

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA
ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA



“PREDICCIÓN DEL TIEMPO MEDIO ENTRE FALLAS DE IMPULSORES CENTRÍFUGOS POR BOMBEO DE SLURRY A TRAVÉS DE UN MODELO MATEMÁTICO EN MATLAB”

Tesis presentada por el Bachiller:

BRUNO MIGUEL GARCÍA MESONES

Para optar por el Título de:

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

Asesor: Ing. Mario Valencia Salas

AREQUIPA – PERÚ

2017

Agradecimientos

Dedico la presente tesis a mi familia, mi madre María Lourdes, mi padre Miguel Ángel, mis hermanos Rosa María y Hernán, por ser el pilar fundamental de mi formación personal y darme la oportunidad de realizar este trabajo.



RESUMEN

En el Perú, gran parte de nuestro crecimiento económico proviene de la minería donde se usan extendidamente bombas para transporte de slurry y agua con altas concentraciones de sólidos. A no ser por las recomendaciones del proveedor, actualmente no se cuenta con una manera accesible de predecir el ciclo de vida de las partes hidráulicas de este tipo de bombas que sufren gran desgaste por la naturaleza agresiva de los slurries. Sobre este problema encontrar un modelo que permita estimar el desgaste que sufren los principales componentes hidráulicos de las bombas llevaría a una mejor mantenimiento de los equipos, evitando fallas tempranas, paradas inesperadas y problemas de stock de repuestos.

Se propone un modelo matemático que se enfocará en predecir la tasa de degradación del espesor por unidad tiempo que perderá el álabe para una geometría de impulsor dada y datos del punto de operación del sistema, teniendo como dato de entrada la concentración en peso y el diámetro de partículas al 60%. Este modelo se centrará en erosión por impacto de partículas, ignorará efectos viscosos y vórtices en el flujo y solo tomará como punto de estudio el álabe, además, se construirá el modelo de manera flexible para poder ser modificado y validado por futuros ensayos en laboratorio. Esta tesis contiene inicialmente el estado del arte de mecánica de erosión impacto de partículas, teoría de bombas centrífugas, bombeo de slurry, luego se expone el desarrollo del modelo de estimación de desgaste en primera instancia de una placa plana y luego del impulsor y finalmente se presentarán los resultados obtenidos usando los datos de una bomba comercial, bombeando 2000 m³/hr de

slurry con 30,40 y 50% de concentración en peso de óxido de silicio y 30, 40 y 50 micras de diámetro al 60% cada uno.

Los tiempos medios entre fallas (MTBF) que se han calculado con el modelo propuesto son: para concentración de sólidos en peso de 30% los valores son de 5168, 4893 y 4690 horas para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente; para concentración de sólidos en peso de 40% los valores son de 3583, 3393 y 3252 horas para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente y para concentración de sólidos en peso de 50% los valores son de 2633, 2493 y 2390 para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente.

Se encontraron una buena correlación entre los resultados obtenidos con el modelo propuesto y el modelo de referencia de Gulich para diámetro de partícula de 40 micras para todas las concentraciones en peso y una moderada correlación para diámetro de partícula de 40 y 50 micras. Un siguiente paso es realizar una validación de los resultados de este modelo propuesto a través de estadística de bombas que trabajen en campo o pruebas en laboratorio.

Palabras Claves: Tiempo medio entre Fallas, erosión, slurry, impulsor.

ABSTRACT

In Peru, a great part of our economic growth comes from the mining industry where pumps are greatly used to transport slurry and water with high solids concentrations. Besides the recommendations of the supplier, there is currently no accessible way to predict the life cycle of the hydraulic parts of these types of pumps that suffer great wear and tear due to the aggressive nature of the slurries. On this problem finding a model that allows to estimate the wear that the main hydraulic components of the pumps suffer would lead to a better maintenance of the equipment, avoiding early failures, unexpected stops and problems of stock of spare parts.

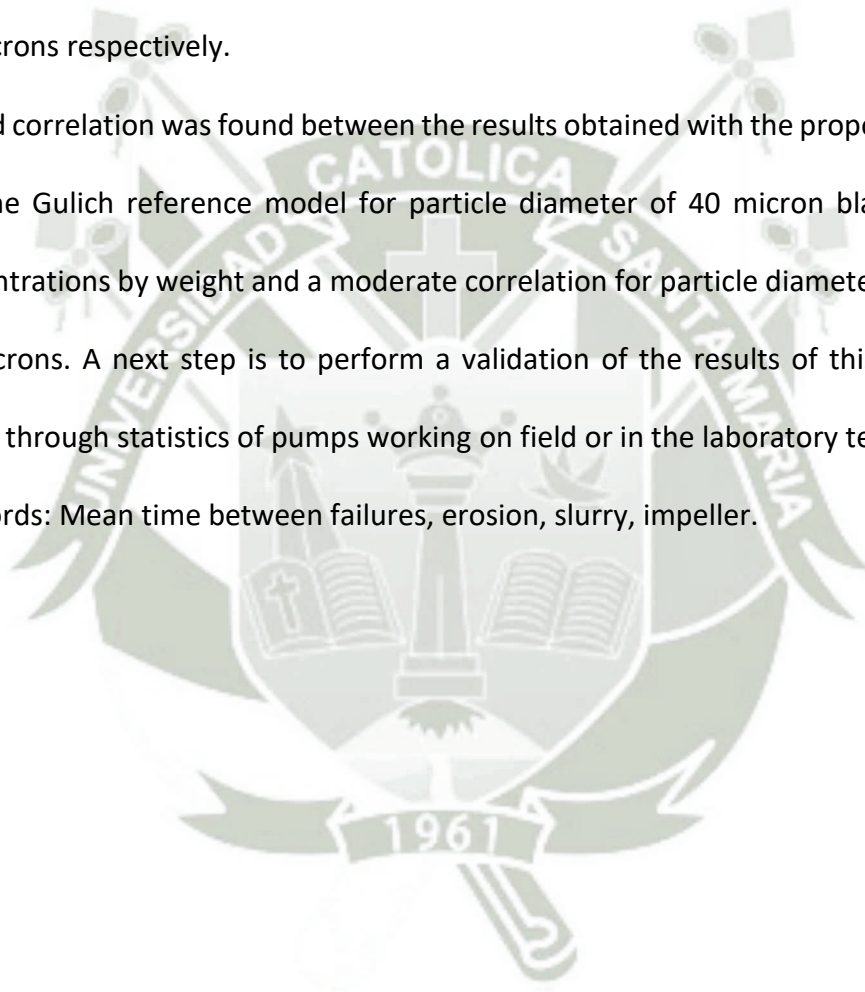
A numerical model is proposed in which we will focus on predicting the rate of degradation of the thickness per unit time that the blade will lose for a given impeller geometry and system operating point data, taking as input data the concentration in weight and the particle diameter. This model will focus on erosion by impact of particles, ignore viscous effects and vortices in the flow and only take as a point of study the blade, in addition, the model will be built flexible enough to be modified and validated by future laboratory tests.

This thesis initially contains the state of the art of particle impact erosion mechanics, theory of centrifugal pumps, slurry pumping, then it is exposed the development of the model of wear estimation in the first instance of a flat plate and then the impeller blades and finally the results obtained are presented using data from a commercial pump, pumping 2000 m³/hr of slurry with 30, 40 and 50% silicone oxide concentration by weight and 30, 40 and 50 microns in diameter at 60% each.

The average times between failures (MTBF) that have been found with the proposed model are: for solids concentration by weight of 30% the values are 5168, 4893 and 4690 hours for particle diameter of 30, 40 and 50 microns respectively; For solids concentration by weight of 40% the values are 3583, 3393 and 3252 hours for particle diameter of 30, 40 and 50 microns respectively and for solids concentration by weight of 50% the values are 2633, 2493 and 2390 hours for particle diameter of 30, 40 and 50 microns respectively.

A good correlation was found between the results obtained with the proposed model and the Gulich reference model for particle diameter of 40 micron blades for all concentrations by weight and a moderate correlation for particle diameter of 40 and 50 microns. A next step is to perform a validation of the results of this proposed model through statistics of pumps working on field or in the laboratory tests.

Keywords: Mean time between failures, erosion, slurry, impeller.



INTRODUCCIÓN

En el capítulo I, se presentan los aspectos generales del trabajo que incluye la formulación del problema, el planteamiento de la hipótesis, determinación y objetivos, alcances y limitaciones.

En el capítulo II se abordan el estado del arte de la mecánica de desgaste, centrándose en erosión por impacto de partículas, presentando la evolución de los modelos matemáticos de desgaste por erosión de partículas y eligiendo uno de estos modelos para el posterior desarrollo del modelo que se propone.

En el capítulo III, se presenta teoría de bombas centrífugas, abordando su principio de funcionamiento, tipos y finalmente sistemas de bombeo de slurry, donde se detalla los tipos de slurry, tipos de bombas de slurry y materiales usados comúnmente.

En el capítulo IV, se desarrolla el modelo de predicción erosión por impacto de partículas para una placa plana, se presentan las ecuaciones usadas, el código en Matlab para cada función y un ejemplo.

En el capítulo V, se desarrolla el modelo de predicción erosión por impacto de partículas para el impulsor centrífugo se presentan las ecuaciones usadas y el código en Matlab para cada función.

En el capítulo VI, se presentan los resultados del modelo de predicción erosión por impacto de partículas para el impulsor centrífugo y se analiza los resultados.

Finalmente se presentan las conclusiones, recomendaciones y anexos.

ÍNDICE

RESUMEN	3
ABSTRACT	5
INTRODUCCIÓN	7
1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	19
1.2 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS	20
1.3 DETERMINACIÓN DE OBJETIVOS	20
1.3.1 <i>Objetivo Principal</i>	20
1.3.2 <i>Objetivos Específicos</i>	20
1.4 ALCANCES	21
1.5 VARIABLES DEPENDIENTES	21
1.6 VARIABLES INDEPENDIENTES	21
1.7 LIMITACIONES	22
CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE	23
2.1 MECÁNICA DE DESGASTE EN MATERIALES	23
2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE BOMBAS PARA TRANSPORTE DE SLURRY	44
2.3 DESGASTE POR EROSIÓN EN BOMBAS PARA TRANSPORTE DE SLURRY	45
CAPITULO III: TEORÍA DE BOMBAS CENTRIFUGAS	50
3.1 INTRODUCCIÓN	50
3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	51
3.2.1 <i>Ecuación Ideal de Euler para turbomáquinas</i>	52
3.2.2 <i>Efecto de deflexión del fluido por numero finito de álabes</i>	58
3.2.3 <i>Efecto de espesor de Álabes</i>	61
3.2.4 <i>Balance de potencia y pérdidas</i>	62

3.2.5	<i>Coefficientes adimensionales</i>	66
3.3	TIPOS DE BOMBAS CENTRIFUGAS.....	72
3.3.1	<i>Radial</i>	72
3.3.2	<i>Flujo Mixto o Semi Axial</i>	73
3.3.3	<i>Axial</i>	74
3.4	SISTEMAS DE BOMBEO DE SLURRY	76
3.4.1	<i>Introducción</i>	76
3.4.2	<i>Características de los Slurries</i>	77
3.4.3	<i>Tipos de Slurry</i>	81
3.4.4	<i>Bombas para Slurry</i>	82
3.4.5	<i>Materiales en las bombas de slurry</i>	87
CAPITULO IV: DESARROLLO DEL MODELO DE PLACA PLANA.....		94
4.1	DESARROLLO DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN EN PLACA PLANA.....	94
4.1.1	<i>Introducción y Alcances</i>	94
4.1.2	<i>Datos de Entrada para la función "placa.m"</i>	94
4.1.3	<i>Datos de Salida de la función "placa.m"</i>	95
4.1.4	<i>Flujo másico de solidos</i>	95
4.1.5	<i>Velocidad de impacto en la placa</i>	96
4.1.6	<i>Remoción de material de la placa a través del tiempo</i>	96
4.1.7	<i>Degradación del espesor de la placa por unidad de tiempo</i>	97
4.1.8	<i>Tiempo de degradación del espesor</i>	98
4.2	CÓDIGO DEL ARCHIVO "PLACA.M" EN MATLAB.....	98
4.3	EJEMPLO DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN EN PLACA PLANA	101
4.3.1	<i>Datos de Entrada</i>	101
4.3.2	<i>Datos de Salida</i>	101
CAPITULO V: DESARROLLO DEL MODELO PARA EL IMPULSOR.....		104

