos con un tamaño en el rango entre 0,5 y 2mm de diámetro previamente clasificados. De igual manera se estableció que la velocidad de rotación del equipo será 1250 RPM durante un tiempo de 18 horas. Los parámetros para realizar los ensayos fueron seleccionados de acuerdo a la norma ASTM G32 [64] y a los estudios realizados por diferentes autores como Neopan [105], Ramírez [106] y Usma [36] por mencionar algunos, en relación al comportamiento de algunos materiales ante el efecto de fenómenos de desgaste como la erosión, además de las características principales que pueden presentar los sedimentos de algunos ríos.

Se utilizó arena de sílice marca Aplika S.A que se clasificó previamente bajo la norma ASTM C136-01 [107] en un rango de tamaño entre 0,5 y 2 mm como se muestran en la **Figura 41**, de acuerdo a lo encontrado por Ramírez [106] en su estudio del tipo de sedimentos encontrados en ríos colombianos y a los estudios realizados por Usma [36] donde se evidenció que para este tipo de turbinas los sedimentos con un tamaño que se encuentren en este rango de tamaño y a unas condiciones de operación específicas de turbinas hidrocinéticas como las estudiadas, los efectos de desgaste producidos por erosión son significativos además de permitir su estudio a escala de laboratorio.



**Figura 41.** Distribución granulométrica de la arena de sílice usada en los ensayos de erosión.

**Ensayo de cavitación.** Se tuvo en cuenta las mismas consideraciones que para el ensayo de erosión, solo que en este caso no se adicionan sedimentos, en lugar de ello, se habilitan los dispositivos de inducción de cavitación del RDA como se puede observar en la **Figura 42b**, enumerados del 1 al 4 y marcados con flechas color rojo.



**Figura 42.** RDA habilitado para a) ensayo de erosión, b) ensayo de cavitación.

Pensando en la aplicación para la cual se requieren estos materiales y las características técnicas de estas turbinas, los ensayos de erosión y cavitación para el acero inoxidable UNS S42000 y el bronce UNS C52400 refinado con Zr, se realizaron en condiciones extremas como se puede observar en la **Tabla 13** los parámetros utilizados en los ensayos de erosión y cavitación.

**Tabla 13.** Parámetros de los ensayos de erosión y cavitación.

Material	Bronce		Acero	
PH del agua	pH=10	pH=4	pH=10	pH=4
Muestras erosión	B1, B2, B3, B4	B5, B6, B7, B8	S1, S2, S3, S4	S5, S6, S7, S8
Muestras cavitación	B9, B10, B11, B12	B13, B14, B15, B16	S9, S10, S11, S12	S13, S14, S15, S16
Tamaño de la arena *	500 $\mu\text{m}$ – 2 mm			
Velocidad de giro del RDA	1250 RPM			
Tiempo por ensayo	18 h (periodos de 3h)**			
Temperatura del agua	Temperatura ambiente			

\* La arena solo se utilizó para realizar los ensayos de erosión.

\*\* En cada parada se registró la pérdida de masa y se niveló el pH del medio.

**Ensayo de corrosión.** Para los ensayos de corrosión se utilizaron probetas con las mismas dimensiones que en los anteriores, pero esta vez no se hizo uso del *RDA*. Para llevar a cabo estos ensayos se utilizó agua desionizada con pH ácido y básico, con valores de 4 y 10 respectivamente, y un electrolito de NaCl al 3.5%. Los parámetros de los ensayos (**Tabla 14**) se seleccionaron bajo la norma ASTM G31 [108] modificada para ensayos de corrosión por inmersión para materiales metálicos haciendo uso de un potencióstato Metrohm Autolab (**Figura 43**) y el programa de análisis Tafel de polarización potenciodinámica Nova.



**Figura 43.** Potencióstato/galvanostato.

**Tabla 14.** Parámetros de los ensayos de corrosión.

<b>Electrolito</b>	Agua pH=10	Agua pH=4	Agua 3,5% NaCl
<b>Muestras de bronce</b>	B17	B18	B19
<b>Muestras de acero</b>	S17	S18	S19
<b>Ánodo</b>		Grafito	
<b>Cátodo</b>		Plata/Cloruro de plata	
<b>Voltaje</b>		Automático	
<b>Tiempo por ensayo</b>		24 horas	
<b>Temperatura del agua</b>		Temperatura ambiente	

#### **4.10 Caracterización microestructural.**

En esta sección, se busca caracterizar microestructuralmente los materiales de estudio para determinación de fases, presencia de inclusiones, distribución, orientación y tamaño de grano mediante microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido para correlacionar estos resultados con la caracterización del tipo de desgaste.

Para lograrlo se tomaron muestras de los materiales estudiados y se analizaron inicialmente por microscopía óptica en un equipo Nikon eclipse MA100. Las muestras seleccionadas se atacaron con nital al 2% para el acero y con cloruro férrico para el bronce. Posteriormente se tomaron las muestras usadas en los ensayos de erosión y cavitación para ser observadas por microscopía electrónica de barrido SEM y observar que cambios se podrían identificar superficialmente en el material. En la **Tabla 15** se encuentran los reactivos usados para el ataque en el caso de la microscopía óptica.

**Tabla 15.** Procedimiento metalográfico para análisis microestructural.

<b>Aleación</b>	<b>Pulido</b>	<b>Ataque químico</b>	<b>Procedimiento</b>
Acero inoxidable UNS S42000	Lijas: 80, 150, 320, 400, 800, 1200, 2000 Pasta de diamante: 1 $\mu\text{m}$ , 0.3 $\mu\text{m}$	Nital al 2%: Alcohol Ácido nítrico	Inmersión por 1 minuto hasta obtener contraste.

Aleación	Pulido	Ataque químico	Procedimiento
	Lijas: 80, 150, 320, 400, 800, 1200, 2000	HCl 3 ml	Inmersión por 2 min
Bronce UNS C52400 refinado con Zr	Pasta de diamante: 1 $\mu\text{m}$ , 0.3 $\mu\text{m}$ Sílica coloidal: 0.05 $\mu\text{m}$	FeCl <sub>3</sub> 5 g Etanol 100 ml	hasta obtener contraste

## 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

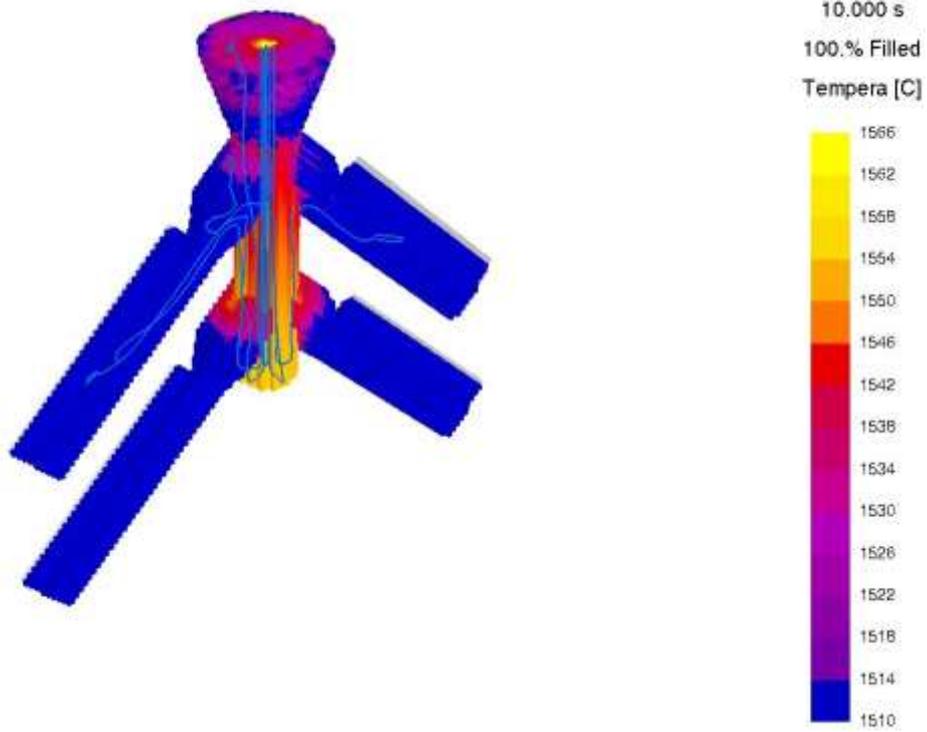
### 5.1.1 Simulación de fundición

Usando herramientas computacionales como el software de simulación de fundición SOLIDCast®, fue posible predecir la sanidad de las piezas de fundición buscando minimizar la cantidad de defectos a través de toda la geometría de la pieza y de esta manera seleccionar el diseño y parámetros de proceso más adecuados para continuar con el proceso de fundición para los diferentes materiales.

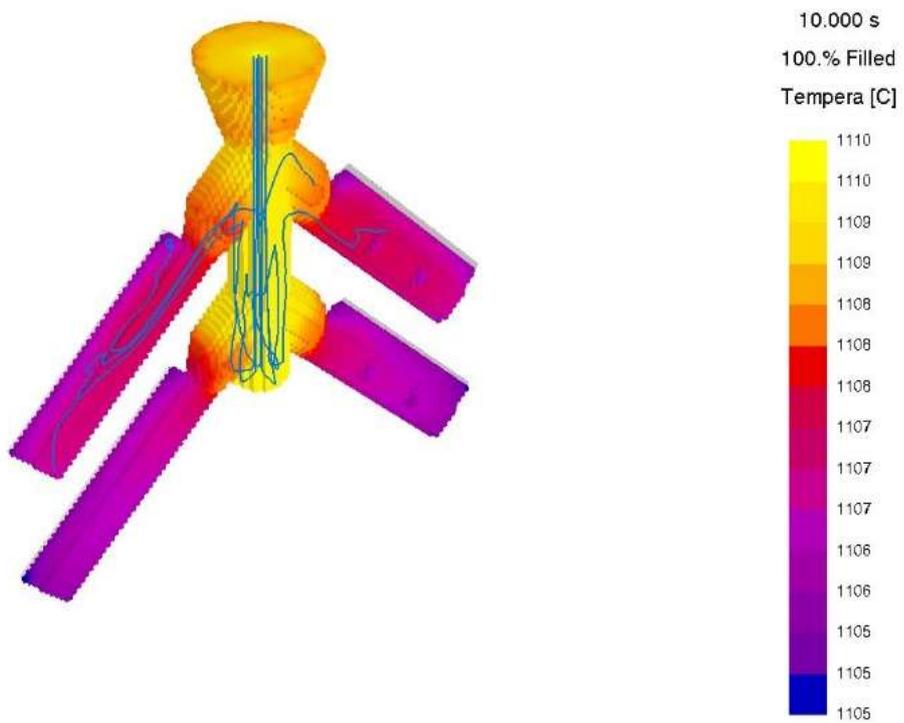
En esta etapa se usaron los diseños de sistema de colada previamente mencionados y se optimizaron hasta lograr con el programa de simulación un resultado apto para lograr obtener piezas con un alto grado de sanidad. Se pudo identificar los posibles defectos de fundición asociados a la geometría, además del comportamiento térmico y aspectos como turbulencia del fluido. Estas simulaciones se llevaron a cabo para las dos aleaciones en estudio como se puede observar en la **Figura 44** y **Figura 45**. De acuerdo con lo observado en las simulaciones se pudo determinar que, en las condiciones diseñadas, los moldes se llenan completamente en un tiempo de 10 segundos para los álabes y 5 segundos para las barras. El tiempo de vaciado se calculó con la expresión mostrada en la ecuación 16 y se realizó a una temperatura aproximada de 1570 °C para el acero inoxidable UNS S42000 y 1110 °C para el bronce UNS S52400 refinado con Zr.

De igual manera se pudo verificar mediante el programa de simulación los sitios donde posiblemente podrían quedar ubicados los defectos dentro de todo el sistema, mostrando de esta manera que para ambas aleaciones las contracciones que predice el programa estarán ubicadas fuera de las piezas de interés, tanto para los álabes como para las barras de donde se obtendrán la probetas, como se muestra en la **Figura 46** y la **Figura 47**, permitiendo así continuar con la fabricación de los moldes para la fundición.

a

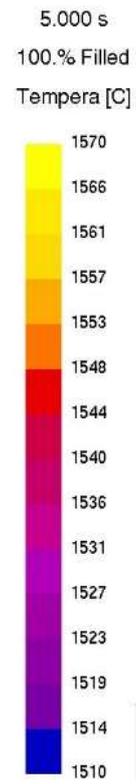
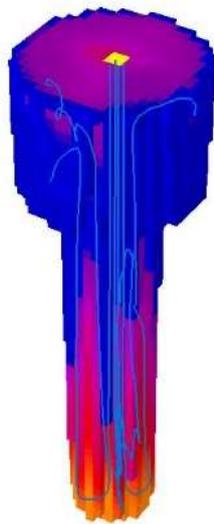


b

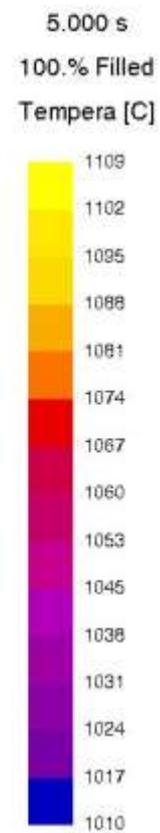


**Figura 44.** Simulación de llenado de álabes para la aleación a) UNS S42000 y b) UNS C52400 refinada con Zr.

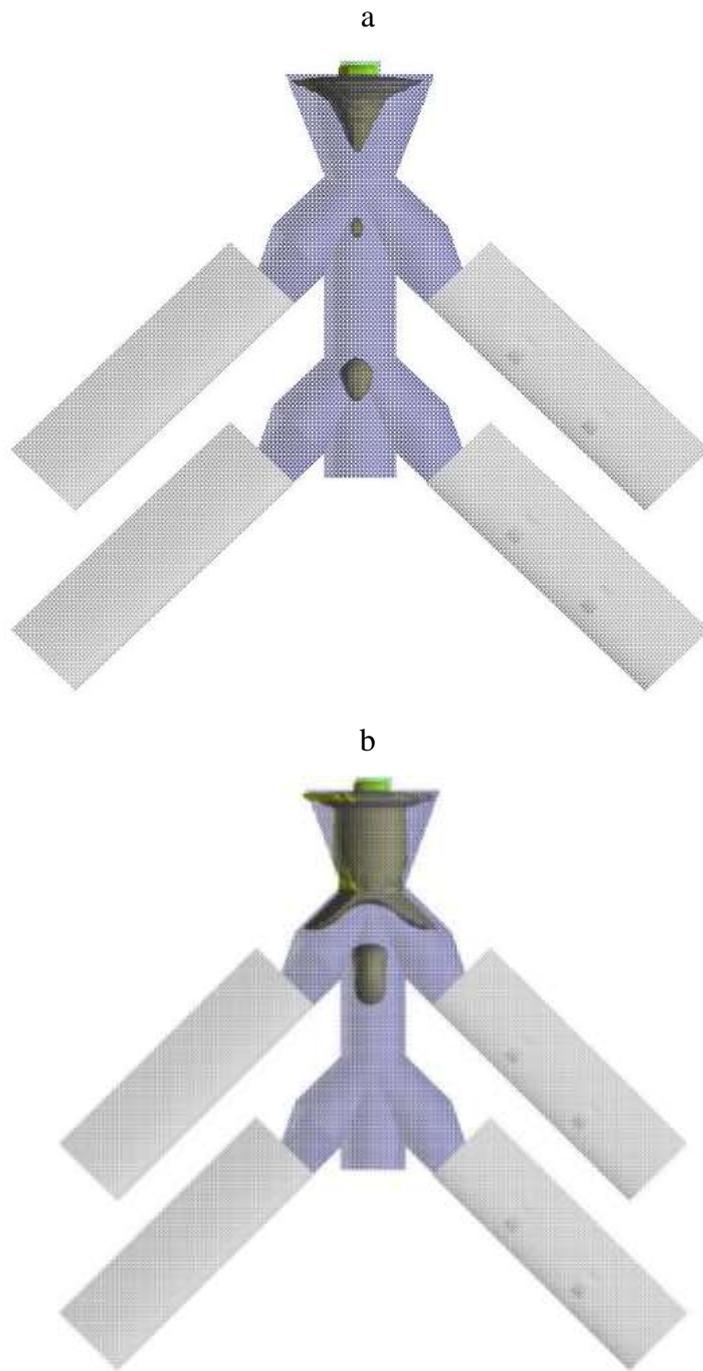
a



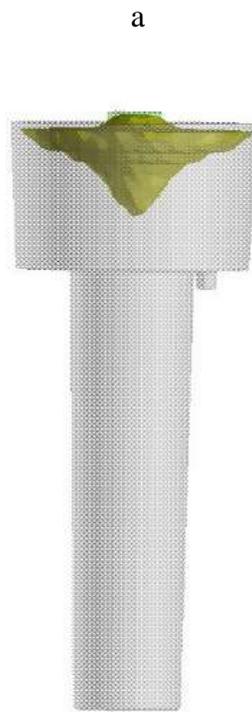
b



**Figura 45.** Simulación de llenado de barras para obtención de muestras para la aleación a) UNS S42000 y b) UNS C52400 refinada con Zr.