5.1	GEOMETRÍA DEL IMPULSOR	104
5.1.1	<i>Introducción y alcances</i>	104
5.1.2	<i>Datos de entrada de la función "geo.m"</i>	104
5.1.3	<i>Datos de salida de la función "geo.m"</i>	105
5.1.4	<i>Modelamiento de la Geometría del Impulsor</i>	105
5.1.5	<i>Generación de la malla</i>	109
5.1.6	<i>Código del archivo "geo.m" en Matlab</i>	110
5.2	CÁLCULO DE VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS.....	114
5.2.1	<i>Introducción y alcances</i>	114
5.2.2	<i>Datos de entrada de la función "velocidad.m"</i>	115
5.2.3	<i>Datos de salida de la función "velocidad.m"</i>	115
5.2.4	<i>Cálculo de la velocidad tangencial</i>	115
5.2.5	<i>Cálculo de la velocidad relativa</i>	116
5.2.6	<i>Cálculo de la velocidad absoluta de impacto</i>	116
5.2.7	<i>Código del archivo "velocidad.m" en Matlab</i>	117
5.3	CÁLCULO DE TASA DE EROSIÓN	119
5.3.1	<i>Introducción y alcances</i>	119
5.3.2	<i>Datos de entrada de la función "erosion.m"</i>	119
5.3.3	<i>Datos de salida de la función "erosion.m"</i>	120
5.3.4	<i>Calculo del flujo másico de partículas que impactan cada i-ésima placa</i>	120
5.3.5	<i>Cálculo de tasa de volumen erosionado en cada i-ésima placa</i>	122
5.3.6	<i>Código del archivo "erosion.m" en Matlab</i>	123
5.4	CALCULO DE TASA DE REMOCIÓN DE MASA Y DE ESPESOR.....	124
5.4.1	<i>Variables de entrada de la función "perdmas.m"</i>	124
5.4.2	<i>Variables de salida de la función "perdmas.m"</i>	124
5.4.3	<i>Cálculo de tasa de masa removida en la placa i por álabe</i>	125
5.4.4	<i>Cálculo de tasa masa pérdida total para cada álabe</i>	125
5.4.5	<i>Cálculo de tasa de espesor removido por unidad de tiempo para cada i-ésima placa</i> .	125

5.4.6	<i>Calculo del tiempo medio entre fallas según modelo propuesto</i>	127
5.4.7	<i>Código del archivo "perdmas.m" en Matlab</i>	127
5.5	CALCULO DE REMOCIÓN DE TASA DE MASA Y DE ESPESOR SEGÚN GULICH	129
5.5.1	<i>Variables de entrada de la función gulich.m</i>	129
5.5.2	<i>Variables de salida de la función gulich.m</i>	129
5.5.3	<i>Modelo de predicción de tasa de remoción de espesor de Gulich</i>	129
5.5.4	<i>Calculo del tiempo medio entre fallas según modelo de Gulich</i>	131
5.5.5	<i>Código del archivo "gulich.m" en Matlab</i>	132
5.6	CÓDIGO DE EJECUCIÓN Y REPRESENTACIÓN	132
5.6.1	<i>Código del archivo "plotER.m" en Matlab</i>	132
5.6.2	<i>Código del archivo "principal.m" en Matlab</i>	137
5.6.3	<i>Código del archivo "completo.m" en Matlab</i>	139
	CAPITULO VI: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	143
6.1	DATOS DE LA BOMBA PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS	143
6.2	DATOS DE INGRESO	145
6.3	RESULTADOS	146
6.3.1	<i>Presentación de resultados</i>	146
6.3.2	<i>Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido en cada i-ésima placa</i>	150
6.3.3	<i>Masa y espesor removido por álabe</i>	159
6.3.4	<i>Perfil de velocidades y ángulos a lo largo del álabe</i>	168
6.3.5	<i>Evolución del espesor removido en la cara del álabe</i>	169
	CONCLUSIONES	178
	RECOMENDACIONES	179
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	180
	ANEXOS	182

CÓDIGO DE PLACA.M.....	182
CÓDIGO DE GEO.M	185
CÓDIGO DE VELOCIDAD.M	188
CÓDIGO DE EROSION.M	190
CÓDIGO DE PERDMAS.M	192
CÓDIGO DE GULICH.M	194
CÓDIGO DE PLOTÉR.M	195
CÓDIGO DE PRINCIPAL.M.....	200
CÓDIGO DE COMPLETO.M	202
DIMENSIONES DE LA BOMBA.....	206



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Materiales de especímenes usados en el modelo de Oka.....	38
Tabla 2: Constantes y exponentes para ecuación erosión normal en el modelo de Oka.	41
Tabla 3: Constantes y exponentes para función ángulo de impacto en el modelo de Oka.	42
Tabla 4: Velocidad de hundimiento para diversas partículas.....	80
Tabla 5: Aceros según la especificación ASTM A532-82 (Standard Specification for Ductile Iron Castings).....	91
Tabla 6: Datos de Entrada para modelo de placa plana.....	101
Tabla 7: Datos de Salida para modelo de placa plana.....	101
Tabla 8: Tiempo de degradación completa de la placa.....	102
Tabla 9: Datos de Entrada para modelo del impulsor.....	145
Tabla 10: Resumen de MTBF propuestos para el modelo del impulsor.....	146
Tabla 11: Resumen de MTBF Gulich para el modelo del impulsor.....	146
Tabla 12: Variación de porcentual de resultados para el modelo del impulsor.....	148

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfica 1: Esquema de erosión de material dúctil según Finnie.	26
Gráfica 2: Esquema de erosión de material duro según Finnie.....	27
Gráfica 3: Contacto entre partícula y superficie durante el impacto.	28
Gráfica 4: Influencia de ángulo de impacto en materiales dúctiles y duros según Finnie	29
Gráfica 5: Tipos de deformación por impacto según Oka.	36
Gráfica 6: Dependencia del ángulo de impacto con el desgaste por erosión para varios aceros según Oka.....	37
Gráfica 7: Correlación entre tasa de erosión y $K(aHv)^{-b}$ del modelo de Oka.....	39
Gráfica 8: Correlación entre tasa de erosión y b del modelo de Oka.....	39
Gráfica 9: Correlación entre la dureza del material objetivo y la constante k_2 del modelo de Oka.....	40
Gráfica 10: Correlación entre dureza y la constante k_3 del modelo de Oka.	40
Gráfica 11: Relación de resultados experimentales con la ecuación predictiva del modelo de Oka.....	43
Gráfica 12: Comparación entre resultados experimentales y obtenidos a través del modelo predictivo según Gulich	47
Gráfica 13: Tasa de erosión del álabe del impulsor comparado con la velocidad específica de la bomba según Sellgren.....	48
Gráfica 14: Tasa de erosión del álabe del impulsor según Sellgren.	48
Gráfica 15: Tasa de erosión del álabe del impulsor comparado con la concentración por volumen de arena según Sellgren.	49

Gráfica 16: Vector de velocidades en el impulsor	53
Gráfica 17: Triángulo de velocidades en entrada y salida al álabe.....	55
Gráfica 18: Ángulos característicos para β_2 en bombas centrífugas	57
Gráfica 19: Flujo en el canal de los álabes A) flujo entre álabes B) flujo secundario	58
Gráfica 20: Efecto de deslizamiento en ángulo de salida del álabe.	60
Gráfica 21: Efecto de efecto de bloqueo en el triángulo de velocidades.....	62
Gráfica 22: Corte meridional de un impulsor según velocidad específica.	71
Gráfica 23: Velocidades específicas y su relación con la geometría del impulsor. ...	71
Gráfica 24: Impulsor radial cerrado	73
Gráfica 25: Impulsor de bombas semi axiales en una turbina vertical.....	74
Gráfica 26: Bomba axial	75
Gráfica 27: Curva granulométrica.....	78
Gráfica 28: Comportamiento del flujo de slurry en tubería según velocidad crítica.	81
Gráfica 29: Bomba para slurry con liner interior acoplada mediante faja de 8x6. ...	85
Gráfica 30: Bomba sumergible para drenaje con agitador y descarga lateral.	85
Gráfica 31: Clasificación de materiales de bombas de acuerdo al tamaño de partícula.	89
Gráfica 32: Tasa de erosión dependiente del ángulo de ataque.....	102
Gráfica 33: Tiempo de desgaste completo de la placa plana dependiendo del ángulo de ataque.....	103
Gráfica 34: Degradación de espesor de la placa a través del tiempo	103
Gráfica 35: Ángulos y segmentos propuestos para el modelamiento del álabe el impulsor.....	106

Gráfica 36: Construcción de la placa i de la malla	109
Gráfica 37: Vectores velocidad normal, tangencial, absoluta y ángulo de ataque .	114
Gráfica 38: Relaciones geométricas en la cara del álabe.	126
Gráfica 39: Bomba de slurry GIW serie LSA 10x12	143
Gráfica 40: Curva de la bomba de slurry GIW serie LSA 10x12 y punto de operación.	144
Gráfica 41: Comparación de resultados del modelo propuesto vs modelo de Gulich	147
Gráfica 42: Variación de resultados del modelo propuesto vs modelo de Gulich. .	149
Gráfica 43: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=30\%$ y $d_p=30$ micras.....	150
Gráfica 44: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=30\%$ y $d_p=40$ micras.....	151
Gráfica 45: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=30\%$ y $d_p=50$ micras.....	152
Gráfica 46: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=40\%$ y $d_p=30$ micras.....	153
Gráfica 47: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=40\%$ y $d_p=40$ micras.....	154
Gráfica 48: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=40\%$ y $d_p=50$ micras.....	155
Gráfica 49: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=50\%$ y $d_p=30$ micras.....	156

Gráfica 50: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=50\%$ y $d_p=40$ micras.....	157
Gráfica 51: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=50\%$ y $d_p=50$ micras.....	158
Gráfica 52: Masa y espesor removido por álabe $C_w=30\%$ $d_p=30$ micras.	159
Gráfica 53: Masa y espesor removido por álabe $C_w=30\%$ $d_p=40$ micras.	160
Gráfica 54: Masa y espesor removido por álabe $C_w=30\%$ $d_p=50$ micras.	161
Gráfica 55: Masa y espesor removido por álabe $C_w=40\%$ $d_p=30$ micras.	162
Gráfica 56: Masa y espesor removido por álabe $C_w=40\%$ $d_p=40$ micras.	163
Gráfica 57: Masa y espesor removido por álabe $C_w=40\%$ $d_p=50$ micras.	164
Gráfica 58: Masa y espesor removido por álabe $C_w=50\%$ $d_p=30$ micras.	165
Gráfica 59: Masa y espesor removido por álabe $C_w=50\%$ $d_p=40$ micras.	166
Gráfica 60: Masa y espesor removido por álabe $C_w=50\%$ $d_p=50$ micras.	167
Gráfica 61: Perfil de velocidades y ángulos a lo largo del álabe.....	168
Gráfica 62: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $d_p=30$ micras.....	169
Gráfica 63: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $d_p=40$ micras.....	170
Gráfica 64: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $d_p=50$ micras.....	171
Gráfica 65: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=30$ micras.....	172

Gráfica 66: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=40$ micras.....	173
Gráfica 67: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=50$ micras.....	174
Gráfica 68: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=30$ micras.....	175
Gráfica 69: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=40$ micras.....	176
Gráfica 70: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=50$ micras.....	177



CAPITULO I: ASPECTOS GENERALES

1.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El bombeo de slurry forma parte de sistemas productivos muy importantes en la industria minera que no deben sufrir paradas inesperadas por desgaste prematuro de los componentes.