**Figura 46.** Predicción de defectos de fundición de álabes a) Acero UNS S42000 y b) bronce UNS C52400.



**Figura 47.** Predicción de defectos de fundición de álabes a) Acero UNS S42000 y b) bronce UNS C52400.

### 5.1.2 *Proceso de fundición*

El proceso de fundición se llevó a cabo en el laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia, haciendo uso de la información recolectada para obtener los parámetros adecuados con el fin de obtener piezas con un alto grado de sanidad y aptas para ser utilizadas en los análisis posteriores en los ensayos de erosión, cavitación y corrosión. La secuencia del diseño, simulación de fundición, prototipado 3D de modelos y moldeo, finalmente se consolidó con la fabricación de las piezas metálicas haciendo uso de un horno de inducción InductoTherm de 75 KW y una capacidad de 50 kg. En esta etapa se obtuvieron barras, las cuales fueron maquinadas y mediante corte por electroerosión y también se realizó la fundición por el método de “*Investment Casting*” de los prototipos de álabes tipo Darrieus.

En la **Tabla 16** se puede observar la composición química de las aleaciones obtenidas de las aleaciones fabricadas, en la **Figura 48** y la **Figura 49** se pueden observar ejemplos de las piezas obtenidas del proceso en estado fundido, con las cuales se validaron las predicciones obtenidas en las simulaciones de fundición y gracias a ello se continuo con el estudio propuesto en este trabajo.



**Figura 48.** Álaves fundidos.



**Figura 49.** Barra fundida para obtención de cuerpos de prueba.

**Tabla 16.** Composición química de las aleaciones fabricadas.

Aleación	Composición química
Acero inoxidable UNS S42000	Cr: 13.61% C: 0.131% Ni: 0.163% Mn: 0.688% Cu: 0.044 % Mo: 0.023% Si: 0.707% P: 0.018% S: 0.004% Fe: Bal%
Bronce UNS C52400 refinado con Zr	Fe: 0.001% Pb: 0.001% P: 0.053% Sn: 10.53% Zn: 0.003% Zr: 0.112% Cu: Bal%

### 5.1.3 Caracterización de erosión, cavitación y corrosión

#### Ensayos de erosión y cavitación

Los parámetros para estos ensayos se muestran en la **Tabla 13** y para llevarlos a cabo las muestras se ubicaron en el RDA como lo ilustra la **Figura 42a** y **Figura 42b**.

De estos ensayos se obtuvo como resultado la pérdida de masa registrada en cada parada, la cual se realizó en periodos de 3 horas hasta acumular 18 horas de exposición. Partiendo de las recomendaciones plasmadas en la norma ASTM G32 [64], se analizó el grado de deterioro de los materiales sometidos a los ensayos evaluando el parámetro MDE (profundidad de erosión media), el cual se usa para medir la pérdida volumétrica de material de la pieza expuesta a este tipo de ensayos

de desgaste a causa de fenómenos como erosión y cavitación. De esta medida se dice que es más significativa que los valores reportados de masa perdida cuando los materiales que se comparan tienen diferentes densidades [64]. Para obtener los datos que permitieron obtener esta información se usó la expresión reportada en la Ecuación 21.

$$MDE = \frac{\Delta m}{\rho A} \quad (21)$$

Donde,  $\Delta m$  es el cambio de masa,  $\rho$  es la densidad del material y  $A$  es el área expuesta en el ensayo.

Por otro lado, se encuentra la pérdida de masa como parámetro para medir la agresividad de la erosión y la cavitación sobre el material en estudio, el cual es usado por algunos autores para discutir la resistencia de algunos materiales frente al desgaste. La pérdida de masa se expresa como se muestra en la Ecuación 22.

$$PD = \frac{W_i - W_f}{W_i - \Delta t} \times 1000 \quad (22)$$

Donde,  $W_i$  es el peso inicial de la muestra,  $W_f$  es el peso final de la muestra y  $\Delta t$  el periodo al cual se expuso la muestra al ensayo de desgaste.

En la **Tabla 17** se muestran los valores de masa pérdida y MDE promedio obtenidos de los ensayos de erosión y cavitación de los materiales en estudio.

**Tabla 17.** Resultados de los ensayos de erosión y cavitación en RDA.

	<b>Muestras</b>	<b>pH del medio</b>	<b>Tiempo de exposición (h)</b>	<b>Masa antes (g)</b>	<b>Masa después (g)</b>	<b>Pérdida masa (mg)</b>	<b>MDE (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Tasa de desgaste promedio</b>
Erosión	S	4		22,08978	19,17503	2914,75050	711,15815	0,12937
	B	4		24,69680	22,25680	2439,99750	542,91856	0,09470
	S	10	18	23,13494	21,35037	1784,57250	435,07575	0,07393
	B	10		25,43526	21,13553	4299,72100	961,99131	0,16861

		<b>pH</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Masa</b>	<b>Masa</b>	<b>Pérdida</b>	<b>MDE</b>	<b>Tasa de</b>
	<b>Muestras</b>	<b>del</b>	<b>exposición</b>	<b>antes</b>	<b>después</b>	<b>masa</b>	<b>(<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>desgaste</b>
		<b>medio</b>	<b>(h)</b>	<b>(g)</b>	<b>(g)</b>	<b>(mg)</b>		<b>promedio</b>
	S	4		23,45961	23,43697	22,64250	5,51506	0,00090
	B	4		24,86403	24,85514	8,88850	1,98917	0,00033
Cavitación	S	10		23,09572	23,09057	5,15250	1,25433	0,00021
	B	10		24,86363	24,85465	8,97800	1,99774	0,00033

El MDE presentado en la **Tabla 17** corresponde a la altura en  $\mu\text{m}$  de material que se ha desprendido a causa de los fenómenos de erosión y cavitación. Estos valores promedio de las cuatro replicas realizadas bajo cada condición de ensayo evidencian que el MDE en los ensayos de erosión presenta valores mucho más elevados respecto a los arrojados por los ensayos de cavitación, esto es atribuido a la presencia de arena de sílice como material abrasivo en suspensión dentro del RDA en los ensayos de erosión. El desgaste erosivo depende de varios factores, entre ellos el tamaño del material abrasivo, la dureza de las partículas, el ángulo y la velocidad de impacto, además involucra diferentes mecanismos de desgaste que van ligados a los fenómenos de desgaste respecto a la interacción partícula-superficie produciendo desprendimiento del material expuesto por mecanismos como fatiga, corte o fractura.

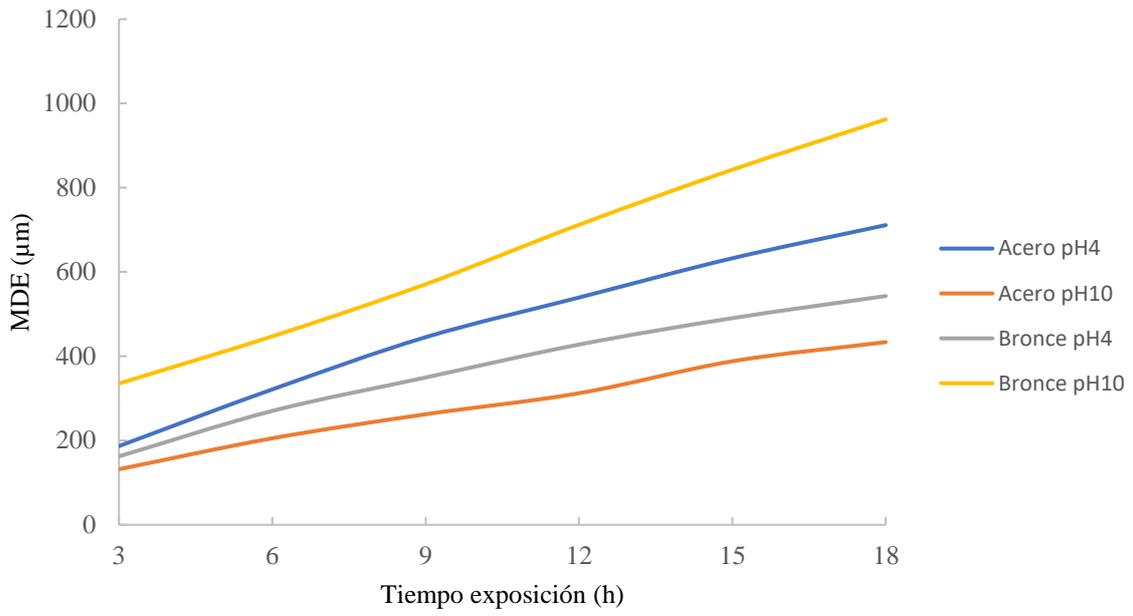
Por lo anterior, se considera entonces que la abrasión por erosión es la responsable de un mayor deterioro en los materiales estudiados con respecto a la cavitación bajo estas condiciones a las cuales fueron sometidos durante los ensayos, donde se observó que en medio ácido el bronce presentó una pérdida de masa que alcanzó el 9,88% respecto al 13,20% que presentó el acero y en medio básico el bronce presentó una pérdida de masa de 16,90% mientras que el acero perdió el 7,71%. Por su parte, se encontró que la cavitación generó un daño en menor proporción respecto a la erosión, esto debido a que las turbinas hidrocinéticas propuestas por el proyecto no alcanzan unas condiciones de funcionamiento que produzcan grandes cambios de presión en el sistema que desencadene una interacción que genere daños graves por cavitación sobre el material. En estos ensayos de cavitación se observó que en medio ácido el bronce presenta una pérdida de masa que alcanzó solo el 0,04% respecto al 0,10% que presentó el acero y en medio básico el bronce presentó una pérdida de masa de 0,04% mientras que el acero perdió el 0,02%.

Gracias a esto, se identificó que una de las variables que juega un papel importante es el pH, el cual se controló durante los ensayos mediante niveladores y se observó su influencia en los valores

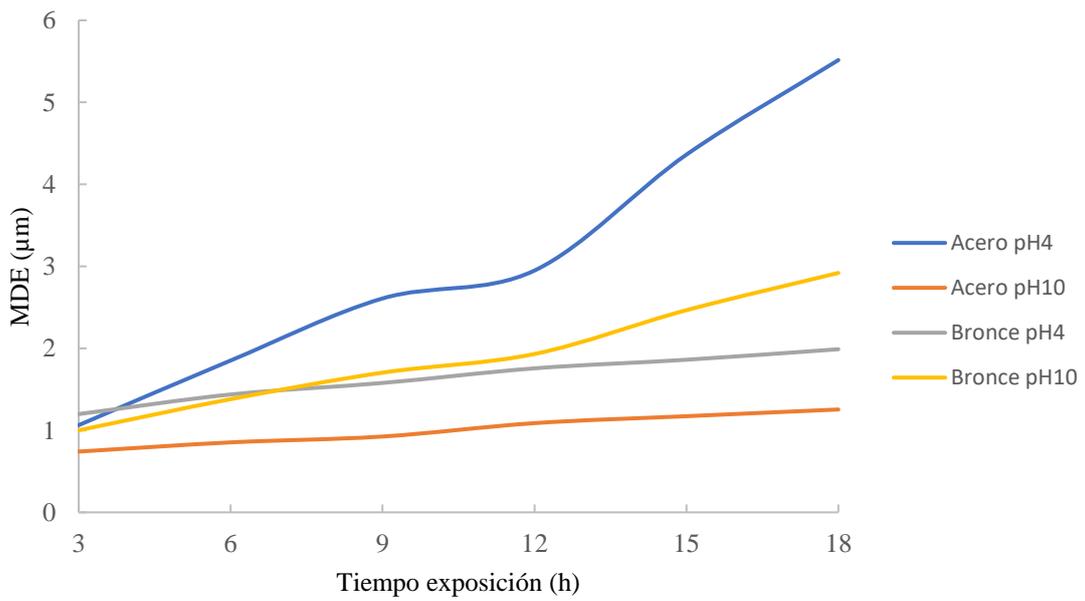
obtenidos de MDE, pues bajo condiciones de pH ácido el acero presentó un mayor desgaste bajo condiciones de erosión y cavitación en comparación con el bronce tal como se observa en la **Figura 50** y la **Figura 51**. Una explicación a este fenómeno se basa en la fragilización que produce el hidrogeno en consecuencia del incremento de este, promovido por la disminución de pH, debido a la formación de iones hidronio en la solución. La baja cantidad de cromo en zonas localizadas en la interfaz entre la matriz y los carburos de cromo formados, hace que el acero sea susceptible a la reacción del hidrogeno con el hierro aumentando así su estado de oxidación [109], lo cual produce un posterior debilitamiento de esta interfaz, eliminando el soporte de los carburos de cromo en la matriz y provocando su desprendimiento con mayor facilidad en las condiciones de los ensayos realizados al material estudiado [110].

Para el bronce el comportamiento es diferente, en un medio básico su oposición a la pérdida de material es inferior que en un medio ácido, tal como lo evidencia los valores de MDE presentados en la **Figura 50** y la **Figura 51**. En diferentes condiciones de pH este material puede formar capas de óxido pasivas de diferente composición o se puede presentar en forma de ion en su superficie tal como lo indican los diagramas de Pourbaix [111]. Cuando se somete experimentalmente a un medio básico, en este caso  $\text{pH}=10$ , y en dependencia del potencial formado en el sistema, existirá una tendencia a la formación de cuprita (potenciales bajos) o tenorita (potenciales más altos). En ambos casos se forma una capa pasiva que protege el material de la oxidación, pero bajo las condiciones presentadas de erosión y cavitación estas capas facilitan el desprendimiento de material [112] provocando un menor desempeño en comparación con el acero.

En la **Figura 50** y la **Figura 51** se puede observar gráficamente un esquema comparativo de MDE para ambos materiales frente a los ensayos de erosión y cavitación realizados respectivamente.