La cantidad de sólidos contenidos en el fluido reducen significativamente la vida útil de los componentes hidráulicos y provocan incertidumbre al momento de reemplazo de partes de la bomba, lo que resulta en anomalías y fallas en el sistema de bombeo como variación de caudal y presión de trabajo, paradas inesperadas o mal planificadas y stock insuficiente o innecesario de piezas de repuesto. La naturaleza del bombeo de slurry como la concentración en peso de sólidos, diámetro de partículas, caudal y geometría del impulsor hacen que sea muy complicado predecir el tiempo en que tiene que ser reemplazados los componentes en contacto con el fluido como componente principal el impulsor.

Es necesario poder predecir el deterioro de las partes del impulsor para realizar mejores dimensionamientos, selección de equipos en aplicaciones con presencia de arena, optimizar económicamente un sistema de bombeo y mantener eficazmente los equipos sin paradas innecesarias o con deterioro frecuente de partes.

Esto se puede realizar a través de un modelo matemático en software Matlab basado en bibliografía existente sobre erosión por impacto de partículas y aplicando conocimiento de ciencia de materiales, de teoría de bombeo y técnicas de bombeo de slurry.

1.2 PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS

Dados modelos existentes de predicción de desgaste en bombas centrífugas, desarrollar un modelo matemático en Matlab que nos permitan estimar la tasa de remoción de espesor por unidad de tiempo en el álabe de un impulsor centrífugo metálico para poder estimar el tiempo medio entre fallas a partir de la concentración en peso de sólidos y diámetro de partículas y después validar los resultados con modelos existentes.

1.3 DETERMINACIÓN DE OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Principal

Desarrollar un modelo matemático en software Matlab que prediga el tiempo medio entre fallos de un impulsor centrífugo metálico a partir de la estimación de remoción de espesor del álabe por unidad de tiempo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Predecir el tiempo medio entre fallas del impulsor de una bomba centrífuga comercial bombeando slurry homogéneo de óxido de silicio en concentraciones de 30, 40 y 50% en peso y diámetro de partículas al 60% de 30, 40 y 50 micras y validarlo con datos de estudios existentes.
- Analizar la tasa de erosión a lo largo de álabe y encontrar el punto en el que el deterioro del espesor es mayor.
- Desarrollar el modelo de manera flexible para que pueda ser usado con diferentes tamaños de impulsor, número de álabes, caudales, etc.

1.4 ALCANCES

- Se desarrollará un modelo para predicción de tasa de erosión en una placa plana y luego otro para los álabes del impulsor.
- La superficie curva del álabe se aproximará en pequeñas placas planas, a estas placas planas se les denominará “placas i”. El modelo propuesto calculará la remoción de material en las secciones planas del álabe.
- Se considerará la teoría lineal de las turbomáquinas para determinar las velocidades de impacto de las partículas de slurry sin considerar turbulencias ni rebote de partículas.
- Las dimensiones y material del impulsor serán predeterminadas y fijas. El impulsor será de tipo semi abierto bidimensional de alabes de progresión recta con espesor constante.
- Se considerará que el impulsor ha fallado cuando su espesor nominal ha disminuido un 80%.

1.5 VARIABLES DEPENDIENTES

- Tiempo medio entre fallos (MTBF) en [hr].

1.6 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Diámetro de partículas (d_p) en [micras].
- Concentración en peso (C_w).

1.7 LIMITACIONES

- Se considerará que la tasa de remoción de espesor es independiente al medio (líquido o gaseoso) y solo se considera como la variable principal la velocidad absoluta y el ángulo de impacto.
- No se considerará el efecto que tiene la temperatura del medio en el desgaste por erosión.
- No se considerará el desgaste por corrosión del material del impulsor.
- Solo se considerará el desgaste producido erosión por impacto de partículas en la cara de presión del álabe y no en la cara de succión ni en los platos del impulsor.
- La geometría del álabe se considerará una sección de arco de círculo.
- No se consideran efectos viscosos ni de turbulencia.
- Las partículas solo impactarán una vez con la superficie del álabe y no se considerará la energía remanente del rebote.
- Para la estimación del tiempo medio entre fallas
- La degradación de material es uniforme para toda el área de la placa i a analizar.

CAPITULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 MECÁNICA DE DESGASTE EN MATERIALES

Según **Varenberg** (Towards a unified classification of wear, 2013) se definen las siguientes clases de desgaste mecánico:

Erosión por impacto de partículas: El fenómeno de erosión es ocasionado por partículas duras atrapadas en un flujo en movimiento que, al impactar con un cuerpo de material más blando, causan deformación mecánica en forma de cortes y cráteres en la superficie del cuerpo. Este tipo de desgaste depende de la masa de la partícula, velocidad y ángulo de impacto y es una fracción pequeña de la energía cinética de la partícula.

Abrasión: Ocasionado por el resbalamiento de partículas duras atrapadas entre dos superficies paralelas que ocasionan ralladuras en la superficie l material más blando. La magnitud del desgaste depende de la fuerza normal de la partícula en el material y parte de la energía resulta en el aumento de la temperatura del medio.

Adhesión: Es el caso de desgaste severo por abrasión en donde la temperatura alcanza el punto de fusión entre las dos superficies lo que ocasiona pequeñas soldaduras a lo largo de la superficie, debido al movimiento de las superficies estas soldaduras se rompen y llevan consigo material.

Impacto de líquido: O también llamado cavitación, este tipo de desgaste ocurre por el impacto de gotas de agua a gran velocidad en una superficie a causa de la formación de burbujas de vapor por baja presión y un posterior colapso a gran velocidad por el

aumento de presión. Es comúnmente visto en válvulas estranguladoras e impulsores de bombas.

En esta tesis nos centraremos en la teoría y estudios de la erosión por impacto de partículas. Vale aclarar que algunos autores en su trabajo usan el termino erosión y abrasión como sinónimos, más en este trabajo se utilizará exclusivamente el termino erosión.

La mecánica de erosión por impacto de partículas disueltas en fluido es muy compleja pues intervienen numerosos parámetros como las propiedades viscosas del fluido, propiedades mecánicas de las partículas y material objetivo. Encontrar una ley que abarque todos estos parámetros es muy difícil y ha sido motivo de estudio en la ciencia de materiales por casi un siglo tratando de unificar las variables de entrada en modelos matemáticos aproximados habiendo sido encontrados alrededor de 300 modelos propuestos **Matthew T. Siniawski, Stephen J. Harris, Qian Wang.** (A UNIVERSAL WEAR LAW FOR ABRASION, 2006) para diferentes erosivos, materiales objetivo, aplicaciones y fluido de trabajo. La cantidad de estos modelos propuestos nos indica la dificultad y la complejidad de encontrar un modelo exacto para todos los casos que tendría un valor comercial y técnico enorme ya que procesos en la industria minera, generación eléctrica, cementera y petrolera usan fluidos con sólidos disueltos y podría servir para mejorar el diseño de bombas, turbinas, soplores, sellos mecánicos, válvulas, tuberías, etc. y su aplicación en el mantenimiento y seguridad.

La mecánica de erosión por impacto de partículas en medio líquido ha sido investigada desde la década de los 60, que mediante ensayos de laboratorio han

podido concluir en modelos matemáticos y estadísticos bastante acertados que ya se aplican en la industria desde protección de tuberías y máquinas en extracción de hidrocarburos, mantenimiento de bombas y turbinas en centrales hidroeléctricas hasta corte con chorro de agua.

En esta tesis nos centraremos en la erosión de la superficie del álabe de una bomba centrífuga por acción de impacto de partículas contenidas en agua.

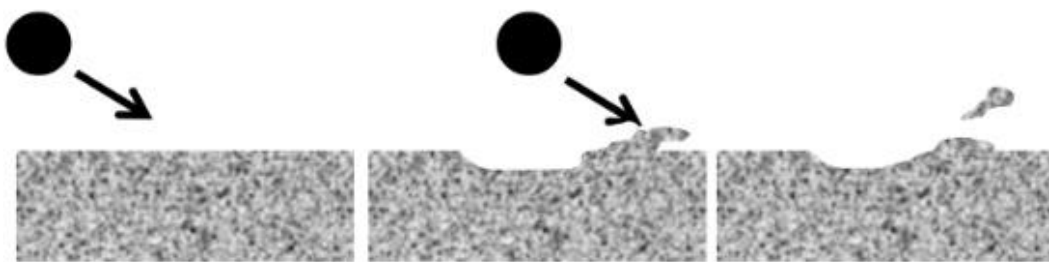
En 1960 **Finnie Iain** fue el primero en estudiar detenidamente el proceso de remoción de material desde un punto microscópico, estudiando el mecanismo corte de una partícula en una superficie plana desde la derivación de la ecuación de energía cinética de cualquier cuerpo. Presento la ecuación que se utilizó de punto de partida para definir la erosión por impacto de partículas por autores más modernos.

El describió los siguientes resultados en su trabajo (EROSION OF SURFACES BY SOLID PARTICLES, 1960):

- Los materiales dúctiles y duros tienen diferentes mecánicas frente a la erosión de partículas, siendo los primeros con mayor tasa de erosión en ángulos menores mientras que los segundos con mayor tasa de erosión en ángulos altos, esto se debe a que los materiales dúctiles tienen mayor cantidad de formación plástica mientras que los materiales duros tienen mayor cantidad de deformación elástica que plástica. Se puede apreciar que el diagrama esfuerzo-deformación los materiales dúctiles transforman mejor la energía cinética o mecánica en energía de deformación ya que no ocurre rotura cuando llegan a su límite elástico, hecho que si ocurre con los materiales duros.

- La tasa de erosión es proporcional a la cantidad de erosivo por unidad de masa de fluido.
- La tasa de erosión es proporcional al cuadrado de la velocidad relativa de la partícula.
- El ángulo de ataque tiene gran influencia en la tasa de erosión, siendo mayor de 15 a 25° que según sus resultados presentaba hasta 6 veces mayor tasa de erosión.
- La tasa de erosión para una velocidad y ángulo determinando es constante en el tiempo.

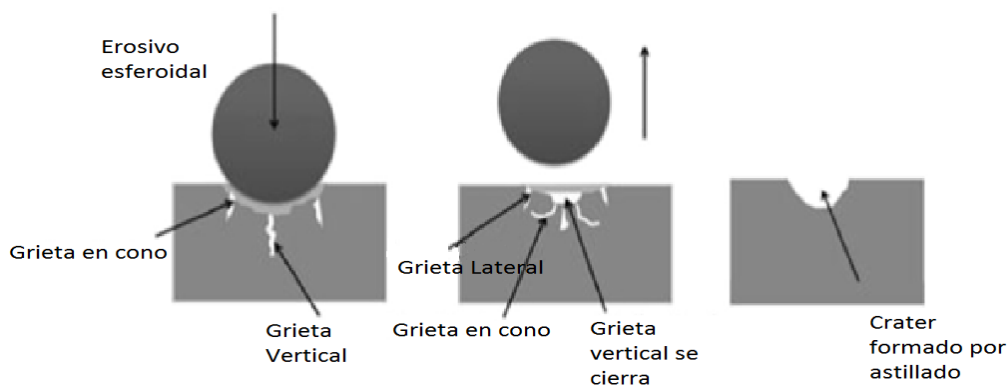
Según Finnie, cuando una partícula impacta un sólido de material dúctil, este puede sufrir deformación plástica que se ve reflejada en un rascado de la superficie con una rebaba cuya geometría varía de acuerdo a los varios parámetros relacionados con la cinética de la partícula y las propiedades de los materiales. Los sucesivos impactos de las partículas pueden desgarran el material cortado, otros pueden hacer el cráter más grande o pueden no realizar deformación plástica.



Gráfica 1: Esquema de erosión de material dúctil según Finnie.

FUENTE: A comprehensive review of solid particle erosion modelling for oil and gas wells and pipelines applications Journal of Natural Gas Science Engineering - November 2014

Distintamente cuando una partícula impacta un material duro o quebradizo, este puede formar fisuras en la superficie de material que los impactos sucesivos irán ampliando hasta el punto que se unan y se conviertan en lo que llaman una “fisura en cono”, que desprenderá los pequeños pedazos de material removido. Tanto el material objetivo como el erosivo son de elevada dureza, ocurre que la energía cinética de la partícula es transformada se conserva mediante el rebote de esta en la superficie, ocurriendo una colisión elástica.



Gráfica 2: Esquema de erosión de material duro según Finnie.

FUENTE: A comprehensive review of solid particle erosion modelling for oil and gas wells and pipelines applications Journal of Natural Gas Science Engineering - November 2014 (traducido al español)

El modelo matemático que presento Finnie es el siguiente:

$$ER = \frac{m_p V^2}{p\psi K} \left(\sin 2\alpha - \frac{6}{K} \sin^2 \alpha \right) \quad \text{Si } \tan \alpha < \frac{K}{6} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

$$ER = \frac{m_p V^2}{p\psi K} \left(\frac{K}{6} \cos^2 \alpha \right) \quad \text{Si } \tan \alpha > \frac{K}{6} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

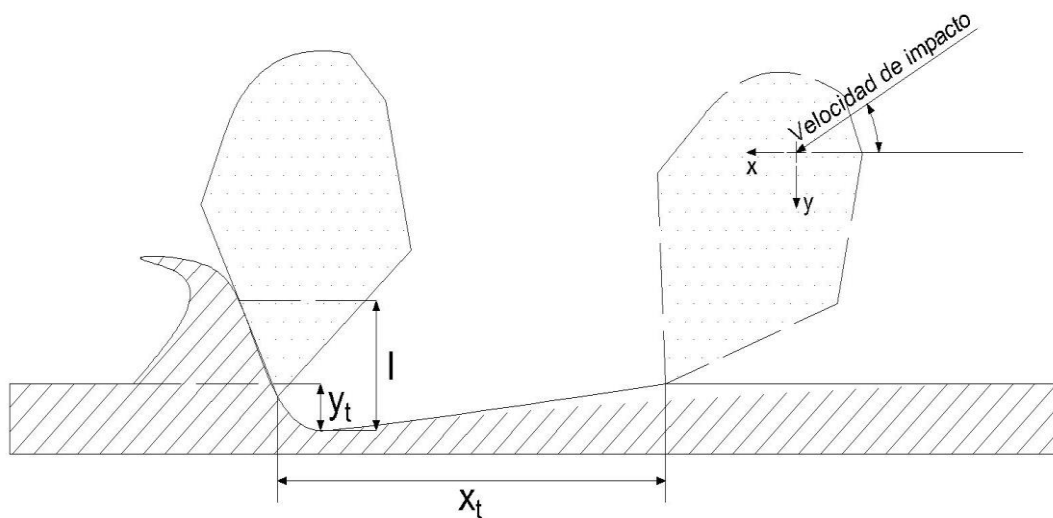
Donde:

ER Tasa de Erosión volumétrica por partícula [m³].

m_p Masa de la partícula erosiva [kg].

V Velocidad absoluta de la partícula erosiva [m/s].

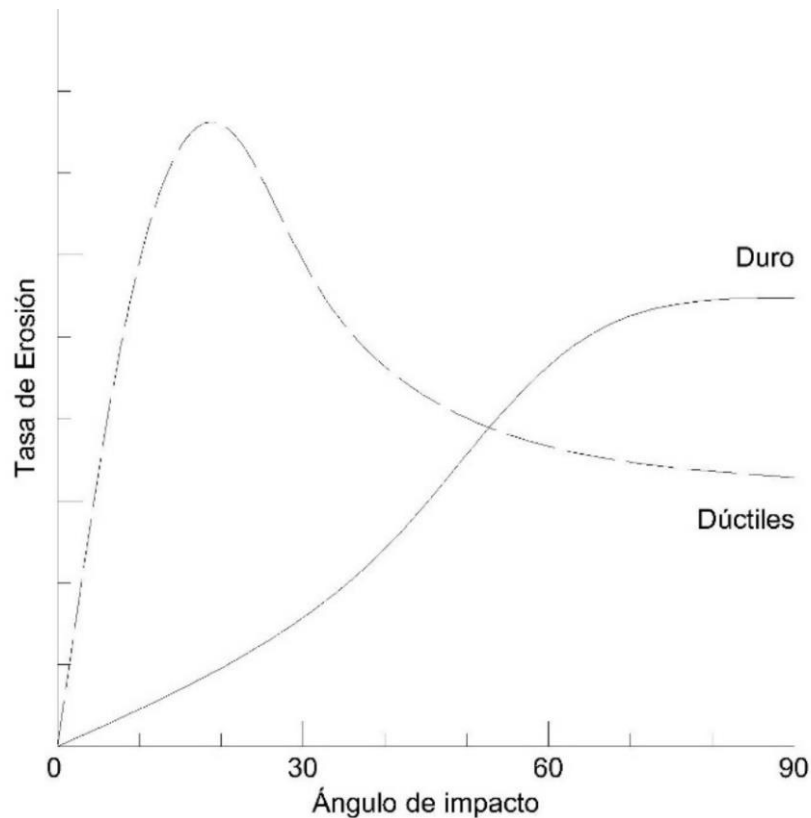
- ρ Esfuerzo de flujo plástico (se encuentra experimentalmente) [N/m²]
- ψ Constante de corte contacto-profundidad (Finnie asumió como valor 2)
- K Relación entre fuerza horizontal y vertical en el corte ($K=x_t/y_t$ Finnie asumió como valor 2)
- α Ángulo de impacto



Gráfica 3: Contacto entre partícula y superficie durante el impacto.

FUENTE: Erosion Corrosion in Oil and Gas Industry, Okonkwo, Paul and A.M.A. Mohamed, Trans Stellar2014.

Aunque este modelo se considera anticuado pues no es exacto para materiales duros y poco exacto para ángulos altos (mayores a 60 grados) la teoría que desarrollo sobre las diferencias en la mecánica de erosión en materiales dúctiles y duros, trayectoria de la partícula y geometría de la partícula erosiva, fue comprobada experimentalmente por futuros investigadores y se considera como base de suposiciones en la gran mayoría de modelos posteriores.



Gráfica 4: Influencia de ángulo de impacto en materiales dúctiles y duros según Finnie

FUENTE: Erosion Corrosion in Oil and Gas Industry, Okonkwo, Paul and A.M.A. Mohamed, Trans Stellar2014 (traducido al español)

El modelo de Finnie toma como principio la acción de una sola partícula de erosivo que impacta sobre un área plana de material objetivo, además experimentalmente comprobó que para conocer la tasa erosiva que producen todas las partículas en un flujo solo se tendría que multiplicar la expresión matemática por una constante “C” cuyo valor varía de 0.4 a 0.5, por lo que podríamos decir que la mitad de las partículas presentes en el flujo llegan a la superficie y son capaces de hacer que el material llegue al punto de rotura del material objetivo.

Autores como Hashish, Bitter, Eltogby y Hutchings tomaron el modelo de Finnie, añadieron variables como geometría de partícula, densidad y dureza del material objetivo, erosión primaria y secundaria entre otros.

Podemos observar que la función ER es dependiente de la energía cinética del conjunto de partículas, esta afirmación fue sustentada por Finnie (EROSION OF SURFACES BY SOLID PARTICLES, 1960) aduciendo que en promedio 7.5% de la energía cinética se transforma en energía de deformación plástica.

Experimentalmente se ha demostrado que para materiales dúctiles: a menores ángulos la tasa de erosión es mayor para materiales dúctiles mientras que para materiales duros, la erosión es mayor cuando el ángulo de impacto es cercano a los 90 grados.

En 1962, **J. G. Bitter** trabajo con el modelo de Finnie considerando adicionalmente las siguientes suposiciones (A STUDY OF EROSION PHENOMENA, 1962):

- Existe deformación tanto en la componente horizontal por rascaduras y una componente vertical por formación de cráteres al igual que el modelo de Finnie.
- Existe una deformación primaria consecuentemente una secundaria. En la primera el material sufre una deformación plástica y en la segunda la remoción del material por el exceso de esfuerzo al límite de rotura del material, tanto para materiales dúctiles como para materiales duros.
- No existe erosión de deformación si no se excede la “velocidad de límite elástico” que se define como la velocidad normal que provoca deformación del material objetivo hasta el punto de fluencia.

- Se reduce la deformación de corte si el ángulo de ataque de la partícula es menor al “ángulo de límite plástico” que se define como la velocidad normal que provoca la deformación del material objetivo hasta el punto de rotura.
- La suma de estos dos valores de erosión da como resultado la erosión total.

El modelo matemático es el siguiente:

$$ER_d = \frac{M_p(V \sin \alpha - V_{el})^2}{2\varepsilon} \quad \text{Si } V \sin \alpha > V_{el} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

$$ER_d = 0 \quad \text{Si } V \sin \alpha < V_{el} \quad \text{Eq. (2.4)}$$

$$ER_c = \frac{CM_p(V \sin \alpha - V_{el})^2}{\sqrt{V \sin \alpha}} \left(V \cos \alpha \right) \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Si $\alpha < \alpha_0$

$$ER_c = \frac{C(V \sin \alpha - V_{el})^2 \gamma^2}{\sqrt{V \sin \alpha}} \quad \text{Eq. (2.6)}$$

Si $\alpha > \alpha_0$

$$= \frac{M_p(V^2 \cos^2 \alpha - K(V \sin \alpha - V_{el}))^{3/2}}{2\gamma}$$

$$ER = ER_d + ER_c \quad \text{Eq. (2.7)}$$

Donde

ER Tasa de erosión volumétrica total [mm³/kg].

ER_d Tasa de erosión de deformación volumétrica por unidad de masa [mm³/kg].

ER_c Tasa de erosión de corte volumétrica por unidad de masa [mm³/kg].

M_p Flujo másico de las partículas erosivas [kg/s].

V Velocidad absoluta de la partícula erosiva [m/s].

V_{el} Velocidad de límite elástico de la partícula erosiva [m/s].

- α Ángulo de impacto.
- α_0 Ángulo de límite plástico de la partícula erosiva.
- ϵ Energía necesaria para remover una unidad volumétrica de material (determinado experimentalmente para cada material objetivo).
- C Constante de material objetivo. (determinado experimentalmente).
- γ Constante de material objetivo. (determinado experimentalmente).
- K Constante de material objetivo. (determinado experimentalmente).

El modelo de Bitter toma en cuenta la acción erosiva de todas las partículas en el flujo de agua en un área y da como resultado a la tasa de erosión en milímetros cúbicos por kilogramo de erosivo [mm³/kg].