**Figura 50.** MDE promedio de los ensayos de erosión.



**Figura 51.** MDE promedio de los ensayos de cavitación.

### 5.1.4 Caracterización microestructural

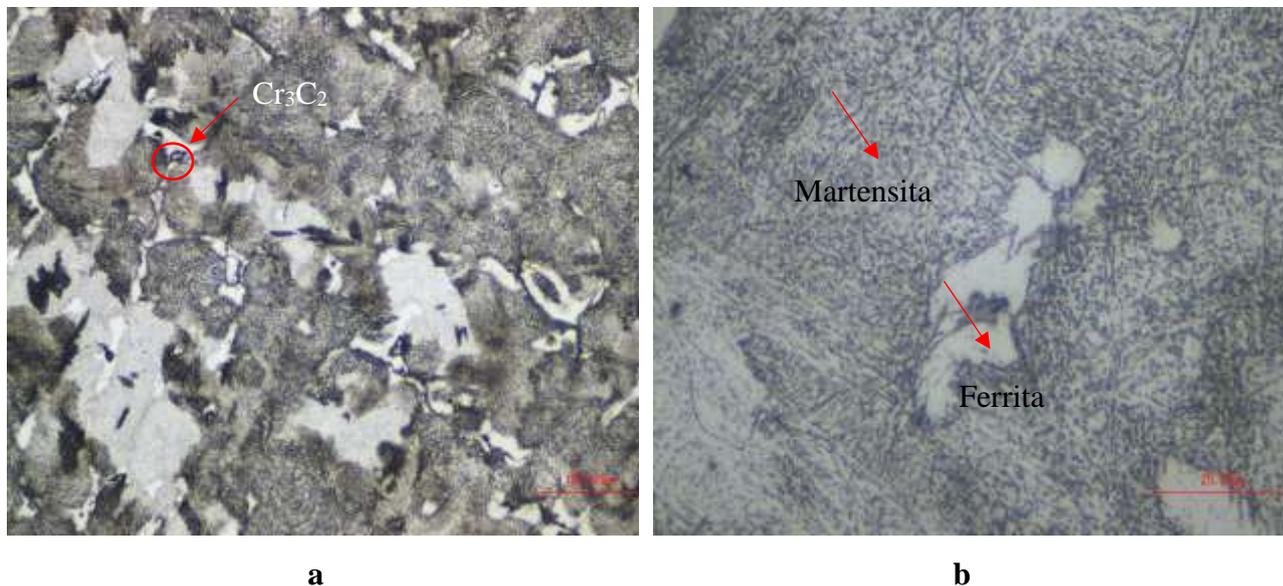
De los análisis microestructurales realizados a los materiales se obtuvieron los resultados presentados a continuación.

**Tabla 18.** Dureza de las aleaciones fundidas.

Aleación	Dureza	Error	Desv.
Bronce UNS C52400 refinado con Zr	76,4 HB / 84 HV*	0,985	1,389
Acero inoxidable UNS S42000	48,3 HRC / 484 HV*	1,878	3,576

Nota: \*para temas comparativos se denota la dureza de ambos materiales en escala Vickers según la norma ASTM E140 [113].

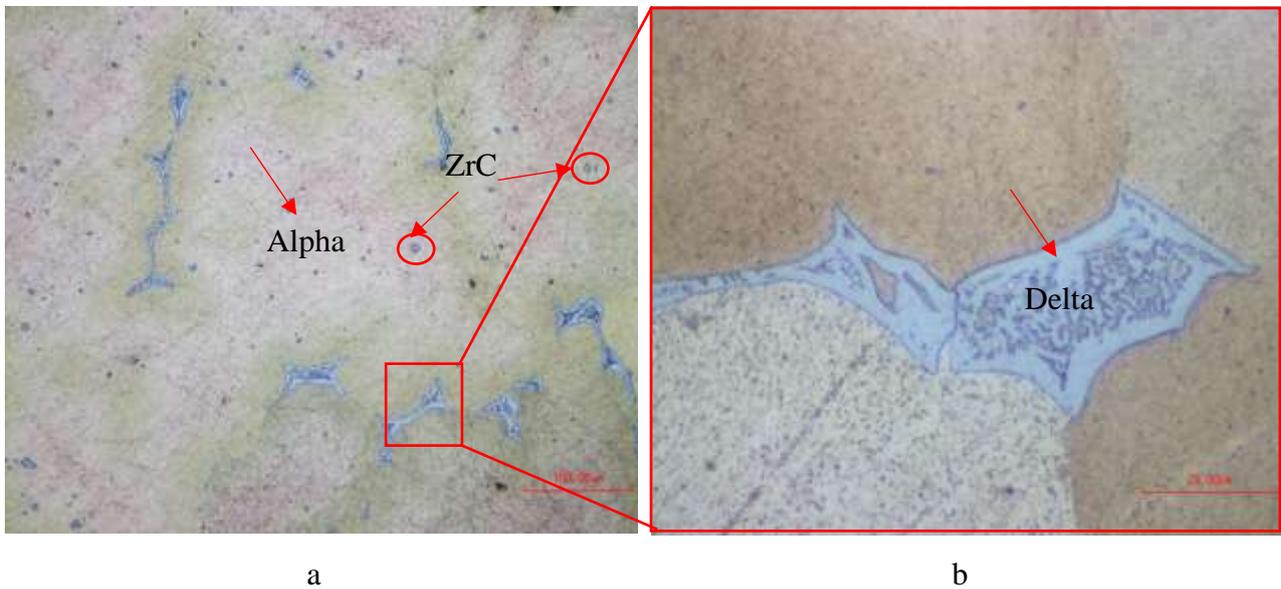
En la **Figura 52** se muestra la microestructura del acero en condiciones *as cast*. En la **Figura 52a** se observa una estructura dendrítica, de ferrita y carburos en el espaciado interdendrítico. En la **Figura 52b**, se evidencia que se conserva el patrón dendrítico con una estructura predominantemente martensítica, la cual es responsable del aumento en su dureza, y con presencia de carburo de cromo en el espaciamiento interdendrítico.



**Figura 52.** Micrográficas de muestra de acero inoxidable, a) 200x b) 1000x.

En la **Figura 53** se pueden observar las micrográficas del bronce con 10% de estaño y refinado con circonio, en la **Figura 53a** se puede notar un crecimiento dendrítico de la fase primaria, además de la microsegregación de estaño, esto debido a que las ultimas regiones que solidifican presentan un mayor contenido de estaño (color blanco), las regiones con menor cantidad de estaño se encuentran

en el centro de los brazos dendríticos (color café) y partículas facetadas que corresponden a los carburos de circonio. En la **Figura 53b** se puede ver la presencia de una fase de color gris en la región interdendrítico que corresponde a la fase delta.

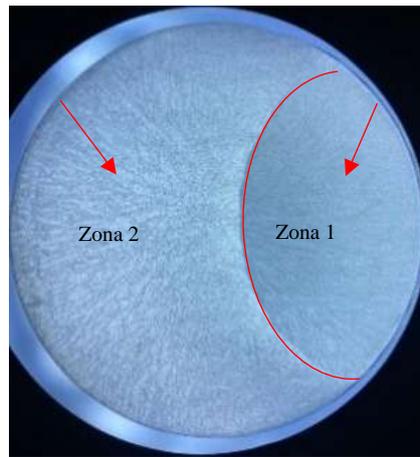


**Figura 53.** Micrografía de muestra de Bronce-10%Sn refinado con circonio a) 200x y b) 1000x.

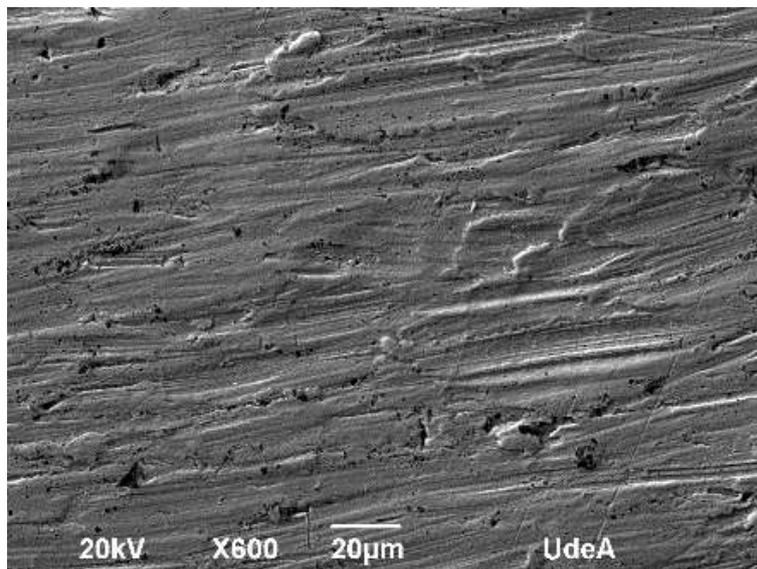
Luego de culminar los ensayos de erosión y cavitación, se observó el cambio superficial sufrido por las muestras debido al ataque en el periodo de exposición. Para ello se utilizó un estereoscopio y un microscopio electrónico de barrido JEOL-JSM 6490LV para identificar en detalle las evidencias del daño producido sobre la superficie de los materiales estudiados.

En la **Figura 54** se muestra el estado final de una de las muestras de acero sometida a ensayos de erosión en medio básico (pH=10).

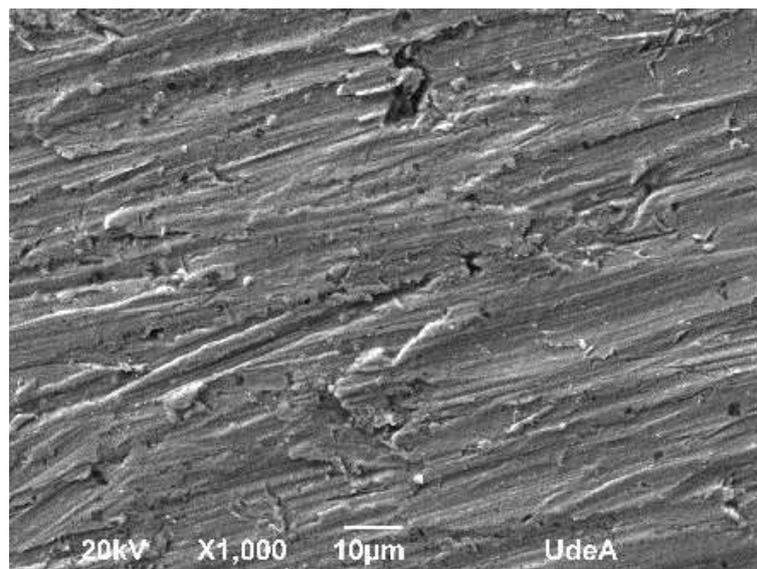
En la **Figura 55** se puede observar el estado de la superficie de una muestra de acero luego de ser sometida a ensayos de erosión en un medio ácido (pH=4).



a

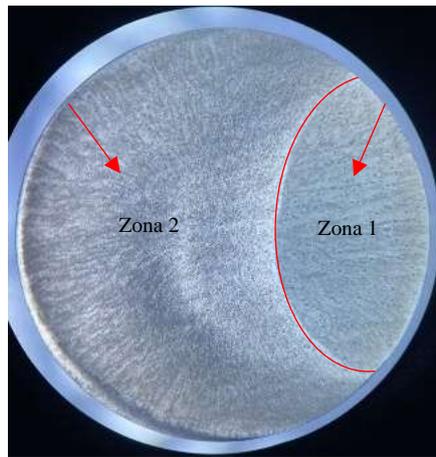


b

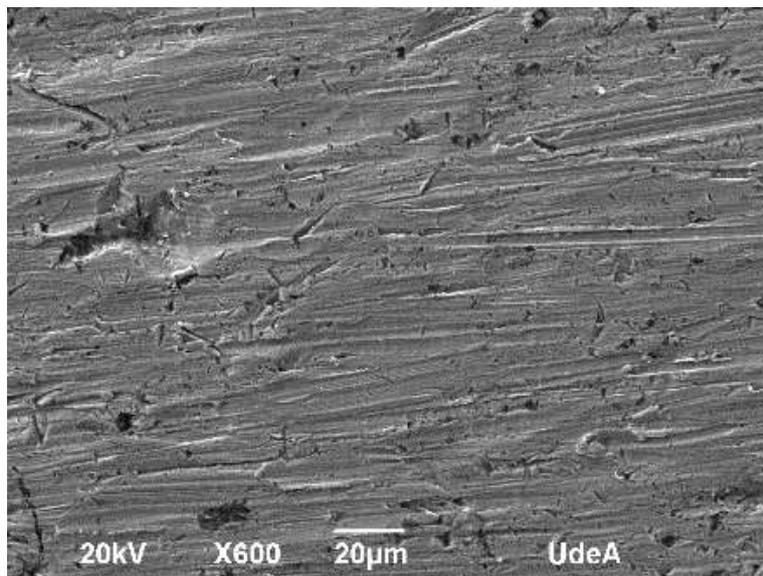


c

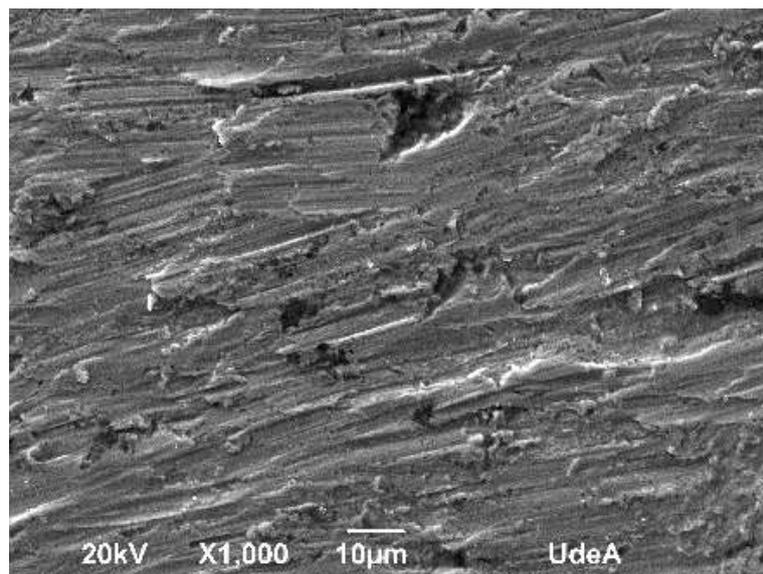
**Figura 54.** Desgaste producido en el acero inoxidable debida a erosión en medio básico (pH=10) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.



a



b



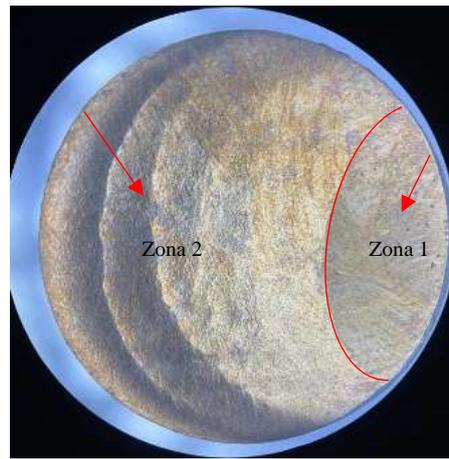
c

**Figura 55.** Desgaste producido en el acero inoxidable debida a erosión en medio ácido (pH=4) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM Zona 2 a 1000X.

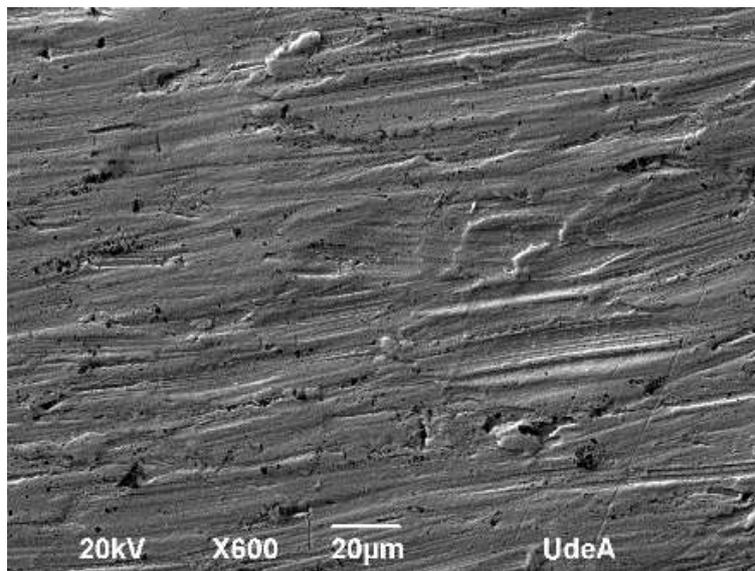
Visualmente se puede identificar en la **Figura 54** y la **Figura 55** una orientación marcada de desgaste sobre la superficie de la muestra de acero inoxidable que fue sometida tanto a un medio con pH básico como para el medio con pH ácido. Debido a la dirección del flujo en la que circula el agua durante los ensayos realizados y a que se respetó hasta el final la posición en la que fueron ubicadas las muestras desde el inicio, se puede ver que la superficie está dividida en dos grandes zonas que se pueden observar en la **Figura 54a** y la **Figura 55a**: zona 1, esta presenta menor pérdida de material y está ubicada al lado opuesto a la zona 2, la cual presenta un mayor desgaste y es precisamente el lugar por donde incide el flujo durante las 18 horas del ensayo. En la **Figura 54b** y la **Figura 55b** encontramos imágenes SEM a 600x, donde identificamos que en la topografía de la muestra se presentan surcos direccionados en el sentido del flujo y para la muestra sometida a pH básico visualmente está más marcado. Lo anterior se contrasta con valores obtenidos de MDE de 6,2% y rugosidad promedio de 0,061  $\mu\text{m}$  en el medio con pH=10, respecto a un MDE de 10,20% y rugosidad promedio de 0,056  $\mu\text{m}$  en el medio con pH=4, evidenciando que en medio ácido se presenta una mayor pérdida de material, pero a su vez la rugosidad promedio es menor que en medio básico validando lo observado en las imágenes. Para la **Figura 54c** y la **Figura 55c** encontramos un acercamiento a 1000x para ambos casos y de manera visual se puede apreciar con más detalle lo mencionado anteriormente y se puede identificar algunos lugares donde el desprendimiento del material fue más abrupto. Según lo reportado por Javaheri V. et al [43] la morfología de las marcas de erosión presentadas en las muestras de acero inoxidable es similar a condiciones de bajo ángulo de impacto y baja velocidad de las partículas, donde el arado es el mecanismo predominante presionando el metal hacia los costados y al frente para formar surcos como se ilustra en la **Figura 7a**.

En la **Figura 56** se muestra el estado final de una de las muestras de bronce sometida al ensayo de erosión en medio básico (pH=10).

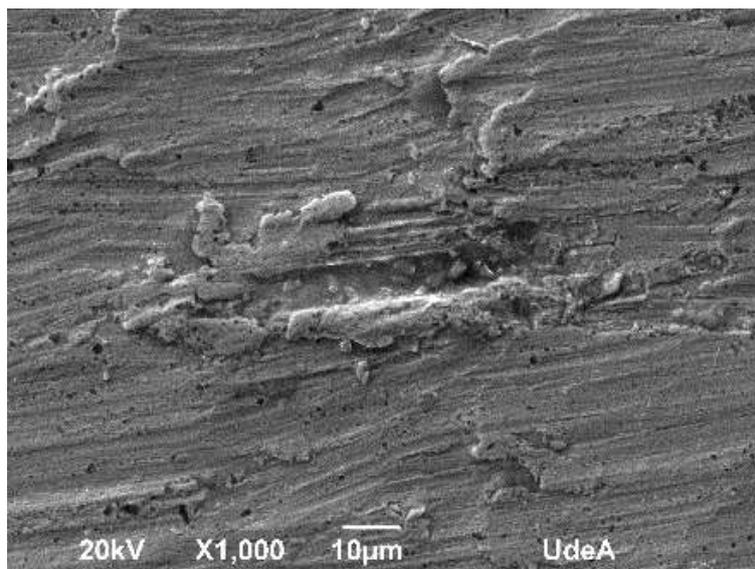
En la **Figura 57** se muestra la superficie de una muestra de bronce al finalizar los ensayos de erosión en medio ácido (pH=4).



a

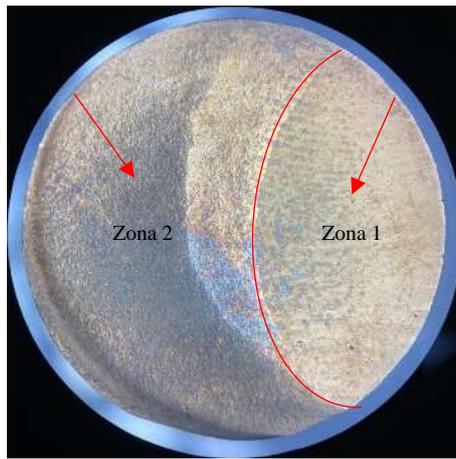


b

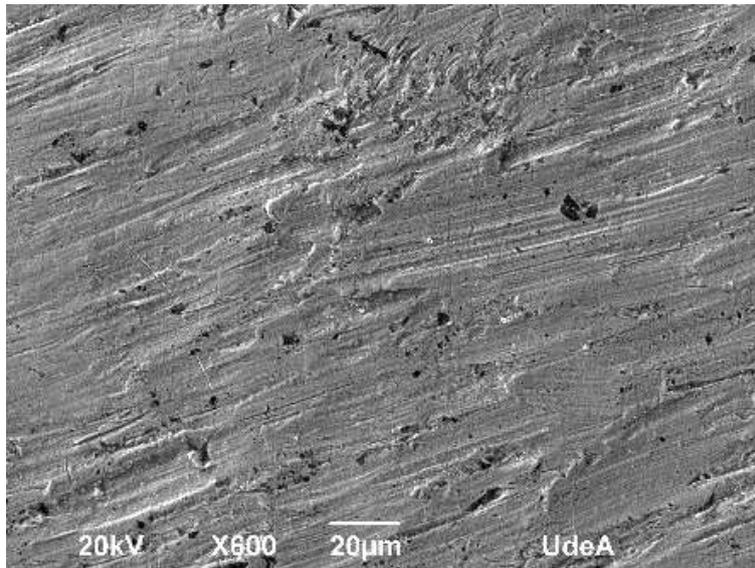


c

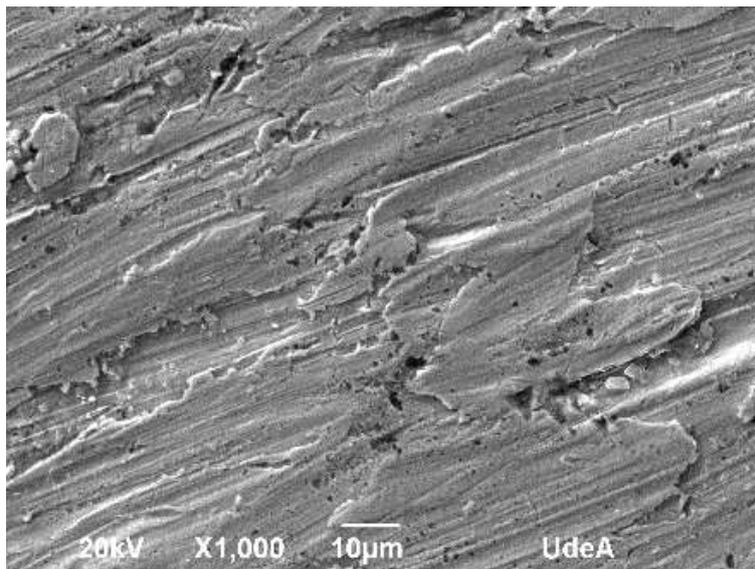
**Figura 56.** Desgaste producido en el bronce debida a erosión en medio básico (pH=10) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.



a



b



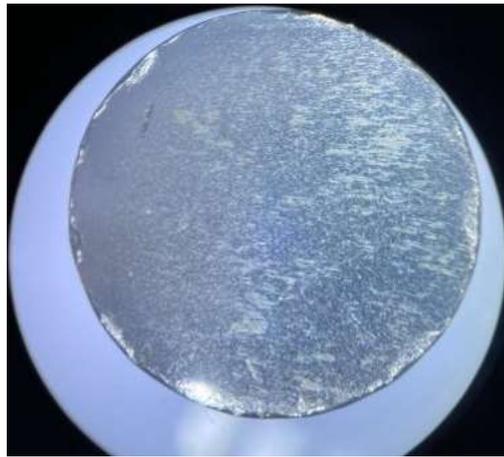
c

**Figura 57.** Desgaste producido en el bronce debido a erosión en medio ácido (pH=4) a) Estereoscopio, b) SEM zona 1 a 600X, c) SEM zona 2 a 1000X.

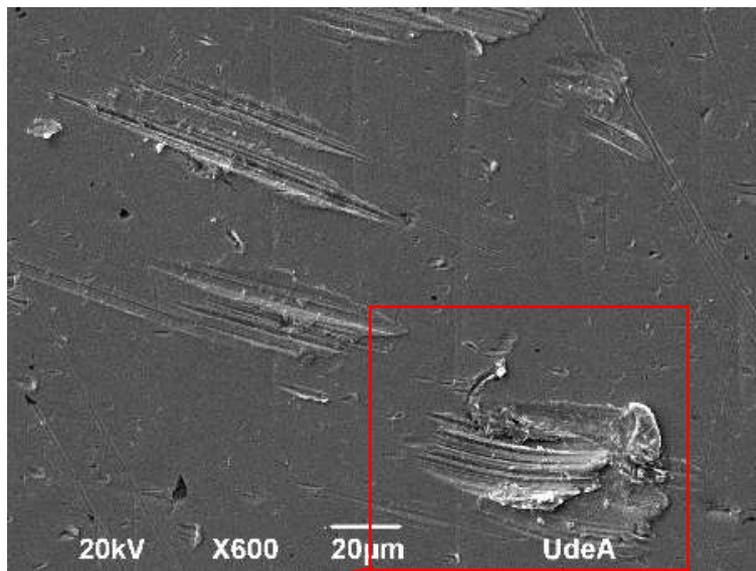
Adicionalmente, se encuentran la **Figura 56** y la **Figura 57**, que corresponden a las muestras de bronce donde se puede identificar la orientación del desgaste debida a la erosión bajo las mismas condiciones de ensayo. Se trataron de respetar todos los parámetros de los ensayos en búsqueda de una buena reproducibilidad de los mismos, esto, para realizar comparaciones acordes a lo planteado inicialmente. En la **Figura 56a** y la **Figura 57a** se observan imágenes tomadas con un estereoscopio para denotar las dos zonas representativas. La **Figura 56b** y la **Figura 57b** corresponden a la zona 1, donde podemos encontrar una imagen SEM a 600x que evidencia de igual manera que con el acero una orientación en la deformación de la superficie producida por los sedimentos y da lugar al desgaste de esta, en este caso de manera visual parece ser más acentuado sobre la muestra expuesta a un medio ácido. Lo anterior se contrasta con valores obtenidos de MDE de 13,7% y rugosidad promedio de 0,281  $\mu\text{m}$  en el medio básico, respecto a un MDE de 7,8% y rugosidad promedio de 0,292  $\mu\text{m}$  en el medio ácido, evidenciando que en medio ácido se presenta una menor pérdida de material, pero a su vez la rugosidad promedio es mayor que en medio básico caso contrario a lo ocurrido con el acero, lo que demuestra que además del soporte visual es importante apoyarse de todos los datos experimentales obtenidos para realizar el análisis. Finalmente, en la **Figura 56c** y la **Figura 57c** encontramos imágenes SEM a 1000x y se observa un detalle diferenciador respecto a las de acero inoxidable y es que, aunque conservan el formato del desgaste orientado, aparecen regiones que geométricamente son similares a escamas, lo cual puede ser gracias a que el bronce es más dúctil y está relacionado con las imágenes tomadas con estereoscopio donde se observan escalas en la zona 2. Según lo reportado por Javaheri V. et al [43], en este caso la morfología de las marcas de erosión presentadas en las muestras de bronce se asemeja más a condiciones de alto ángulo de impacto y baja velocidad de las partículas, donde la deformación plástica de crestas y la posterior fractura y eliminación de labios vulnerables es el mecanismo predominante como se ilustra en la **Figura 9**.

En la **Figura 58** se observan imágenes superficiales de una de las muestras de acero sometida a ensayos de cavitación en medio básico (pH=10).

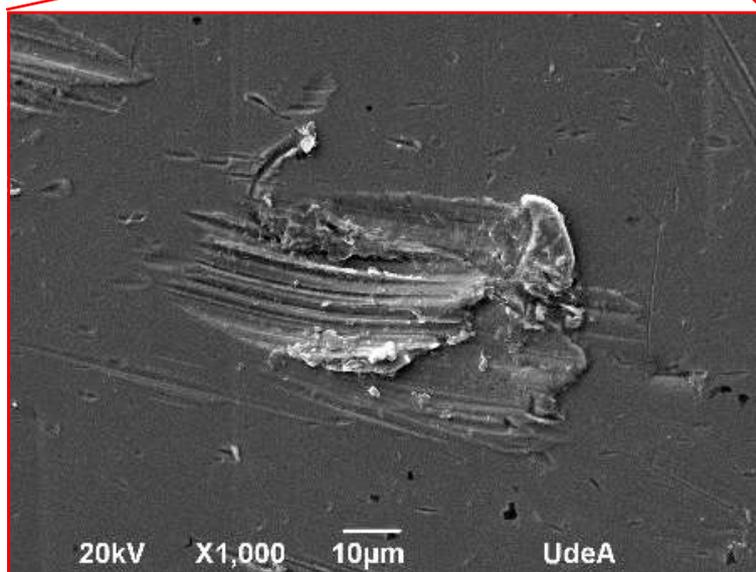
En la **Figura 59** se muestra el estado final de una de las muestras de acero sometidas a ensayos de cavitación en medio ácido (pH=4).



a

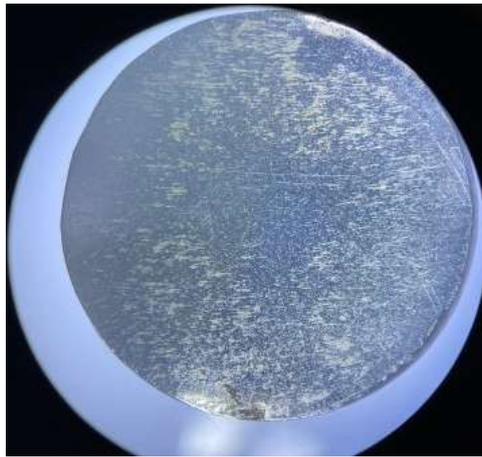


b

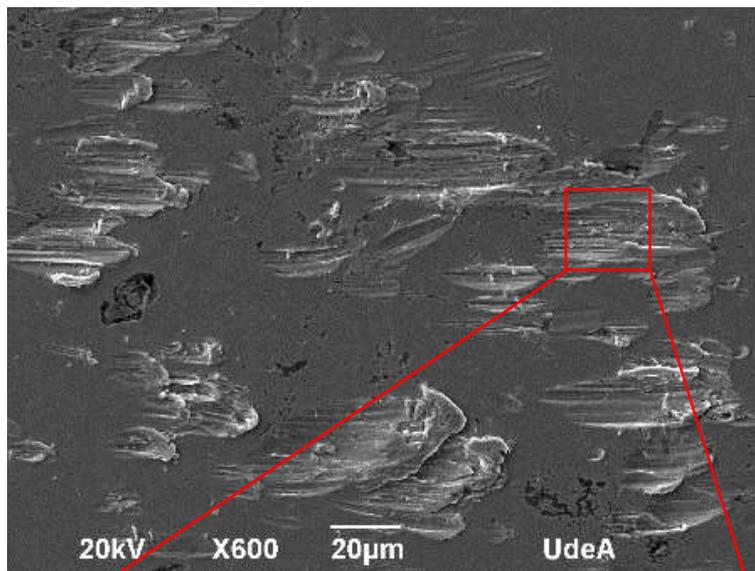


c

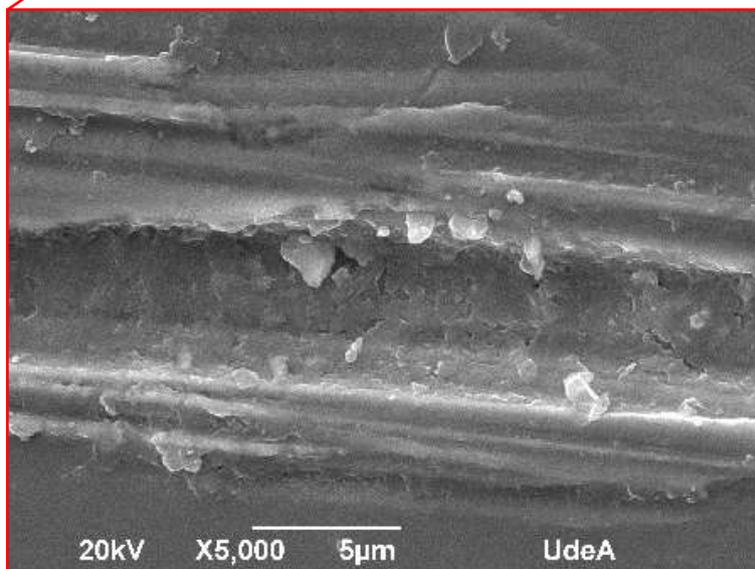
**Figura 58.** Desgaste producido en el acero inoxidable debido a cavitación en medio básico (pH=10). a) Estereoscopio, b) SEM a 600X, c) SEM a 1000X.