En 1988 **M. Hashish** (MODIFIED MODEL FOR EROSION, SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EROSION BY LIQUID AND SOLID IMPACT, 1988) modificó el modelo de Finnie añadiéndole el efecto que tiene la forma de las partículas, la principal ventaja de este modelo es que se eliminó gran parte de las incógnitas cuyo valor tenía que obtenerse experimentalmente. El modelo matemático final queda como el siguiente:

$$ER = \frac{7 M_p}{\pi \rho_p} \left(\frac{V}{C_k} \right) \sin 2\alpha \sqrt{\sin \alpha} \quad \text{Eq. (2.8)}$$

$$C_k = \sqrt{\frac{3\sigma_f R_f^{3/5}}{\rho_p}} \quad \text{Eq. (2.9)}$$

Donde

- ER Tasa de erosión volumétrica [mm³/kg]
- M_p Flujo másico de las partículas erosivas [kg/s].

V	Velocidad absoluta de la partícula erosiva [m/s].
ρ_p	Densidad de la partícula erosiva [kg/m ³]
σ_f	Esfuerzo de flujo plástico [MPa]
R_f	Factor de redondez (va desde 0.1 ángulos agudos hasta 0.9 ángulos burdos)
α	Ángulo de impacto.

Este modelo solo es aplicable con materiales dúctiles. La desventaja de usar este modelo es la falta de validación experimental.

Una correlación general presentada por **Gupta** (PREDICTION OF UNEVEN WEAR IN A SLURRY PIPELINE ON THE BASIS OF MEASUREMENTS IN A POT TESTER, 1995) y **Seshandri** (STUDY OF THE PARAMETRIC DEPENDENCE OF EROSION WEAR FOR THE PARALLEL FLOW OF SOLID-LIQUID MIXTURES, 1999) presenta los factores a los que es proporcional la erosión por impacto de partículas, viene dada por la siguiente fórmula:

$$ER \propto KV^\beta d^\gamma C^\delta f(\alpha) \quad \text{Eq. (2.10)}$$

Donde:

ER	Tasa de Erosión másica o volumétrica.
V	Velocidad relativa de las partículas erosivas.
d	Diámetro promedio de las partículas erosivas.
C	Concentración gravimétrica de partículas erosivas.
K, β, γ y δ	Son constantes de las propiedades mecánicas del material objetivo y del erosivo.
$f(\alpha)$	Función del ángulo de impacto

Esta correlación se cumple en la mayoría de modelos, donde las unidades de variables y el valor de las constantes son determinadas por ensayos del laboratorio para cada material, otros modelos más exactos añaden la dureza del material objetivo o la densidad de la partícula de arena.

Experimentalmente se ha demostrado que para materiales dúctiles: a menores ángulos la tasa de erosión es mayor para materiales dúctiles mientras que para materiales duros, la erosión es mayor cuando el ángulo de impacto es cercano a los 90 grados.

En 2005 **Oka T** (PRACTICAL ESTIMATION OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT PART 1: EFFECTS OF IMPACT PARAMETERS ON A PREDICTIVE EQUATION, 2005) en conjunto con otros investigadores de la Universidad de Hiroshima, presentaron un modelo para estimar la erosión por impacto de partículas utilizando cualquier material objetivo, condiciones de flujo y material erosivo. Presenta una ecuación para la erosión normal y una ecuación para la función ángulo por separado, ambas en función de la dureza del material objetivo que según concluyen tiene una importancia enorme en base a los resultados experimentales. El modelo matemático es el siguiente:

$$ER = E_{90}g(\alpha) \quad \text{Eq. (2.11)}$$

$$E_{90} = K(Hv)^{k1}(V)^{k2}(d)^{k3} \quad \text{Eq. (2.12)}$$

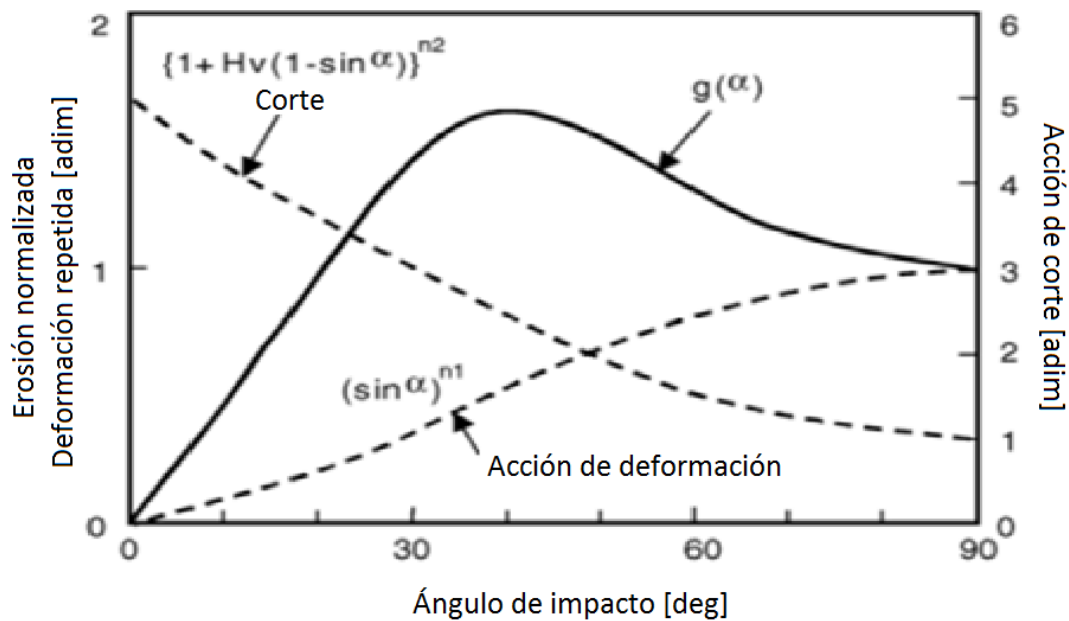
$$g(\alpha) = (\sin \alpha)^{n1}(1 + HV(1 - \sin \alpha))^{n2} \quad \text{Eq. (2.13)}$$

Donde:

ER Tasa de Erosión volumétrica por unidad de masa de erosivo [mm³/kg].

E_{90}	Tasa de erosión en ángulo normal [mm ³ /kg].
$g(\alpha)$	Función del ángulo de impacto.
α	Ángulo de ataque.
K	Factor de forma del erosivo.
H_v	Dureza Vickers del material erosivo [GPa].
V	Velocidad absoluta de las partículas erosivas [m/s].
d	Diámetro promedio de las partículas erosivas [μ m].
k_1, k_2 y k_3	Constante de indentación y penetración de partículas
n_1 y n_1	Constantes para cada material determinado experimentalmente.

La ecuación de función de ángulo de ataque tiene dos términos: la primera considera la deformación elástica (características de materiales duros) y su valor crece con el aumento del ángulo. La segunda considera la deformación plástica del material (propio de los materiales dúctiles) cuyo valor es máximo cuando el ángulo es cercano a cero.



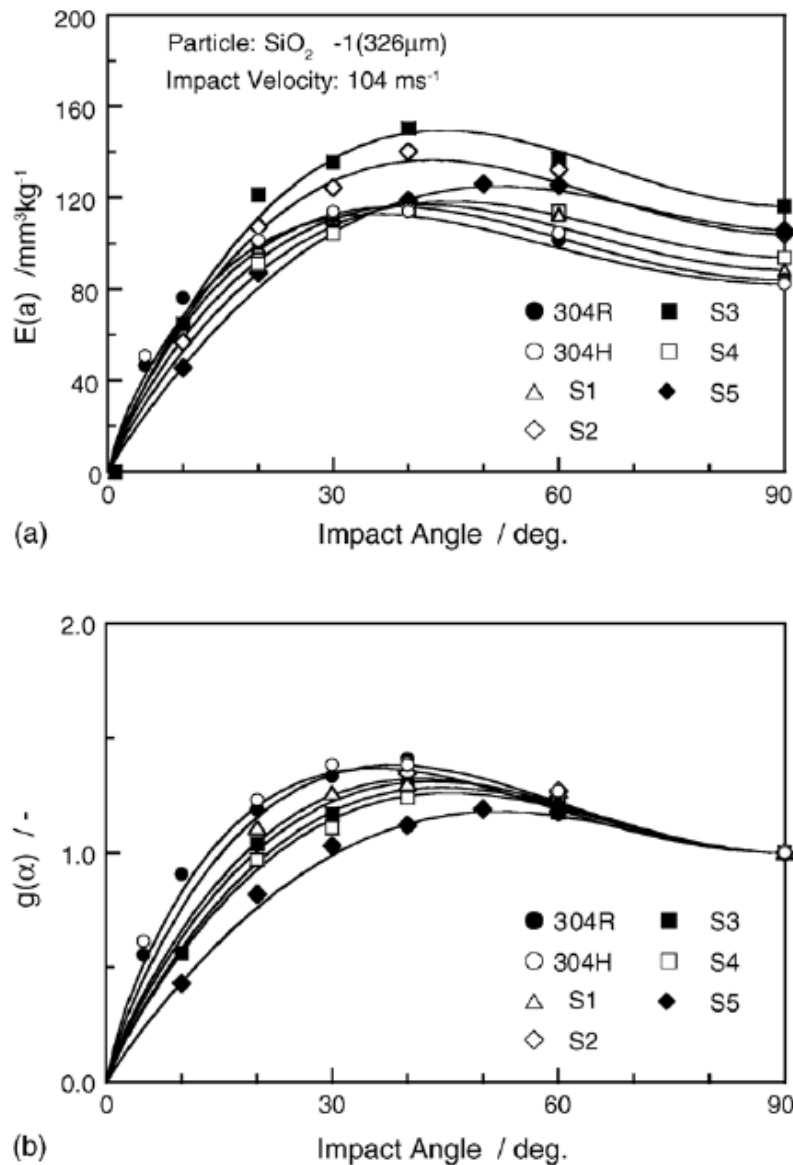
Gráfica 5: Tipos de deformación por impacto según Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T (Traducido).

El equipo de Oka usó un equipo de arenado conformado por un tanque bajo presión, una válvula, una tobera y un portador de especímenes. La velocidad de partículas fue controlada por el flujo de aire que pasaba por el tubo de aceleración en conjunto con la presión, controlando el ángulo de impacto en una placa plana de 5 a 90° a través del portador de especies (PRACTICAL ESTIMATION OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT PART 2: MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS DIRECTLY ASSOCIATED WITH EROSION DAMAGE, 2005).

Los ensayos fueron realizados con partículas de óxido de silicio, carburo de silicio y pellets de vidrio, el intervalo de velocidades es de 50 a 150 m/s y el diámetro de partículas desde 49 a 428 micras. La diferencia entre las dos partículas de óxido de silicio son que la primera tiene ángulos más agudos que la segunda.