a



b



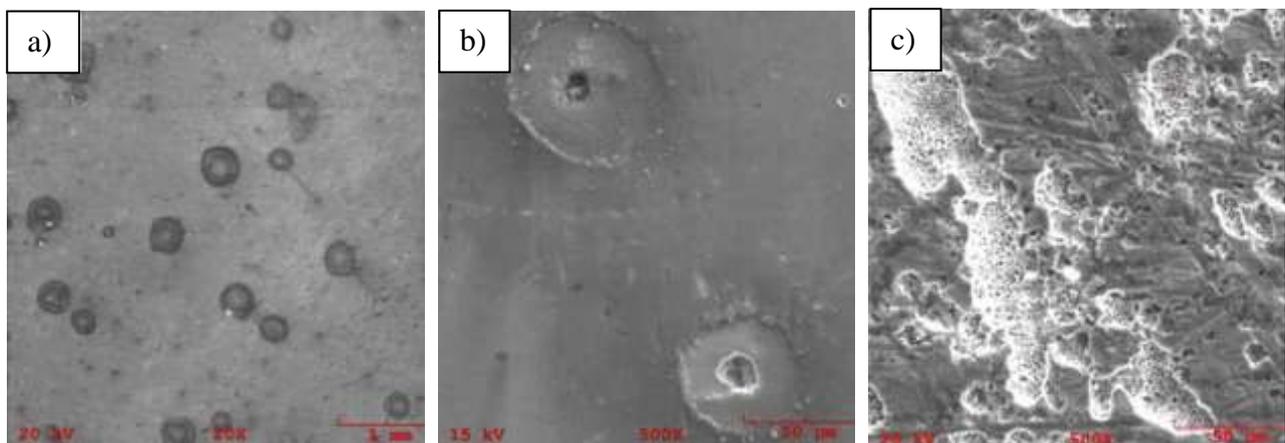
c

**Figura 59.** Desgaste producido en el acero inoxidable debida a cavitación en medio ácido (pH=4).

a) Estereoscopio, b) SEM a 600X, c) SEM a 5000X.

Como resultado de los ensayos de cavitación, en la **Figura 58** y la **Figura 59** visualmente se puede identificar el daño producido sobre la superficie de una de las muestras de acero inoxidable expuestas. Las condiciones de estos fueron las mismas de los ensayos de erosión a excepción de la ausencia de sedimentos y la habilitación de inductores de cavitación para tal propósito.

En la **Figura 58a** y la **Figura 59a** podemos ver imágenes tomadas con estereoscopio de la muestra y se observan algunas marcas direccionadas en el sentido del flujo. De igual forma se tomaron imágenes SEM como las presentadas en la **Figura 58b** y **Figura 59b** a 600x, donde se identifican algunas marcas que a primera vista no corresponden al formato conocido para la cavitación como lo encontrado en la literatura, por investigaciones realizadas por autores como Bazanini y Bressan [67], quienes sometieron muestras de aluminio puro y latón a ensayos de cavitación en un RDA durante 15 horas, de igual manera que muestras de acero 1020 y aluminio durante 5 horas a 3600 y 4400 RPM. Los investigadores encontraron evidencia de cavitación gracias al colapso de burbujas en la superficie del material con la forma característica de dos agujeros circulares concéntricos donde el agujero central es profundo como en el caso del Aluminio y el Acero sometidos a ensayos de 5 horas (**Figura 60a** y **Figura 60b**) respectivamente, como también encontraron daño atribuido a fenómenos de cavitación con agujeros irregulares en el latón sometido a ensayos de 15 horas (**Figura 60c**), esto atribuido a su larga exposición donde se alcanzan a unir varios pozos o agujeros, estos orificios son los que desencadenan la pérdida de material.



**Figura 60.** Imágenes SEM de cráter superficial causado por cavitación en RDA de a) Aluminio después 5 h a 20X, b) Acero 1020 después de 5 h a 500X, c) Latón después 15 h a 500X [67].

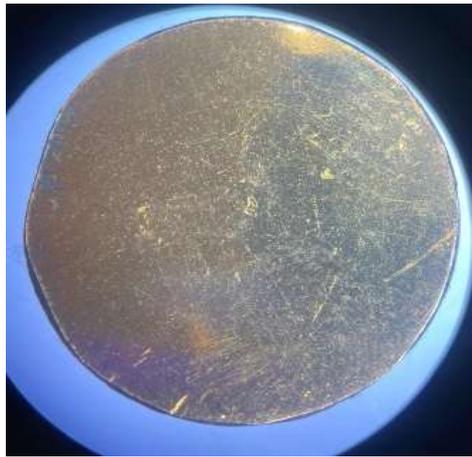
En la **Figura 58c** y la **Figura 59c** se muestran imágenes tomadas a 1000x y 5000x respectivamente, en estas marcas se identifica una similitud a las presentadas en los ensayos de erosión por lo cual se puede intuir que la recámara podría estar contaminada con algunas partículas que produjeron daño

por erosión sobre la superficie o que el agua produjo este tipo de desgaste a las RPM en las que se configuró el ensayo. Según lo reportado por Javaheri V. et al, la morfología de las marcas presentadas en estas muestras es similar a la morfología de las marcas de erosión descritas con anterioridad, pero en este caso no cubren la superficie de la muestra de manera uniforme, donde el arado sería el mecanismo predominante presionando el metal hacia los costados y al frente para formar surcos [43].

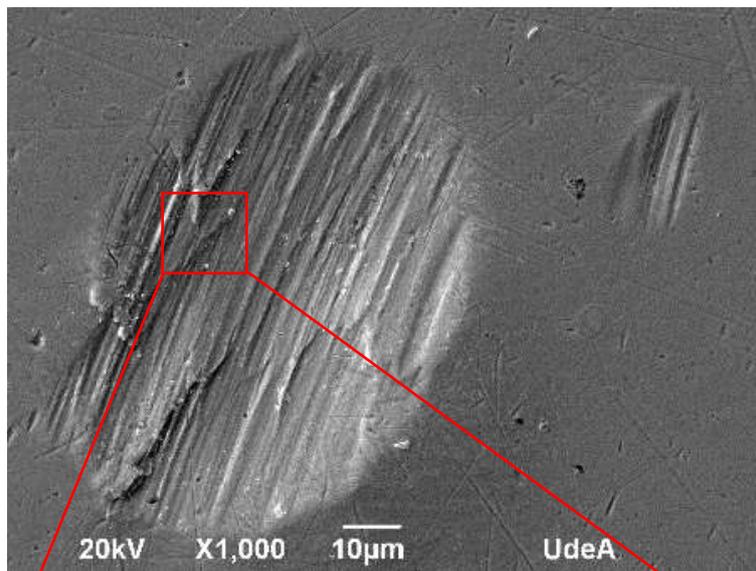
En la **Figura 61** se muestra el estado final de una de las réplicas para el bronce al ser sometida a ensayos de cavitación en medio básico (pH=10).

En la **Figura 62** se observan las imágenes superficiales de una de las muestras de bronce sometidas a ensayos de cavitación en medio ácido (pH=4).

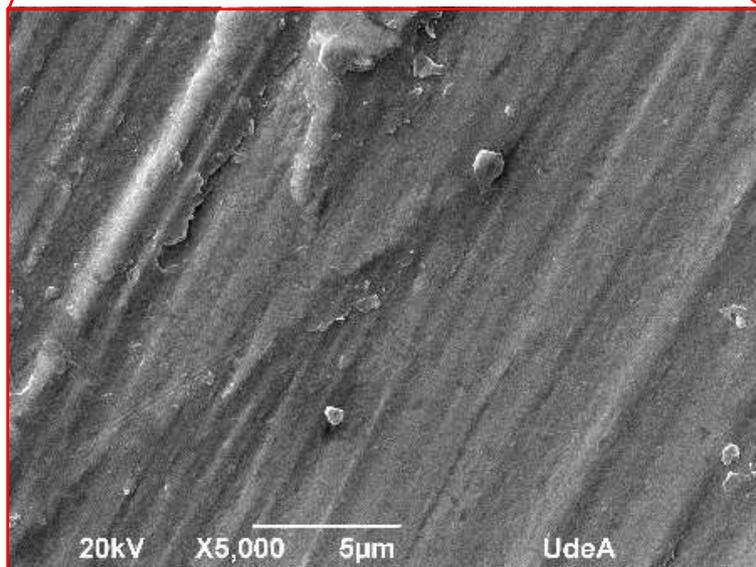
Por otro lado, la **Figura 61** y la **Figura 62** que corresponde al bronce, visualmente evidencian menos daño producido durante los ensayos de cavitación. En la **Figura 61a** y la **Figura 62a** podemos observar algunas marcas similares a rayas pero que aparentemente no tienen un patrón tan definido y mucho menos orientación. En la **Figura 61b** y la **Figura 62b** se presentan imágenes SEM a 1000x y a 2500x respectivamente con el propósito de lograr identificar la naturaleza de las marcas encontradas donde podemos decir que estas no son las marcas características que presentan superficies afectadas por cavitación en *RDA*, aunque la **Figura 62b** evidencie arranque de material en la superficie en forma circular es muy irregular para establecer que sea provocada por cavitación. Finalmente tenemos imágenes SEM a 5000x y a 10000x para la **Figura 61c** y la **Figura 62c** respectivamente, donde se muestran los defectos a mayores aumentos para descartar que lo observado sea debido a efectos de cavitación como naturalmente se esperaba. De igual forma la morfología de las marcas presentadas en la muestra sometida a pH=10 es similar a la morfología de las marcas de erosión descritas en la sección dedicada a erosión [43], mientras que la muestra sometida a pH=4 solo presentó marcas como las presentadas en la **Figura 62b** y la **Figura 62c** que no corresponde a las morfologías características reportadas en *RDA* y tampoco a las reportadas por otros investigadores como Karimi [50] en los otros tipos de ensayos de cavitación encontrados.



a

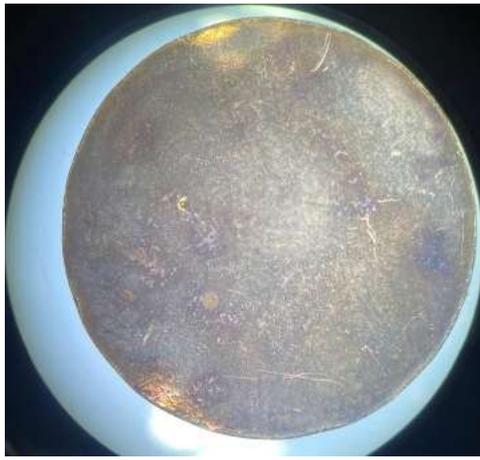


b

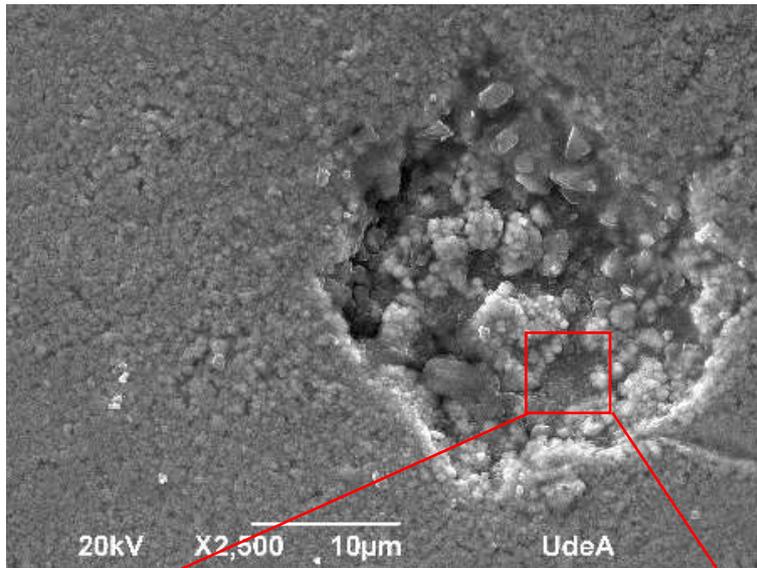


c

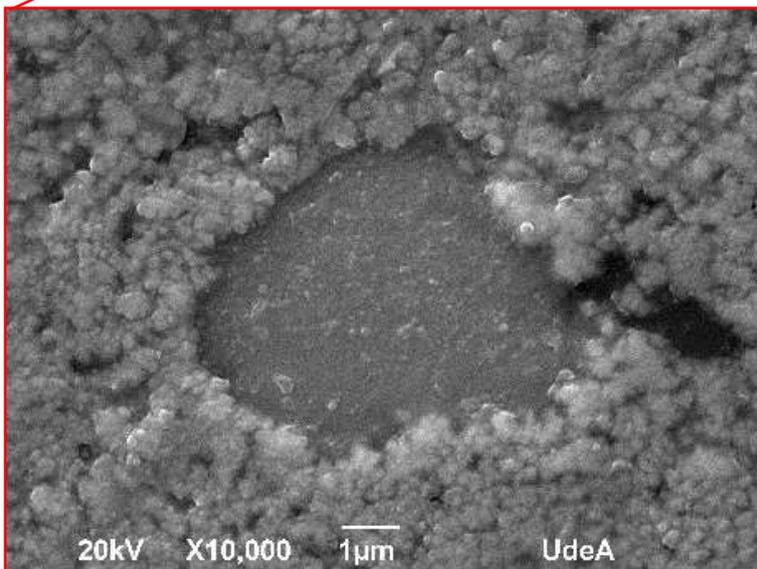
**Figura 61.** Desgaste producido en el bronce debida a cavitación en medio básico (pH=10). a) Estereoscopio, b) SEM a 1000X, c) SEM a 5000X.