El equipo de Oka optó primero por encontrar la tasa de erosión en ángulo normal (E_{90}), siendo primer término de la ecuación (2.13) usando óxido de silicio a una velocidad de 104 m/s y derivó la función ángulo de impacto ($g(\alpha)$), como muestra la Gráfica 6:



Gráfica 6: Dependencia del ángulo de impacto con el desgaste por erosión para varios aceros según Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

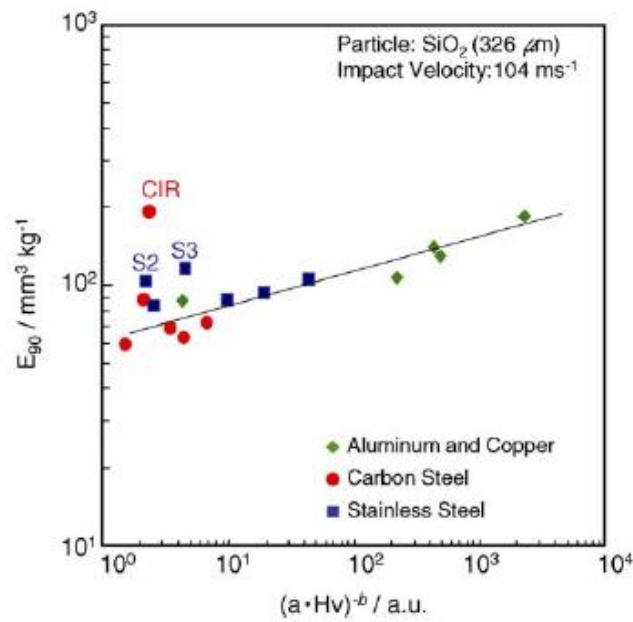
Donde los aceros usados en los especímenes son los siguientes:

Material	Designación	Densidad (kg/m ³)	Hv (GPa)
AISI 304 austenítico	304R	7890	2.90
AISI 304 autenítico recocido	304H	7890	1.80
Ferrita + Austenita	S1	7730	3.82
Austenita	S2	7930	4.41
Martensita	S3	7740	4.46
Martensita	S4	7670	4.87
Martensita	S5	7670	6.5

Tabla 1: Materiales de especímenes usados en el modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

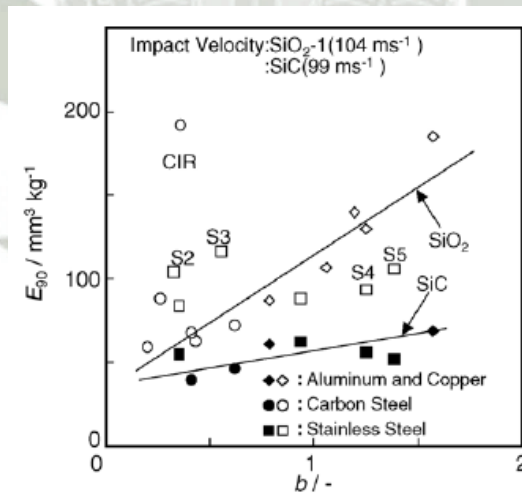
Para encontrar las constantes y variables del modelo propuesto se realizaron varios ensayos para determinar el comportamiento que tienen según el material del espécimen.



Gráfica 7: Correlación entre tasa de erosión y $K(aHv)^b$ del modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

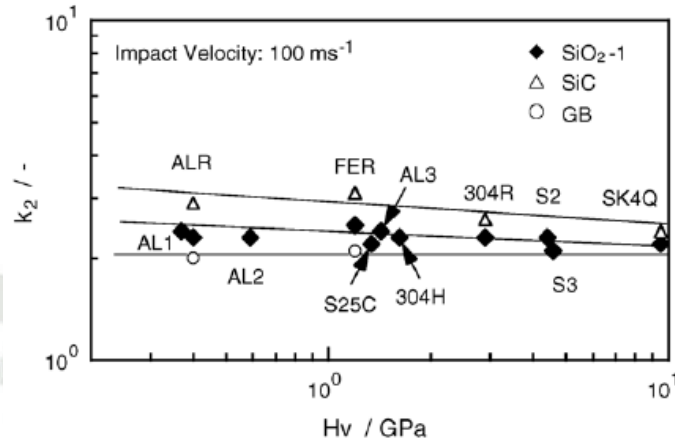
Donde se utiliza constantes de material, tamaño de partícula y velocidad.



Gráfica 8: Correlación entre tasa de erosión y b del modelo de Oka.

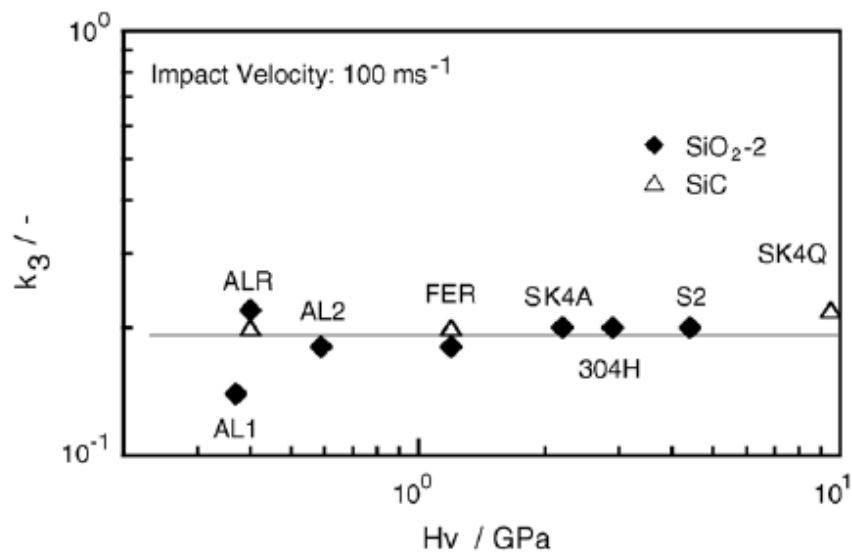
FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

Donde en la Gráfica 8 la pendiente es la constante K y en la Gráfica 9 la pendiente es la constante b .



Gráfica 9: Correlación entre la dureza del material objetivo y la constante k_2 del modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.



Gráfica 10: Correlación entre dureza y la constante k_3 del modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

Como se puede observar la constante k_3 no tiene alguna variación con la dureza del material, el resumen de las constantes se puede encontrar en la siguiente tabla:

Partícula	K	k1	k2	k3	V' [m/s]	d' [micras]
SiO ₂ -1	65	-0.12	$2.3(Hv)^{0.038}$	0.19	104	326
SiO ₂ -2	50	-0.12	$2.3(Hv)^{0.038}$	0.19	104	326
SiC	45	-0.05	$3.0(Hv)^{0.085}$	0.19	99	326
Pellets	27	-0.16	2.1	0.19	100	200

Tabla 2: Constantes y exponentes para ecuación erosión normal en el modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

Adicionalmente añadió como constante las velocidad y diámetro de partícula con las que se experimentó, sustituyendo los términos V y D por (V/V') y (d/d') respectivamente. Los valores de V' y d' se pueden encontrar en la Tabla 2, quedando la ecuación de tasa de erosión normal de la siguiente manera.

$$E_{90} = K(Hv)^{k_1} \left(\frac{V}{V'}\right)^{k_2} \left(\frac{d}{d'}\right)^{k_3} \quad \text{Eq. (2.14)}$$

Después de haber hallado las constantes del componente normal de la erosión

Los valores de n_1 y n_2 se pueden encontrar mediante la siguiente ecuación:

$$n_1, n_2 = s(Hv)^q \quad \text{Eq. (2.15)}$$

Los valores de las constantes s y q se pueden encontrar en la Tabla 3, siendo Hv la dureza Vickers del material objetivo en [Gpa].

Partícula	n ₁		n ₂	
	s	q	s	q
SiO ₂	0.71	0.14	2.4	-0.94
SiC	0.71	0.14	2.8	-1.00
Pellets	2.8	0.41	2.6	-1.46

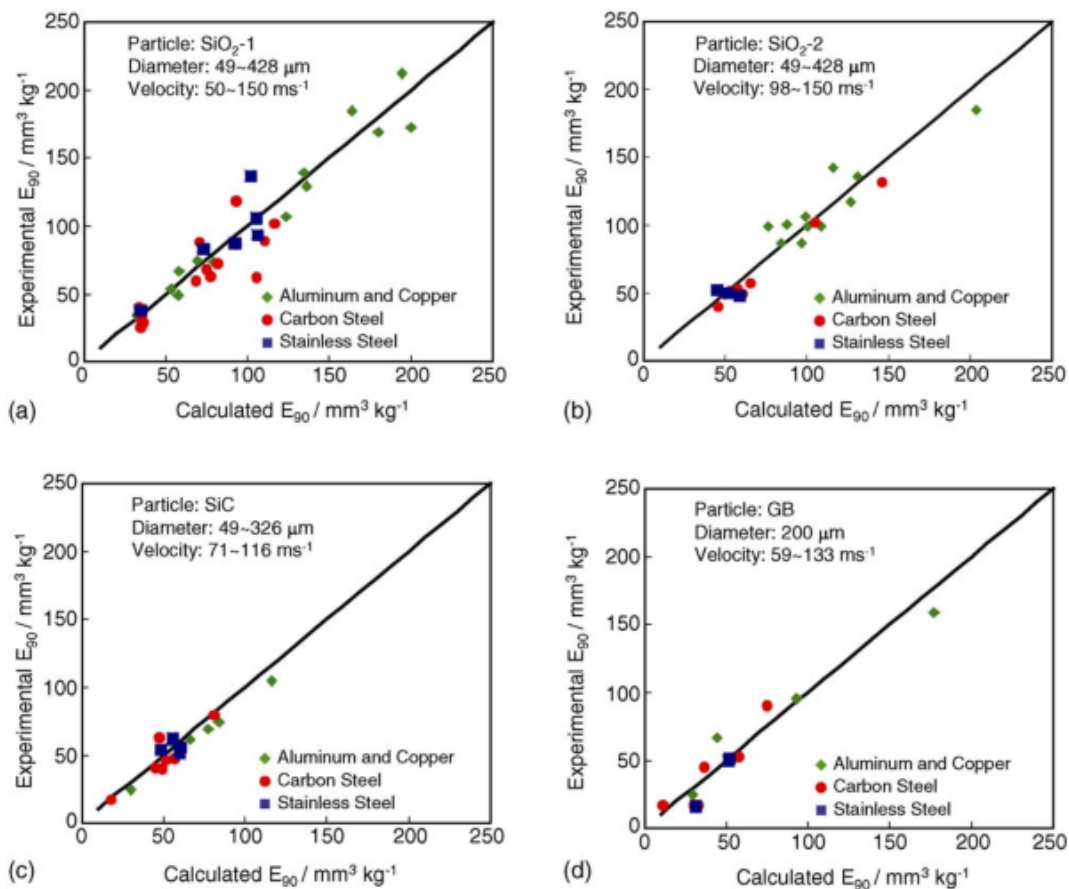
Tabla 3: Constantes y exponentes para función ángulo de impacto en el modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

La dureza Vickers esta expresada normalmente en unidades HV y se puede expresar en unidad de esfuerzo (Gpa) mediante la siguiente formula:

$$HV_{GPa} = \frac{HV}{0.009807} \quad \text{Eq. (2.16)}$$

Es modelo probó tener una excelente correlación entre los resultados experimentales y la predicción en base a la ecuación propuesta, como se puede apreciar en la Gráfica 11:



Gráfica 11: Relación de resultados experimentales con la ecuación predictiva del modelo de Oka.

FUENTE: Practical estimation of erosion damage caused by solid particle impact Part 1: Effects of impact parameters on a predictive equation. Oka Y.I., Okamura K. y Yoshida T.

Según su estudio (THE IMPACT ANGLE DEPENDANCE OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT, 2005) no existe dependencia de la tasa de erosión con el tiempo. El modelo de Oka define la remoción de volumen de material objetivo por unidad de masa de erosivo, de esta manera para obtener la tasa de erosión por tiempo se multiplica el flujo másico de partículas erosivas:

$$W_{OKA} = ER\dot{m}_p = E_{90}g(\alpha)\dot{m}_p \quad \text{Eq. (2.17)}$$

Donde:

W_{OKA}	Tasa de remoción de material a través del tiempo [mm ³ /hr]
ER	Tasa de erosión volumétrica de Oka [mm ³ /kg]
\dot{m}_p	Flujo másico de material erosivo [kg/hr]

2.2 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE BOMBAS PARA TRANSPORTE DE SLURRY

SLURRY SYSTEM HANDBOOK (Abulnaga, 2002) y **CENTRIFUGAL PUMPS** (Gulich, 2008)

coinciden que el número de álabes del impulsor no debería ser mayor a 5 para reducir el efecto de bloqueo y por lo tanto un aumento de velocidad absoluta dentro del impulsor. Se recomienda el número de álabes de 3 a 5.

Además, el número de álabes está influenciada por la necesidad de mantener un flujo suave con el fin de evitar pulsaciones y sobrepresiones, se puede estimar mediante la siguiente ecuación

$$Z = \frac{2\pi r_2 \sigma}{l} \quad \text{Eq. (2.18)}$$

Donde

l Es la longitud de álabes [m]

σ Es el coeficiente de solidez que tiene un rango de 1.8 para bombas de baja velocidad específica hasta 0.9 para velocidades específicas altas.

En **CENTRIFUGAL PUMPS** (Gulich, 2008) recomienda que la velocidad tangencial en el diámetro exterior del impulsor no debe ser mayor a la siguiente relación:

$$u_{2,max} = u_{2,ref} \left\{ 1 - 0.44 \left(\frac{C_w}{1 - C_w} \frac{d_s}{d_{ref}} \right)^{0.33} \right\} \quad \text{Eq. (2.19)}$$

Donde:

$u_{2,ref}$ Velocidad de referencia para la ecuación igual a 47 m/s para materiales metálicos y 31 m/s para materiales recubiertos con caucho.

d_s Diámetro promedio de partícula en mm

d_{ref} Diámetro promedio de partícula referencial igual a 1mm.

Según su análisis los puntos críticos de erosión son el plato de superior en el ojo de succión, en la cara de presión de alabe en la salida y en la voluta donde el fluido se corta.

2.3 DESGASTE POR EROSIÓN EN BOMBAS PARA TRANSPORTE DE SLURRY

El modelo presentado en **CENTRIFUGAL PUMPS** (Gulich, 2008) sirve para estimar la erosión en partes específicas de la bomba:

$$\frac{ER_a}{ER_{a,ref}} = \frac{F_{Form} F_{Mat} F_{KG} F_{KF} F_{HS}}{1 + \frac{c_s}{\rho_s}} \left(\frac{c_{s,eq}}{c_{s,ref}} \right) \left(\frac{w_{mix}}{w_{ref}} \right)^3 \quad Eq. (2.20)$$

$$c_s = \frac{C_w}{1 - C_w} \rho \quad Eq. (2.21)$$

$$c_{s,eq} = c_s \left(\frac{H_{Mat}}{H_{Quar}} \right) \quad Eq. (2.22)$$

$$w_{mix} = u_2 - c_{2u} \quad Eq. (2.23)$$

$$F_{Mat} = 0.54 \frac{H_{Ref}}{H_{Mat}} - 0.22 \quad Eq. (2.24)$$

$$F_{KG} = \frac{d_s}{d_{ref}} \quad Eq. (2.25)$$

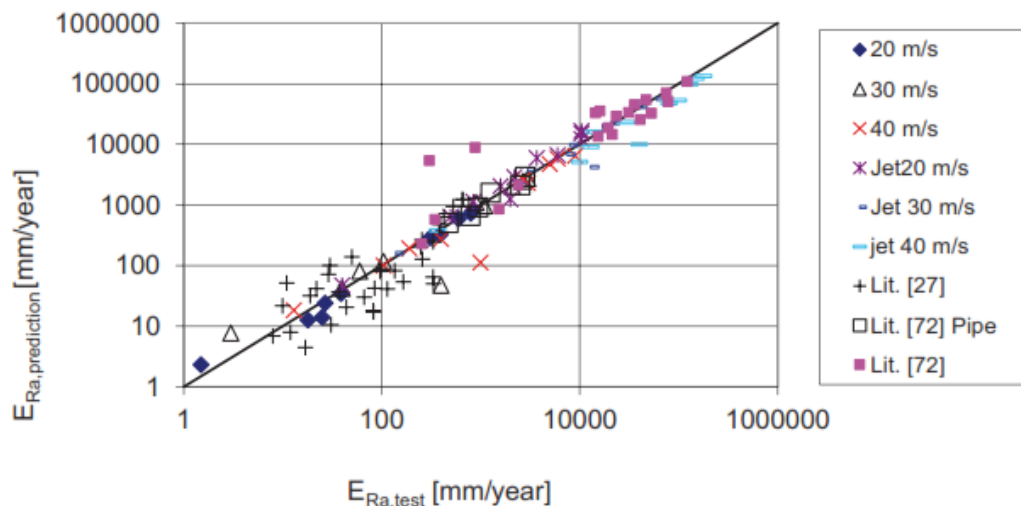
Donde:

ER_a Tasa de erosión [mm/año].

$ER_{a,ref}$ Tasa de erosión de referencia igual a 1 mm/año.

F_{Form}	Factor de forma con valor entre 20 y 60 para la cara del álabe.
F_{Mat}	Factor de dureza del material del impulsor.
F_{KG}	Factor geométrico de la partícula erosiva.
F_{KF}	Factor de forma de la partícula erosiva cuyo valor va desde 0.6 para granos redondos a 1 para granos con ángulos agudos.
F_{HS}	Factor de dureza de la partícula erosiva entre 0.1 a 0.5
ρ_s	Densidad de las partículas erosivas [kg/m ³]
$C_{s,eq}$	Contenido de sólidos equivalentes por volumen de agua [kg/m ³].
$C_{s,eq}$	Contenido de sólidos equivalentes según dureza por volumen de agua [kg/m ³].
$C_{s,ref}$	Contenido de sólidos por volumen de agua de referencia igual a 1 kg/m ³ .
w_{mix}	Velocidad de la mezcla [m/s].
w_{ref}	Velocidad de la mezcla de referencia igual a 10 m/s.
u_2	Velocidad angular en la salida del impulsor [m/s].
C_{2u}	Componente tangencial de la velocidad absoluta [m/s].
C_w	Concentración por peso [kg/kg]
H_{Ref}	Dureza Vickers de referencia igual a 700HV
H_{Quar}	Dureza del Cuarzo equivalente a 1150HV
H_{Mat}	Dureza Vickers del material del impulsor.
d_s	Diámetro promedio de partícula [mm].
d_{ref}	Diámetro promedio de partícula de referencia igual a 1mm.

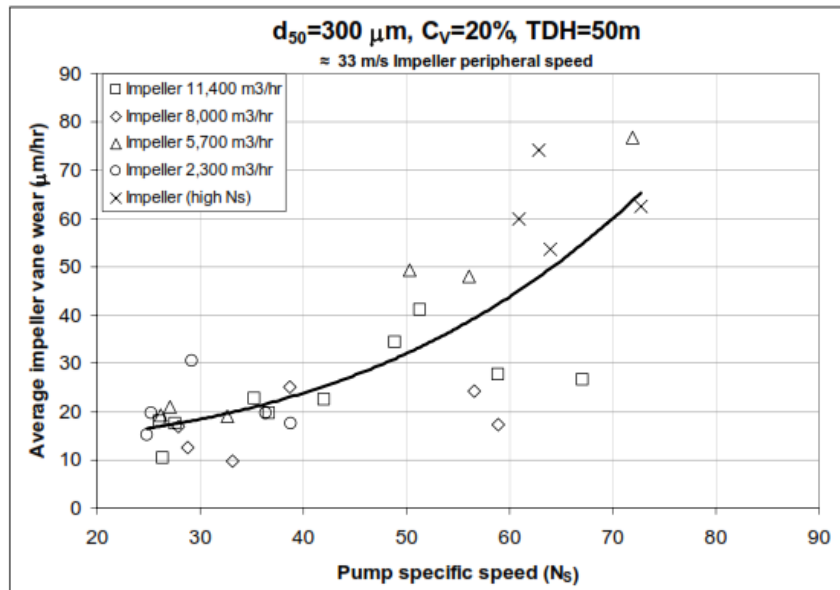
El resultado de esta ecuación es la máxima remoción de material que sufre el material de álabe y nos servirá para comparar el resultado de esta tesis con resultados ya comprobados. La experiencia de Gulich tuvo buenos resultados comparando su modelo con los resultados experimentales:



Gráfica 12: Comparación entre resultados experimentales y obtenidos a través del modelo predictivo según Gulich

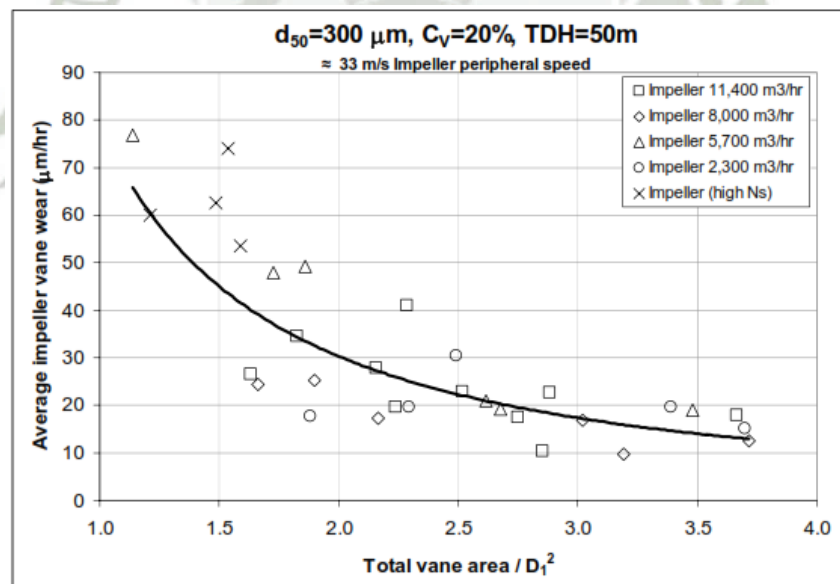
FUENTE: Centrifugal Pumps, Gulich, Friederich.

En 2005 **A. Sellgren** (PREDICTION OF SLURRY PUMP COMPONENT WEAR AND COST, 2005) presento varios resultados de erosión en bombas para slurry a partir del análisis operacional en laboratorio de 41 bombas con flujos desde 2271 hasta 20100 m³/hr y diámetros de impulsor desde 21 hasta 91 pulgadas. Se obtuvieron resultados para erosión en la boca de succión, en la carcasa y en el impulsor para diferentes concentraciones de arena. La limitación al comparar con los resultados de Sellgren es que especifica que las bombas usadas son de metal sin revestimiento, pero no especifica claramente qué tipo de acero está usando.



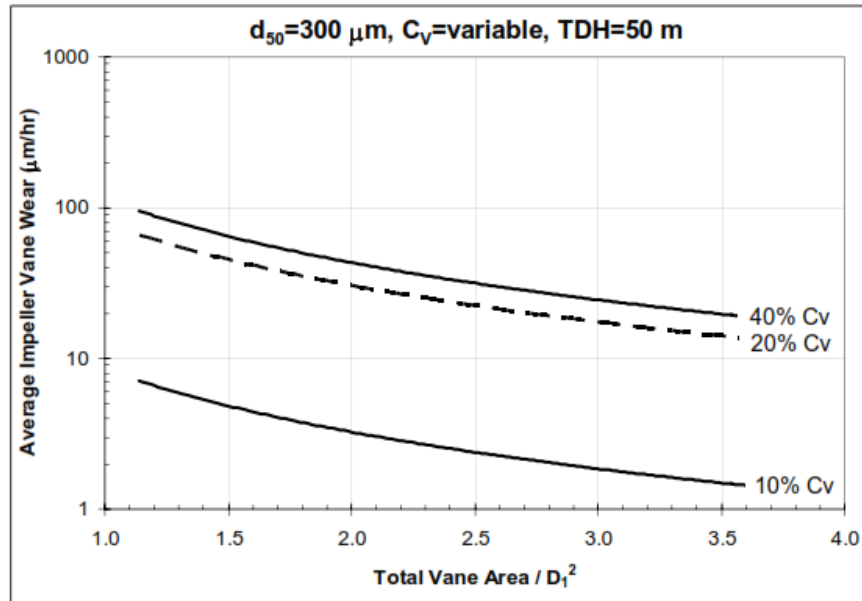
Gráfica 13: Tasa de erosión del álabe del impulsor comparado con la velocidad específica de la bomba según Sellgren.