a



b

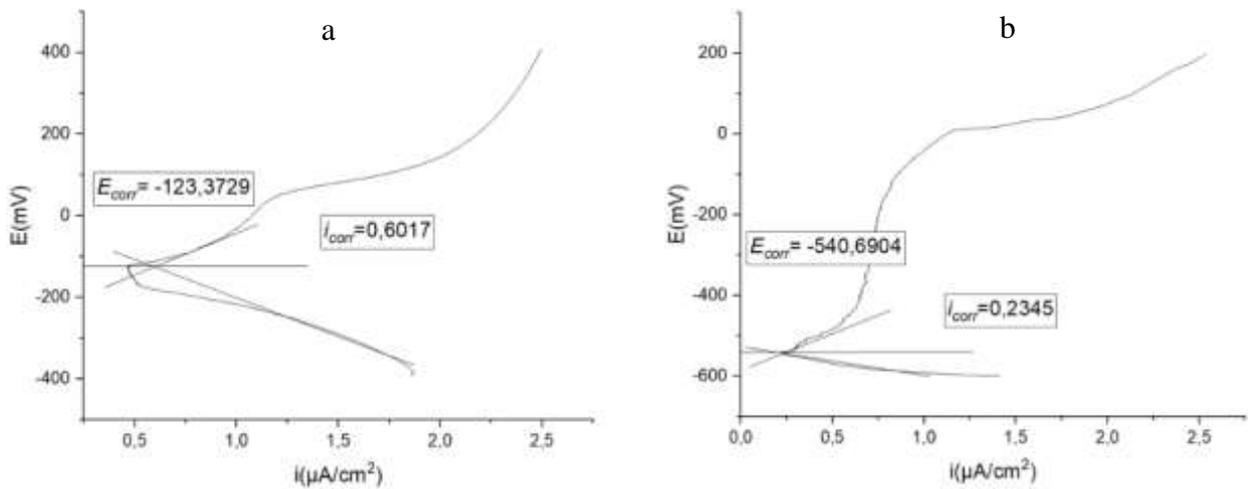


c

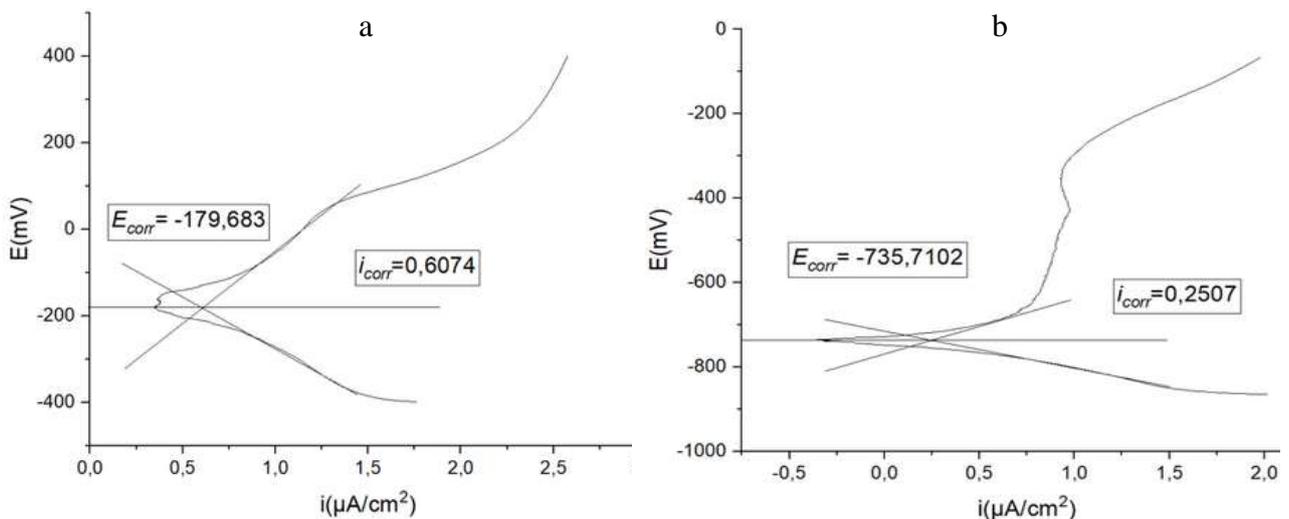
**Figura 62.** Desgaste producido en el bronce debida a cavitación en medio ácido (pH=4). a) Estereoscopio, b) SEM a 2500X, c) SEM a 10000X.

### 5.1.5 Ensayos de Corrosión

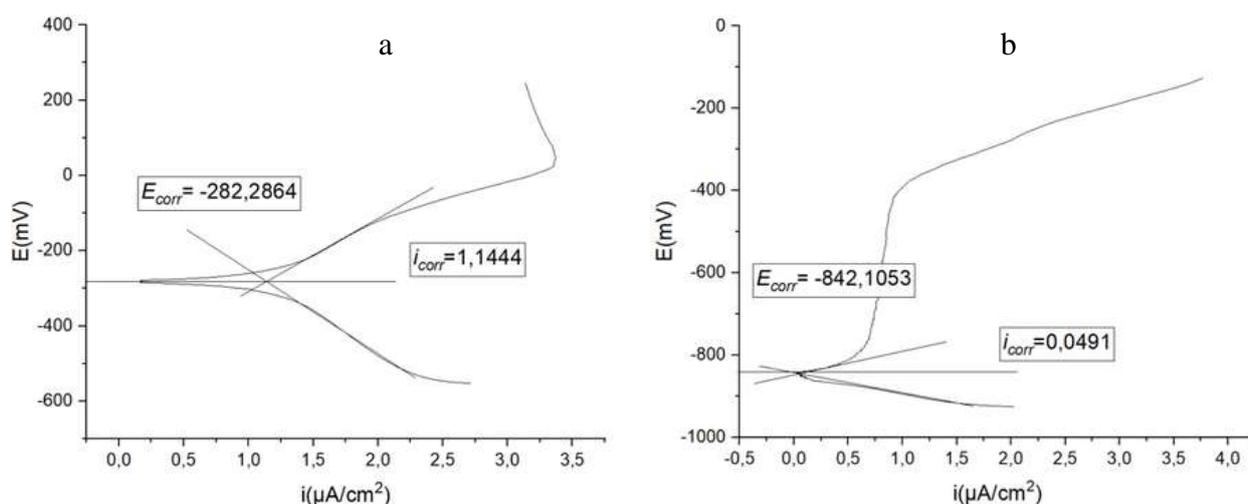
Para determinar la velocidad de corrosión como ya se ha descrito, es necesario obtener la corriente de corrosión y esta se adquiere mediante la extrapolación de Tafel, la cual usa el potencial de corrosión referido al intercepto de la curva catódica y anódica que conforman la gráfica potenciodinámica y la porción lineal de la curva catódica. El intercepto entre potencial de corrosión y las porciones rectas permite entonces conocer el valor de la corriente de corrosión. Como en las gráficas el valor que se usa es el logaritmo de la densidad de corriente, para obtener el valor real se eleva la base, que para el caso común es 10, al valor de densidad obtenido en la lectura de las gráficas. En la **Figura 63** se pueden observar las curvas de polarización potenciodinámicas del acero inoxidable y el bronce en medio básico, mientras en la **Figura 64** y la figura 65 se encuentran las curvas en medio ácido y en la solución al 3,5% de NaCl respectivamente.



**Figura 63.** Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en medio básico (pH=10).



**Figura 64.** Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en medio ácido (pH=4).



**Figura 65.** Curvas de polarización potenciodinámica para a) bronce UNS 52400 refinado, b) acero UNS 42000 en solución de NaCl al 3,5%.

La **Tabla 19** denota los valores de corriente de corrosión determinados a partir de las curvas potenciodinámicas de cada material en función de las condiciones ambientales que se trabajan.

**Tabla 19.** Corriente de corrosión.

Corriente de corrosión	Material	3,5% NaCl	pH=4	pH=10
[A/cm <sup>2</sup> ]	Bronce	1,3944E+01	4,0495E+00	3,9967E+00
	Acero	1,1197E+00	1,7811E+00	1,7159E+00

Para determinar la velocidad de corrosión se puede utilizar tanto la Ecuación 1 en términos de velocidad de penetración o la Ecuación 2 en términos de la pérdida de masa. Es considerable destacar que el peso equivalente que se emplea en ambas ecuaciones depende del número de valencia del elemento involucrado. Este número a su vez depende de las condiciones ambientales a las que se someta ya que, como se evidencia en los diagramas de Pourbaix [49], los productos de la reacción de óxido-reducción dependen tanto del pH cómo del voltaje utilizado, por lo que la valencia entorno a la formación de esos productos de corrosión es diferente. En consecuencia, se debe tener presente las condiciones del entorno para poder hacer un cálculo acertado del valor de peso equivalente y así determinar con mayor certeza la velocidad de corrosión.

En la **Tabla 2** observamos los valores de las constantes que se requieren para hacer uso las dos ecuaciones y los valores de pesos equivalentes en relación con el pH del medio y el material en

cuestión y en la **Tabla 20** presenta los resultados de la velocidad de penetración de la capa corrosiva en mm/años calculados a partir de la Ecuación 1.

**Tabla 20.** Velocidad de penetración.

Velocidad de penetración [mm/año]	Material	3,5% NaCl	pH=4	pH=10
	Bronce	0,30836	0,04953	0,08838
	Acero	0,00872	0,01950	0,01336

La **Tabla 21** contiene los resultados de la velocidad de corrosión en  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ , obtenidos mediante la Ecuación 2.

**Tabla 21.** Velocidad de corrosión.

Velocidad de corrosión [ $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$ ]	Material	3,5% NaCl	pH=4	pH=10
	Bronce	7,12191	1,14397	2,04125
	Acero	0,18498	0,41370	0,28347

La **Tabla 20** y la **Tabla 21** contienen valores que en conjunto presentan una estimación del comportamiento de cada material frente a los diferentes ambientes corrosivos trabajados en función del tiempo. El bronce posee un comportamiento diferente para cada condición. Bajo pH ácido las aleaciones de cobre poseen un buen rendimiento mientras que el ácido que se utilice no sea oxidante como los ácidos, acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ), sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), clorhídrico ( $\text{HCl}$ ) y fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), y además la concentración de agentes oxidantes como iones disueltos de oxígeno e iones férricos ( $\text{Fe}_3^+$ ) debe ser baja. Se debe tener en cuenta que cuando una solución contenga uno de estos ácidos es agitada o se le hace pasar una corriente de aire saturado [114] o cercano al punto de saturación, se convierte en un medio no adecuado para la presencia de una aleación de cobre.

Las tasas de corrosión cuando la acción corrosiva es debida a un ácido no oxidante diluido (hasta 1% de ácido) sobre el cobre es relativamente baja y expresadas en términos de velocidad de corrosión se encuentran generalmente entre 0,5- 6  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$  y una velocidad de penetración de 0.02-0.25 mm/año [100]. Para ácidos no oxidantes con presencia de aire saturado la corrosión será mayor y su velocidad de penetración y velocidad de corrosión se encuentra en rangos de 5- 30  $\text{g/m}^2\cdot\text{día}$  y una velocidad de penetración de 0.2-1.25 mm/año. Cuando se utiliza un ácido oxidante las aleaciones de cobre se

corroen rápidamente a velocidades superiores a  $50 \text{ g/m}^2 \cdot \text{día}$  y una velocidad de penetración de  $2.1 \text{ mm/año}$ . Entonces, según los resultados de la **Tabla 20** y la **Tabla 21** la velocidad de corrosión y la velocidad de penetración se ubican en los intervalos correspondientes a un ácido no oxidante de baja concentración y sin presencia de aire saturado en el mismo. Por lo tanto, estos resultados indican que la velocidad de corrosión y la velocidad de penetración son bajas en el medio ácido utilizado para realizar los ensayos potenciodinámicos.

Las aleaciones de cobre poseen resistencia a las soluciones alcalinas, con excepción a las que contienen hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) o iones cianuro ( $\text{CN}^-$ ), ya que el hidróxido genera cationes al reaccionar con el cobre y los iones producen aniones complejos solubles [100]. Para algunas aleaciones de cobre como las base zinc, las tasas de corrosión son de  $0.05\text{-}0.5 \text{ mm/año}$  bajo condiciones de temperatura ambiente. Las aleaciones cobre-estaño poseen una velocidad de corrosión inferior a  $0.25 \text{ mm/año}$  en una solución de  $\text{NaOH}$  a temperatura ambiente y no se ven afectadas por la aireación en la misma [100]. Con lo anterior se evidencia que bajo pH básico el bronce posee menor resistencia a la corrosión que bajo pH ácido. En la **Tabla 20** se tiene un valor para la velocidad de penetración para el bronce en un medio con  $\text{pH}=10$  de  $0,088 \text{ mm/año}$  el cual es inferior al valor de referencia en la solución al  $3,5 \%$  de  $\text{NaCl}$ , y a su vez es superior al valor determinado para condiciones con  $\text{pH}=4$ . Este comportamiento se debe a la disolución de los productos de corrosión del cobre liberados al medio, y a su vez esta liberación de productos se incrementa de forma lineal con la alcalinidad de la solución. En un rango de pH entre  $7.0$  y  $8.5$  Edwards M. et al. [115] determinaron que la alcalinidad es más crítica a  $\text{pH}=7$  ( $0,0116 \text{ mg}$  de cobre soluble) que a un  $\text{pH}=8$  ( $0,004 \text{ mg}$  de cobre soluble) siendo el cobre  $2,9$  veces más sensible a la presencia de alcalinidad en pH más bajos y que el producto de corrosión predominante es el hidróxido de cobre ( $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ) con valores de  $1,5 \text{ mg/L}$  de solubilidad a  $\text{pH}=7$  en concordancia con las predicciones realizadas, además mencionan que a un pH superior a este rango disminuye la posibilidad de observar el producto de corrosión predicho, aunque la tendencia observada en el trabajo experimental es que a mayor valor de pH menor será la disolución de los productos de corrosión y el material exhibe una menor pérdida de masa.

Bajo una solución de  $3,5\%$   $\text{NaCl}$  el bronce expone una velocidad de corrosión y penetración mayor que bajo los demás ambientes. Zeng, C. et al. [116] sometieron 3 muestras de bronce  $\text{Cu-10 Sn}$  a una solución acuosa con  $3.5\%$  en peso de  $\text{NaCl}$  y a temperatura ambiente bajo la disolución natural de oxígeno. De las 3 muestras investigadas, una fue *as-cast*, y las otras dos fueron recocidas en vacío a  $600^\circ\text{C}$  y  $800^\circ\text{C}$ . Los ensayos potenciodinámicos demostraron que la muestra *as-cast* poseía una superficie más activa y una mayor velocidad de corrosión que las otras dos muestras,  $0,612$

mg/cm<sup>2</sup>\*día, 0,469 mg/cm<sup>2</sup>\*día y 0,466 mg/cm<sup>2</sup>\*día respectivamente. Además, determinaron que la capa pasiva que se forma se compone principalmente de óxido de cobre (Cu<sub>2</sub>O). Bajo estas condiciones para el bronce, se presenta corrosión intergranular que se da a lo largo de los límites de grano en consecuencia del estado de mayor energía que se presenta en estas regiones comparadas con las partes restantes de la superficie. Esto sugiere que entre mayor cantidad de límites de grano exista, es decir entre menor sea el tamaño de grano, mayor será la velocidad de corrosión provocando también que la capa pasiva sea menos protectora. A parte también se puede presentar corrosión galvánica debido a la presencia de dos fases distintas en un medio corrosivo, donde la fase más resistiva sirve como cátodo y promueve la corrosión de la otra fase [117]. En el bronce trabajado, se pueden presentar las fases  $\alpha$  y  $\delta$  de no realizarse un proceso de tratamiento térmico posterior, y se ha encontrado que la fase  $\delta$  presenta mejor resistencia a la corrosión en comparación con la fase  $\alpha$  [118], por lo cual la fase  $\delta$  puede funcionar como cátodo y conducir ataques de corrosión preferencial en la fase  $\alpha$  [116].

Por otro lado, en los aceros martensíticos las propiedades mecánicas son de mayor relevancia e interés que su resistencia a la corrosión, por lo que se han desarrollado otros tipos de acero inoxidable. Esto es consecuencia de la necesidad de limitar el contenido de cromo a cantidades relativamente bajas y de aumentar el contenido de carbono [119]. La resistencia de los aceros inoxidables frente a ambientes ácidos depende de la cantidad del ion hidrógeno (H<sup>+</sup>), la presencia de haluros y la capacidad oxidante del ácido. Para el ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) el acero puede resistir incluso a concentraciones altas, debido a que su gran capacidad de oxidación fomenta la formación de la capa pasiva en conjunto con el cromo presente en la aleación, a diferencia del ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) que no se presenta la facilidad para que se dé la formación de la capa pasiva o se mantenga en estos medios ácidos y requiere que el material posea una cantidad elevada de cromo para exhibir buena resistencia [120]. López et al. [121] estudiaron el comportamiento de erosión y corrosión para el acero UNS S42000 y el UNS S30400 bajo condiciones ácidas y salinas utilizando ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0.5M y 3.5% NaCl con partículas de cuarzo como material erosivo a diferentes ángulos y velocidades de impacto. Los investigadores determinaron que la degradación del acero UNS S30400 fue dada principalmente por la acción mecánica del material particulado que lo impactó, mostrando que en condiciones de corrosión-erosión con un ángulo de impacto de 30° la masa perdida alcanzó un valor máximo de ~17g/m<sup>2</sup>\*h y mínimo de ~14g/m<sup>2</sup>\*h a una velocidad de impacto de ~7ms<sup>-1</sup> y ~4,5ms<sup>-1</sup> respectivamente. Para un ángulo de impacto de 90° la pérdida de masa alcanzó un valor máximo de ~18g/m<sup>2</sup>\*h y mínimo de ~10g/m<sup>2</sup>\*h a una velocidad de impacto de ~7ms<sup>-1</sup> y ~8,5ms<sup>-1</sup> respectivamente. Para el acero UNS S42000 los investigadores encontraron que la degradación se provoca esencialmente por la acción química (corrosión), donde analizaron los valores

alcanzados de las densidades de corriente crítica y pasiva que evidenciaron que la condición más severa se encuentra a altas velocidades de impacto independientemente del ángulo de incidencia [121]. Sin embargo, el acero UNS S42000 presenta mejor resistencia a la corrosión que los grados superiores como el 425, 430 y 440A [119].

Cómo se presenta en la **Tabla 20** y la **Tabla 21** la velocidad de corrosión se favorece bajo pH ácido, en consecuencia, de la inestabilidad de la capa protectora que se genera en el acero bajo estas condiciones. Esta capa es producto de la oxidación de los elementos aleantes del acero principalmente del cromo, por lo que en mayor medida se encontrará óxido de cromo ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ), siendo una capa que protege el acero del proceso de corrosión por lo que su estabilidad dependerá en gran medida de la cantidad de cromo presente en la aleación [122]. Z. Wang et al. [123] determinaron que la resistencia a la corrosión del acero 316L disminuía con el aumento del pH en un medio con  $\text{H}_2\text{S}$  como ácido, debido a que a pH más ácidos la película formada obtuvo una menor cantidad de cromo y un mayor contenido de azufre. Encontraron que las densidades de corriente pasiva en el orden de  $10^{-5} \text{ A/cm}^2$  en ambientes libres de  $\text{H}_2\text{S}$  disminuyó con el aumento de pH indicando que el acero 316L es más resistente a la corrosión en condiciones de pH alto. En ambientes con presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  se presentaron pendientes de 1,05 V/década aproximadamente a pH=3 y pH=4 ligeramente más bajas que en presencia de  $\text{H}_2\text{S}$  1,32 V/década, lo que sugiere un aumento de la velocidad de corrosión respecto a valores de pH=5 y pH=6.

Bajo condiciones de pH básico todos los aceros inoxidable exhiben un buen comportamiento frente a la corrosión. Utilizando NaOH bajo cualquier concentración y a temperaturas superiores a  $65^\circ\text{C}$  se ha observado una buena resistencia, al igual que cuando se emplea amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) e hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) en temperaturas que superan su punto de ebullición [120]. Seethammaraju et al. [124] estudiaron la resistencia a la corrosión que presentan los aceros inoxidable 304 y 316 en ambientes de 1M NaCl, 1M HCl y 1M NaOH haciendo uso de la técnica de polarización potenciodinámica. Determinaron que el principal mecanismo que afecta a ambos metales es el de corrosión por picado, donde el acero inoxidable 304 presenta corrosión por picado y pasivación en el medio de NaCl 1M que se logran conectar posteriormente a través de corrosión intergranular bajo los ambientes salino y alcalino que son menos significativas en el acero inoxidable 316 y al ser sometidos estos mismos materiales en un medio ácido donde se forman hoyos alargados de mayor tamaño que se unen por medio de los límites de grano.

Los resultados mencionados anteriormente que fueron obtenidos por diferentes investigadores son acordes a los datos de velocidad de corrosión y velocidad de penetración presentados en las tablas experimentales para todos los medios empleados en el presente trabajo, donde se pudo observar que la velocidad de corrosión del acero inoxidable UNS S42000 sometido a un ambiente con pH=10 es

de  $0,28347 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$ , más baja que para el material sometido a un ambiente con  $\text{pH}=4$  con un valor de  $0,41370 \text{ g/m}^2\cdot\text{día}$  como lo mencionado por Z. Wang et al. [123].

Los aceros inoxidable exhiben alta resistencia frente a gran parte de las sales sin haluros neutrales o alcalinos. Las sales halogenadas generan un medio más corrosivo en consecuencia de la capacidad de los iones de haluro para penetrar la capa de óxido protectora y causar picadura en el material. Estas picaduras son promovidas por ambientes que contengan soluciones oxidantes aireadas o ligeramente ácidas [120]. Los aceros inoxidable martensíticos presentan resistencia suficiente ante las soluciones de cloro para periodos de exposición cortos durante su uso, siendo requerido eliminar los restos de la solución una vez termine su aplicación bajo este ambiente. En general no son adecuados para su uso cuando deben estar sumergidos de forma continua en medios salinos que fluyen lentamente pero bajo velocidades de flujo alto donde se presenta la erosión y erosión-corrosión se han obtenido resultados de buen rendimiento [119]. En los resultados de la **Tabla 20** y la **Tabla 21** es notable que bajo un medio salino halogenado (NaCl) el acero inoxidable martensítico presenta un mejor comportamiento que en los demás medios, tal como se mencionó anteriormente con los resultados obtenidos en el trabajo de Seethammaraju et al. [124].

## 6 CONCLUSIONES

- Se identificaron los parámetros más importantes para establecer las condiciones de procesamiento de los álabes de turbina tipo Darrieus, como son los parámetros de simulación de fundición y los parámetros de prototipado 3D, dentro de los que se destacan la temperatura y tiempo de vaciado, la velocidad, la temperatura y la resolución de impresión 3D, y adicionalmente, el material, la temperatura del molde y el tratamiento térmico de sinterizado y eliminación de PLA.
- Se obtuvo que tanto para el acero inoxidable UNS S42000 como para el bronce UNS C52000 refinado con Zr, los ensayos de erosión causaron un mayor desgaste en comparación con los ensayos de cavitación realizados tanto a  $\text{pH}=4$  como a  $\text{pH}=10$ . Además, se identificó que el  $\text{pH}$  del medio es un factor especialmente influyente, pues tanto en erosión como en cavitación a un  $\text{pH}=4$  el acero presenta la mayor pérdida de masa alcanzando 13,20% y 0,10% respectivamente, mientras que a  $\text{pH}=10$  el bronce presenta la mayor pérdida de masa alcanzando 16,9% y 0,04% respectivamente. Esto posiblemente debido a la fragilización por hidrógeno en el caso del acero en un ambiente ácido y por la inestabilidad de la capa pasiva en el caso del bronce que permite desprendimiento de material en un ambiente básico.

- Los ensayos evidenciaron que la velocidad de corrosión para el bronce fue mayor que para el acero, en concordancia con los ensayos de erosión y cavitación, a un pH=10 en los ensayos de corrosión el bronce presenta mayor velocidad de corrosión y de penetración alcanzando un valor de 2,04 g/m<sup>2</sup>\*día mientras que para el acero fue de 0,28 g/m<sup>2</sup>\*día. A un pH=4 el acero no presentó el mismo comportamiento alcanzando un valor de 0,41 g/m<sup>2</sup>\*día mientras que para el bronce fue de 1,14 g/m<sup>2</sup>\*día. Con esto se confirma que bajo estas condiciones experimentales, la corrosión está íntimamente ligada a los fenómenos dinámicos de erosión y cavitación, debido a que estos fenómenos están influenciados por diferentes condiciones.
- Los resultados obtenidos evidencian que el acero inoxidable UNS S42000 a pH=10 y el bronce UNS C52400 a pH=4 presentan un mejor comportamiento ante los fenómenos de erosión, cavitación y corrosión de acuerdo con la metodología empleada, presentando a nivel general valores promedio de MDE y velocidad de corrosión más bajos que los mostrados para las demás condiciones. Por esta razón, se determina que según las características de pH del recurso hídrico donde se instale la turbina, se debe elegir el material adecuado para la fabricación de álabes tipo Darrieus.

## 7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] H. Dubrovsky, G. Nadal, N. Di Sbroiavacca, and R. Contreras, “Rol y perspectivas del gas natural en la transformación energética de América Latina CEPAL,” 2019.
- [2] D. M. L. Ochoa, “Estudo Do Desgaste Erosivo-Corrosivo De Aços Estudo Do Desgaste Erosivo-Corrosivo De Aços,” Univeridade de Sao Paulo, 2007.
- [3] R. H. Richman and W. P. McNaughton, “Correlation of cavitation erosion behavior with mechanical properties of metals,” *Wear*, vol. 140, no. 1, pp. 63–82, 1990, doi: 10.1016/0043-1648(90)90122-Q.
- [4] D. L. F. Gaden and E. L. Bibeau, “A numerical investigation into the effect of diffusers on the performance of hydro kinetic turbines using a validated momentum source turbine model,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1152–1158, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.11.023.
- [5] J. Gómez Gómez, E. Palacio Higueta, and C. Paredes Guitierrez, “La turbina michell-banki y su presencia en colombia,” *Av. en Recur. Hidráulicos*, no. 17, pp. 33–42, 2009.
- [6] R. Singh, S. K. Tiwari, and S. K. Mishra, “Cavitation erosion in hydraulic turbine components and mitigation by coatings: Current status and future needs,” *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 21, no. 7, pp. 1539–1551, 2012, doi: 10.1007/s11665-011-0051-9.

- [7] C. P. Ossa, “Caracterização de revestimentos de hidroxiapatita depositados por aspersão a plasma sobre aços inoxidáveis austeníticos com alto teor de nitrogênio,” Universidade de São Paulo, 2005.
- [8] A. P. Tschiptschin, “Powder Metallurgy Aspects of High Nitrogen Stainless Steels in High Nitrogen Steels and Stainless Steels: Manufacturing, Properties and Applications,” in *ASM International*, K. . R. ed. Mudali and B. A. International, Eds. 2004, p. 266.
- [9] D. H. Mesa, A. Toro, A. Sinatora, and A. P. Tschiptschin, “The effect of testing temperature on corrosion - erosion resistance of martensitic stainless steels,” *Wear*, vol. 255, no. 1–6, pp. 139–145, 2003, doi: 10.1016/S0043-1648(03)00096-6.
- [10] H. J. Vermaak, K. Kusakana, and S. P. Koko, “Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 29, pp. 625–633, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.08.066.
- [11] J. Zanette, D. Imbault, and A. Tourabi, “A design methodology for cross flow water turbines,” *Renew. Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 997–1009, 2010, doi: 10.1016/j.renene.2009.09.014.
- [12] V. B. Miller, E. W. Ramde, R. T. Gradoville, and L. A. Schaefer, “Hydrokinetic power for energy access in rural Ghana,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 671–675, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.08.014.
- [13] M. J. Khan, M. T. Iqbal, and J. E. Quaiocoe, “River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 8, pp. 2177–2193, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.04.016.
- [14] N. United, “Delivering on Energy An overview of activities by UN-Energy and its members,” 2010. [Online]. Available: [http://www.unido.org/fileadmin/user\\_media/Services/Energy\\_and\\_Climate\\_Change/EPP/Publications/UN-Energy - Delivering on Energy - final.pdf](http://www.unido.org/fileadmin/user_media/Services/Energy_and_Climate_Change/EPP/Publications/UN-Energy - Delivering on Energy - final.pdf).
- [15] E. Chica, E. A. Torres, and J. Arbeláez, “Manufacture and experimental evaluation of a hydrokinetic turbine for remote communities in Colombia,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, vol. 1, no. 16, pp. 82–87, 2018, doi: 10.24084/repqj16.217.
- [16] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, and V. H. Krishna, “A review on small scale wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1351–1371, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.027.
- [17] W. Tjiu, T. Marnoto, S. Mat, M. H. Ruslan, and K. Sopian, “Darrieus vertical axis wind turbine for power generation I: Assessment of Darrieus VAWT configurations,” *Renew. Energy*, vol. 75, pp. 50–67, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.09.038.
- [18] A. H. S. Ltd, “Soluciones Alternativas Hydro Ltda.,” 2019. <https://althydrosolutions.com/theoryEsp.html>.

- [19] D. Andrews, *Renewable Electricity and the Grid: The Challenge of Variability*, vol. 9781849772. Earthscan Publications Ltd., 2012.
- [20] S. ed-Dîn Fertahi *et al.*, “CFD performance enhancement of a low cut-in speed current Vertical Tidal Turbine through the nested hybridization of Savonius and Darrieus,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 169, no. May, pp. 266–278, 2018, doi: 10.1016/j.enconman.2018.05.027.
- [21] A. Bianchini, F. Balduzzi, P. Bachant, G. Ferrara, and L. Ferrari, “Effectiveness of two-dimensional CFD simulations for Darrieus VAWTs: a combined numerical and experimental assessment,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 136, pp. 318–328, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.026.
- [22] R. W. Thresher and D. M. Dodge, “Trends in the evolution of wind turbine generator configurations and systems,” *Wind Energy An Int. J. Prog. Appl. Wind Power Convers. Technol.*, vol. 1, no. S1, pp. 70–86, 1998.
- [23] P. Gipe, “The wind industry’s experience with aesthetic criticism,” *Leonardo*, vol. 26, no. 3, pp. 243–248, 1993.
- [24] D. E. Chamberlain, M. R. Rehfish, A. D. Fox, M. Desholm, and S. J. Anthony, “The effect of avoidance rates on bird mortality predictions made by wind turbine collision risk models,” *Ibis (Lond. 1859)*, vol. 148, pp. 198–202, 2006.
- [25] M. S. Güney and K. Kaygusuz, “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 9, pp. 2996–3004, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.06.016.
- [26] P. S. Premkumar *et al.*, “Uncertainty and Risk Assessment in the Design Process for Wind,” *J. Adv. Res. Dyn. Control Syst.*, vol. 9, no. February, 2015, doi: 10.3390/en5093425.
- [27] Verdantpower, “The RITE Project: East River, New York City,” 2019. <https://www.verdantpower.com/>.
- [28] Verdantpower, “The CORE Project: St. Lawrence River–Cornwall, ON,” 2019. <https://www.verdantpower.com/>.
- [29] M. Islam, D. S. K. Ting, and A. Fartaj, “Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 4, pp. 1087–1109, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2006.10.023.
- [30] D. GJM, “Turbine having its rotating shaft traverse to the flow of the current,” 1931.
- [31] B. K. Kirke, “Evaluation of self-starting vertical axis wind turbines for stand-alone applications.” Griffith University Australia, 1998.
- [32] B. K. Kirke and L. Lazauskas, “Limitations of fixed pitch Darrieus hydrokinetic turbines and the challenge of variable pitch,” *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 893–897, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.08.027.

- [33] B. F. Blackwell and G. E. Reis, “Geometrical aspects of the troposkien as applied to the darrieus vertical-axis wind turbine,” 1975.
- [34] SNL, “SNL Energy,” 2020. <http://www.snl.com/marketing/microsite/EnergyCommodities/index.html>.
- [35] S. Chitrakar, H. P. Neopane, and O. G. Dahlhaug, “Study of the simultaneous effects of secondary flow and sediment erosion in Francis turbines,” *Renew. Energy*, vol. 97, pp. 881–891, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2016.06.007.
- [36] A. Usma, “Comportamiento de diversos materiales usados en la fabricación de álabes de turbinas hidrocinéticas ante los efectos combinados de erosión/corrosión/cavitación bajo diferentes condiciones hidráulicas,” Universidad de Antioquia, 2019.
- [37] M. K. Padhy and R. P. Saini, “A review on silt erosion in hydro turbines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 12, no. 7, pp. 1974–1987, 2008, doi: 10.1016/j.rser.2007.01.025.
- [38] H. P. Neopane, “Sediment erosion in hydro turbines,” 2010.
- [39] A. Kjølle, *Hydropower in Norway*, no. December. 2001.
- [40] I. Finnie, “Some reflections on the past and future of erosion,” *Wear*, vol. 186–187, no. PART 1, pp. 1–10, 1995, doi: 10.1016/0043-1648(95)07188-1.
- [41] I. M. Hutchings, “A model for the erosion of metals by spherical particles at normal incidence.,” , vol. 70, no. 3, Aug. 15, 1981, pp. 269–281, 1981, doi: 10.1016/0043-1648(81)90347-1.
- [42] G. W. Stachowiak and A. W. Batchelor, *Engineering tribology*. 2006.
- [43] V. Javaheri, D. Porter, and V. T. Kuokkala, “Slurry erosion of steel – Review of tests, mechanisms and materials,” *Wear*, vol. 408–409, no. May, pp. 248–273, 2018, doi: 10.1016/j.wear.2018.05.010.
- [44] I. Finne, “Erosion of surfaces,” *Wear*, vol. 3, pp. 87–103, 1960, doi: 10.1016/0043-1648(60)90055-7.
- [45] M. A. Islam and Z. N. Farhat, “Effect of impact angle and velocity on erosion of API X42 pipeline steel under high abrasive feed rate,” *Wear*, vol. 311, no. 1–2, pp. 180–190, 2014, doi: 10.1016/j.wear.2014.01.005.
- [46] P. A. S. F. Da Silva, L. D. Shinomiya, T. F. De Oliveira, J. R. P. Vaz, A. L. A. Mesquita, and A. C. P. B. Junior, “Design of Hydrokinetic Turbine Blades Considering Cavitation,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 277–282, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.343.
- [47] U. Dorji and R. Ghomashchi, “Hydro turbine failure mechanisms: An overview,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 44. Elsevier Ltd, pp. 136–147, 2014, doi: 10.1016/j.engfailanal.2014.04.013.
- [48] S. Khurana, Navtej, and H. Singh, “Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines- A Review,”

pp. 172–177, 2012.

- [49] S. C Li, *Cavitation of Hydraulic Machinery*, Vol. 1. London: Imperial College Press, 2000.
- [50] A. Karimi and F. Avellan, “Comparison of erosion mechanisms in different types of cavitation,” vol. 113, pp. 305–322, 1986.
- [51] B. Sirok, I. Kern, M. Hocevar, and M. Novak, “Monitoring of the cavitation in the Kaplan turbine,” *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 3, pp. 1224–1228, 1999, doi: 10.1109/isie.1999.796873.
- [52] P. Sheng, Y. Y. He, and F. L. Chu, “The online monitoring and diagnosis system for cavitation erosion of hydroturbines,” *Water Resour. hydropower Eng.*, 2002.
- [53] Spannhake, “Causes & Effects of Cavitation in Hydraulic Turbines,” 1932. [http://www.frenchriverland.com/causes\\_&\\_efeects\\_of\\_cavitation\\_in\\_hydraulic\\_turbines.htm](http://www.frenchriverland.com/causes_&_efeects_of_cavitation_in_hydraulic_turbines.htm).
- [54] A. J. Sedriks and O. S. Zaroog, “Corrosion of Stainless Steels,” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, 2017.
- [55] J. Kruger, “The nature of the passive film on iron and ferrous alloys,” *Corros. Sci.*, vol. 29, no. 2–3, pp. 149–162, 1989, doi: 10.1016/0010-938X(89)90026-7.
- [56] R. A. Lula, *Stainless Steel*. 1986.
- [57] D. R. and y W. J. W. P. P. F. Askeland, *The Science and Engineering of Materials*. .
- [58] A. E. M. Castro, “Implantación iónica por plasma en titanio y aceros inoxidable usados en prótesis e instrumental médico,” Universidad Autónoma del Estado de México, 2008.
- [59] S. Parker, *Principles and Practice*, vol. 32, no. 3. 2006.
- [60] M. Kutz, “Handbook of Environmental Degradation of Materials,” in *Handbook of Environmental Degradation of Materials: Second Edition*, 2nd ed., 2012, pp. 87–125.
- [61] S. Esmailzadeh, M. Aliofkhaezai, and H. Sarlak, “Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review,” *Prot. Met. Phys. Chem. Surfaces*, vol. 54, no. 5, pp. 976–989, 2018, doi: 10.1134/S207020511805026X.
- [62] ASTM G102, “Standard Practice for from Electrochemical Measurements,” *Astm*, vol. 89, no. Reapproved 2015, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1520/G0102-89R15E01.2.
- [63] Arturo Eduardo Muñoz Castro, “Implantación iónica por plasma en titanio y aceros inoxidable usados en prótesis e instrumental médico,” Universidad Autónoma del Estado de México, 2008.
- [64] ASTM G32, “Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, p. 20, 2016, doi: 10.1520/G0032-10.bility.
- [65] I. Lazar *et al.*, “Evaluation of the brass CuZn39Pb3 resistance at vibratory cavitation erosion,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 477, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/477/1/012002.

- [66] ASM International Metal Handbook, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*, 10th ed. 1990.
- [67] G. Bazanini and J. D. Bressan, “Preliminary experience with a new compact disk apparatus for cavitation erosion studies,” *Wear*, vol. 263, no. 1-6 SPEC. ISS., pp. 251–257, 2007, doi: 10.1016/j.wear.2006.12.064.
- [68] O. Takakuwa, Y. Mano, and H. Soyama, “The Interaction between Hydrogen and Surface Stress in Stainless Steel,” vol. 8, no. 12, pp. 1299–1303, 2014.
- [69] L. A. Espitia, H. Dong, X. Y. Li, C. E. Pinedo, and A. P. Tschiptschin, “Cavitation erosion resistance and wear mechanisms of active screen low temperature plasma nitrided AISI 410 martensitic stainless steel,” *Wear*, vol. 332–333, pp. 1070–1079, 2015, doi: 10.1016/j.wear.2014.12.009.
- [70] F. da, C. J. Scheuer, R. P. Cardoso, and S. F. Brunatto, “Cavitation erosion resistance enhancement of martensitic stainless steel via low-temperature plasma carburizing,” *Wear*, vol. 428–429, no. October 2018, pp. 162–166, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2019.03.009.
- [71] S. Hattori and R. Ishikura, “Revision of cavitation erosion database and analysis of stainless steel data,” *Wear*, vol. 268, no. 1, pp. 109–116, 2010, doi: 10.1016/j.wear.2009.07.005.
- [72] K. Y. Wang, K. H. Lo, C. T. Kwok, M. M. Wong, I. W. Iong, and W. Ai, “The influences of martensitic transformations on cavitation-erosion damage initiation and pitting resistance of a lean austenitic stainless steel,” *Mater. Res.*, vol. 19, no. 6, pp. 1366–1371, 2016, doi: 10.1590/1980-5373-MR-2015-0409.
- [73] C. M. Allen and B. Boardman, *Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International, 1990.
- [74] J. D. Verhoeven, *Steel Metallurgy for the Non-Metallurgist*. ASM International, 2019.
- [75] S. C. S. Dodds, A.H. Jones, n, “Tribological enhancement of AISI 420 martensitic stainless steel through friction-stir processing.pdf,” 2013.
- [76] M. M. Farag, *Quantitative Methods of Materials Selection*, no. June. 2006.
- [77] K. K. Sareen, *Metal casting: Computer-aided Design and Analysis*, 4th ed. Prentice-Hall India, 2007.
- [78] J. R. Davis, *Copper and Copper alloys*. Ohio: ASM International, 2001.
- [79] Copper Development Association Inc., “Phosphor Bronze,” 2013. [https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/phos\\_bronze.html](https://www.copper.org/resources/properties/microstructure/phos_bronze.html).
- [80] R. J Marcelo, “Refino De Grão Das Ligas Do Sistema Cobre-Estanho,” 2016, [Online]. Available: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-23082016-082853/es.php>.
- [81] A. A. Baquero, *Las propiedades de fundición*, 1st ed. Bucaramanga, Colombia: Publicaciones UIS, 1998.

- [82] M. P. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*, 3rd ed. Mexico D.F.: MC Graw Hill, 2007.
- [83] R. Aristizabal, “Introducción a la fundición.” Medellín, 2018.
- [84] ASM International Handbook Committee, “Metals Handbook. Vol. 15,” p. 937, 1988.
- [85] A. Ortiz Prado, O. Ruiz Cervantes, and J. A. Ortiz Valera, “Modelado de procesos de manufactura,” México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2013.
- [86] C. M. Choudhari, B. E. Narkhede, and S. K. Mahajan, “Casting Design and Simulation of Cover Plate Using AutoCAST-X Software for Defect Minimization with Experimental Validation,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 6, no. Icmpe, pp. 786–797, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.095.
- [87] B. Ravi, “Casting Simulation and Optimisation: Benefits, Bottlenecks, and Best Practices,” *Indian Foundry J.*, no. January, pp. 1–12, 2008.
- [88] B. Ravi and D. Joshi, “Feedability analysis and optimisation driven by casting simulation,” *Indian Foundry J.*, vol. 53, no. 6, pp. 71–78, 2007.
- [89] U. A. Dabade and R. C. Bhedasgaonkar, “Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique,” *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 616–621, 2013, doi: 10.1016/j.procir.2013.06.042.
- [90] H. D. Machado González, “Simulación de las condiciones de proceso par ala fundicion en molde permanente de un caldero de aluminio de la empresa IMUSA S.A.,” Universidad de Antioquia, 2010.
- [91] Finite Solutions, “OPTICast Workbook,” *Training Course Workbook*, 2016. <https://finite.solutions/optimize-metal-casting-solidification-modeling-opticast/>.
- [92] S. Pattnaik, D. B. Karunakar, and P. K. Jha, “Developments in investment casting process — A review,” *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 212, no. 11, pp. 2332–2348, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.06.003.
- [93] Barnett, S. O, “Investment casting—the multi-process technology,” *Foundry Trade J.*, vol. 11, pp. 33–37, 1988.
- [94] C. M. C. C. K. Chua and C. W. L. C. Feng, “Rapid prototyping and tooling techniques : a review of applications for rapid,” pp. 308–320, 2005, doi: 10.1007/s00170-003-1840-6.
- [95] E. Capello, *Tecnología de La Fundicion*, 2nd ed. Gustavo Gili, 1966.
- [96] H. M. A. Garrido, M. de L. L. Hernández, E. S. L. Domínguez, and R. R. Flores, “Diseño y fabricación de modelos para fundición,” Instituto Politécnico Nacional, 2008.
- [97] C. Bustos, “Estudio De Colabilidad Del Aluminio Con Modelos Realizados En Pla Por Impresión 3D,” Universidad politécnica de Madrid, 2016.
- [98] C. Balletti, M. Ballarin, and F. Guerra, “3D printing: State of the art and future perspectives,”

*J. Cult. Herit.*, vol. 26, pp. 172–182, 2017, doi: 10.1016/j.culher.2017.02.010.

- [99] J. R. Davis, *Stainless Steel*. 1996.
- [100] ASM International Handbook Committee, *ASM Speciality Handbook, Copper and Copper Alloys*. 2001.
- [101] ASTM International, “Standard specification for Gray Iron Castings ASTM A48,” *ASTM Int.*, pp. 835–855, 2003, doi: 10.31399/asm.hb.v15.a0005323.
- [102] ASTM International, “E3-11. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens,” pp. 1–12, 2020, doi: 10.1520/E0003-11R17.1.
- [103] ASTM, “D7127-13. Standard test method for measurement of surface roughness of abrasive blast cleaned metal surfaces using a portable stylus instrument,” *ASTM Int.*, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1520/D7127-13.2.
- [104] ISO, “4287-97. Geometrical product specifications (GPS)- Surface texture: profiterms, method-terms, definitions and surface texture parameters,” pp. 1–34, 1997, doi: 10.1520/D7127-13.2.
- [105] H. P. Neopane, S. Sujakhu, S. Shrestha, K. Subedi, and A. Basnet, “Study of sediment erosion in hydraulic turbine using rotating disc apparatus,” *Dev. Renew. Energy Technol. (ICDRET), 2012 2nd Int. Conf.*, pp. 1–4, 2012.
- [106] C. Ramirez and j Garcia, “caracterización de los materiales del lecho de un rio para propositos de modelación matematica,” vol. 7, pp. 99–106, 2004.
- [107] ASTM International, “Método de ensayo normalizado para determinar el análisis granulométrico de los áridos finos y gruesos,” 2001.
- [108] ASTM Internacional, “Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals,” vol. i, no. Reapproved, 2004.
- [109] ASTM International MNL20, *Corrosion test and Standards: Application and Interpretation*. 2010.
- [110] G. Karafyllias, A. Galloway, and E. Humphries, “The effect of low pH in erosion-corrosion resistance of high chromium cast irons and stainless steels,” *Wear*, vol. 420–421, pp. 79–86, 2019, doi: 10.1016/j.wear.2018.11.021.
- [111] L. Gianni, “Corrosion behavior of bronze alloys exposed to urban and marine environment : an innovative approach to corrosion process understanding and to graphical results presentation .,” 2011.
- [112] K. Ogino, A. Hida, and S. Kishima, “Effect of amplitude on erosion-corrosion of metals by vibratory cavitation in relation to pH of the cavitation media,” *Corrosion*, vol. 44, no. 2, pp. 97–103, 1988, doi: 10.5006/1.3583913.
- [113] ASTM International, “Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among

- Brinell Hardness , Vickers Hardness , Rockwell Hardness , Superficial Hardness , Knoop Hardness , and Scleroscope Hardness 1,” 2007, doi: 10.1520/E0140-07.1.6.
- [114] G. F. Hundy, A. R. Trott, and T. C. Welch, “Air and Water Vapour Mixtures,” *Refrig. Air Cond. Heat Pumps*, pp. 301–312, 2016, doi: 10.1016/b978-0-08-100647-4.00019-x.
- [115] M. Edwards, M. R. Schock, and T. E. Meyer, “Alkalinity, pH, and copper corrosion by-product release,” *J. / Am. Water Work. Assoc.*, vol. 88, no. 3, pp. 81–94, 1996, doi: 10.1002/j.1551-8833.1996.tb06521.x.
- [116] C. Zeng *et al.*, “Mechanical, thermal, and corrosion properties of Cu-10Sn alloy prepared by laser-powder-bed-fusion additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 35, no. June, p. 101411, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101411.
- [117] N. Fu, X. Tang, D. Y. Li, L. Parent, and H. Tian, “In situ investigation of local corrosion at interphase boundary under an electrochemical-atomic force microscope,” *J. Solid State Electrochem.*, vol. 19, no. 2, pp. 337–344, 2015, doi: 10.1007/s10008-014-2601-1.
- [118] D. Šatović, L. V. Žulj, V. Desnica, S. Fazinić, and S. Martinez, “Corrosion evaluation and surface characterization of the corrosion product layer formed on Cu-6Sn bronze in aqueous Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> solution,” *Corros. Sci.*, vol. 51, no. 8, pp. 1596–1603, 2009, doi: 10.1016/j.corsci.2009.04.002.
- [119] J. F. Grubb, “Martensitic Stainless Steels,” 2000.
- [120] ASM International Staff, *ASM Handbook Corrosion : Materials*, vol. 13. 2003.
- [121] D. López, J. P. Congote, J. R. Cano, A. Toro, and 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, no. 1–6, pp. 118–124, 2005, doi: 10.1016/j.wear.2005.02.032.
- [122] A. A. Rozali, N. R. N. Masdek, M. C. Murad, Z. Salleh, and K. M. Hyie, “The effect of pH value on the corrosion behaviour of Ti-6Al-4V and 316L SS alloys under physiological environment,” *Chem. Eng. Trans.*, vol. 63, pp. 769–774, 2018, doi: 10.3303/CET1863129.
- [123] Z. Wang, L. Zhang, Z. Zhang, and M. Lu, “Combined effect of pH and H<sub>2</sub>S on the structure of passive film formed on type 316L stainless steel,” *Appl. Surf. Sci.*, vol. 458, pp. 686–699, 2018, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.07.122.
- [124] S. Seethammaraju and M. Rangarajan, “Corrosion of stainless steels in acidic, neutral and alkaline saline media: Electrochemical and microscopic analysis,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 577, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/577/1/012188.