FUENTE: Prediction of slurry pump component wear and cost, A. Sellgren, G. Addie, R. Visintainter, K. Pagalthivarthi.



Gráfica 14: Tasa de erosión del álabe del impulsor según Sellgren.

FUENTE: Prediction of slurry pump component wear and cost, A. Sellgren, G. Addie, R. Visintainter, K. Pagalthivarthi.



Gráfica 15: Tasa de erosión del álabe del impulsor comparado con la concentración por volumen de arena según Sellgren.

FUENTE: Prediction of slurry pump component wear and cost, A. Sellgren, G. Addie, R. Visintainter, K. Pagalthivarthi.



CAPITULO III: TEORÍA DE BOMBAS CENTRIFUGAS

3.1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de transporte de fluidos ha sido esencial para la humanidad, no solo en el desarrollo y revolución industrial, sino para que este pueda subsistir en zonas escasas de agua necesaria para cultivo o para consumo humano. Para mover una cantidad de fluido de un punto a otro es necesario transferirle energía a través de una máquina hidráulica para que el fluido pueda vencer la gravedad y pérdidas por fricción.

El primer mecanismo inventado por el hombre para aumentar el potencial de un fluido fue el tornillo de Arquímedes, descrito en el siglo III a.C. La idea de la bomba centrífuga nació en el siglo XVII a partir de las ecuaciones de Euler y Bernoulli, estas bombas transmiten la energía del fluido mediante grandes velocidades de giro de un impulsor que solo se pudieron emplear con la invención de los motores eléctricos y de combustión interna en el siglo XX. A partir de este momento las bombas centrífugas se abrieron campo en los procesos industriales siendo a veces componentes de elevada criticidad y componentes únicos en los sistemas de producción como el caso de bombas multietápicas de alimentación de calderos en centrales termoeléctricas, bombas revestidas para slurry en movimiento de concentrado, desechos mineros o bombas sanitarias monoetápicas horizontales en producción de leche o cerveza.

Las bombas centrífugas o también llamadas rotodinámicas tienen un valor técnico elevado por su versatilidad, rango de aplicaciones, costo inicial y de operación,

facilidad de mantenimiento y relativa simplicidad frente a las bombas de desplazamiento positivo. Además, se estima que el mercado mundial de bombas centrífugas y repuestos esta alrededor de 20 mil millones de dólares (Gulich, 2008), desde bombas con fracción de watts de potencia usadas en circulación en torres de refrigeración hasta bombas-turbina en centrales hidroeléctricas de almacenaje de hasta 250 mega watts.

Aunque existen las bombas de desplazamiento positivo, en esta tesis solo nos centraremos en la teoría, tipos y principio de funcionamiento de las bombas centrífugas.

3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento de las bombas centrífugas se basa en la transferencia de energía mecánica del impulsor al agua para transformarla en energía de presión. La energía que se transforma por unidad de volumen representa las altura geodésica y pérdidas por unidad de volumen que tiene que vencer como resultado de la fricción del fluido con accesorios y tubería. La potencia que desarrolla la bomba es transferida a través de un eje (un caso especial serían las bombas acopladas magnéticamente) usualmente conectadas a un motor eléctrico o de combustión interna.

El impulsor es la parte principal de la bomba, el cual gira a altas velocidades para transferirle energía al fluido para luego ser despedido a través de la voluta en forma de caracol, la cual aumenta parcialmente su energía de presión y lo direcciona. El fluido se aproxima al impulsor en forma axial al eje de rotación, pasa por entre los álabes y sale en forma radial, diagonal o axial según la construcción del impulsor.

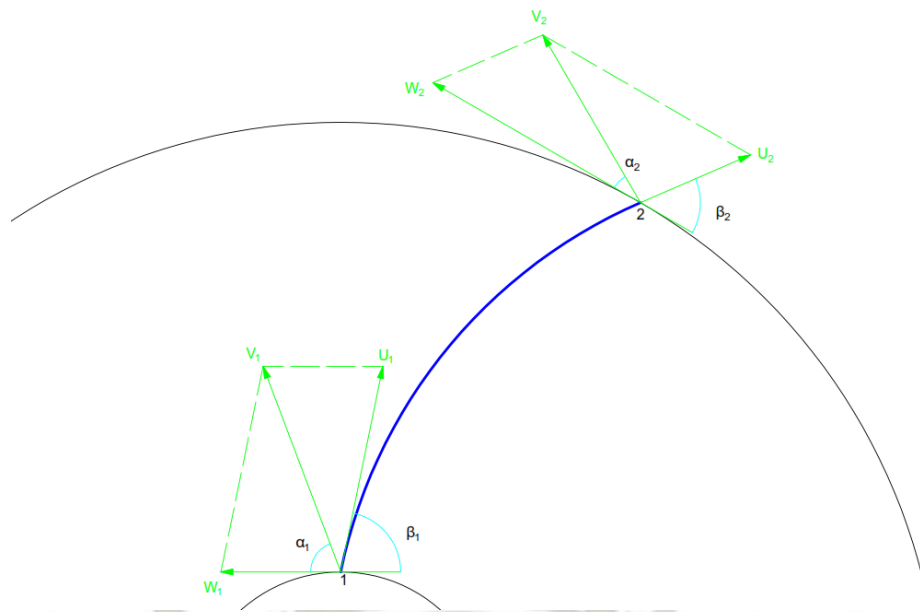
3.2.1 Ecuación Ideal de Euler para turbomáquinas

En el siglo XVIII, Leonhard Euler desarrolló la ecuación ideal para bombas rotodinámicas a partir de la ecuación de conservación de momento angular de Newton y considerando las siguientes hipótesis:

- I. Flujo incompresible $\rho = cte$
- II. Flujo permanente $\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = 0$
- III. No existe pérdidas por fricción, recirculación ni choques $\eta = 100\%$
- IV. Se considera un número infinito de álabes de espesor cero. Esto significa que el flujo recorre perfectamente el trayecto desde el ojo de succión hasta la descarga.

El movimiento del líquido dentro del impulsor se puede considerar como el resultado de la suma de la velocidad tangencial (dependiente de la velocidad rotación del impulsor) y el relativo (también llamado meridional dependiente del caudal) al impulsor. Las magnitudes de estos dos movimientos están en referencia a el ángulo de entrada y salida del impulsor como se puede apreciar el siguiente gráfico:





Gráfica 16: Vector de velocidades en el impulsor

FUENTE: Elaboración propia.

$$\vec{v}_{1,2} = \vec{u}_{1,2} + \vec{w}_{1,2}$$

Eq. (3.1)

Donde:

- $\vec{v}_{1,2}$ Vector velocidad absoluta.
- $\vec{u}_{1,2}$ Vector velocidad tangencial.
- $\vec{w}_{1,2}$ Vector velocidad relativa.
- α Ángulo del vector velocidad absoluta.
- β Ángulo de ataque del álabe.

La vista del observador se fija en el impulsor, es decir, rota junto a este. La segunda ley de Newton para conservación del momento es la siguiente:

$$\sum \mathbf{T} = \iiint \frac{\left(\frac{\partial \rho r \omega}{\partial t}\right)}{dV} + \iint (\rho r \omega) dQ$$

Eq. (3.2)

Donde:

ΣT Sumatoria de torque mecánico por unidad de masa.

ρ Densidad del fluido.

r Radio.

ω Velocidad angular.

dV Diferencial de volumen en el volumen de control.

dQ Diferencial de caudal en la superficie de control.

El fluido se considera incompresible por lo que el termino de volumen de control se considera despreciable, por lo tanto, no existe variación de volumen en el fluido.

Desarrollando la integral de superficie, la ecuación (II) quedaría de la siguiente manera:

$$T = \rho Q (v_2 \cos \alpha_2 r_2 - v_1 \cos \alpha_1 r_1) \quad \text{Eq. (3.3)}$$

La ecuación de potencia es la siguiente:

$$P = T\omega = \gamma Q H_{teo} \quad \text{Eq. (3.4)}$$

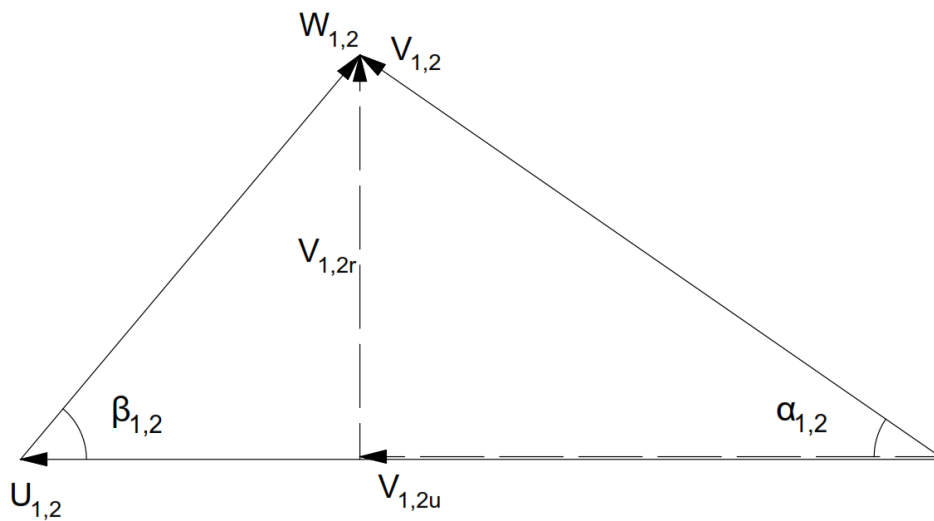
Donde:

P Potencia [HP, Kw]

γ Peso específico [lbf/ft³, N/m³].

H_{teo} Altura teórica [ft, m].

Desarrollando aún más el triángulo de velocidades inicial y final tenemos:



Gráfica 17: Triángulo de velocidades en entrada y salida al álabe.

FUENTE: Elaboración propia.

$$v_{1u} = v_1 \cos \alpha_1 \quad \text{Eq. (3.5)}$$

$$v_{2u} = v_2 \cos \alpha_2 \quad \text{Eq. (3.6)}$$

$$u = \omega r \quad \text{Eq. (3.7)}$$

Reemplazando la ecuación (III) en (IV) y desarrollando con (V), (VI) y (VII) se tiene:

$$H_{teo} = \frac{1}{g} (u_2 v_{2u} - u_1 v_{1u}) \quad \text{Eq. (3.8)}$$

La ecuación (VIII) es la fundamental de las bombas centrífugas denominada generalmente como "Altura de Euler", a partir de esta fórmula ideal podemos sacar las siguientes conclusiones:

- El término $u_1 v_{1u}$ es anulado cuando $\alpha = 90^\circ$ ya que se considera durante este análisis que todo flujo entra de forma axial a la bomba, es decir, entra por el

ojo de succión y pasa inmediatamente a los álabes, si necesidad de que exista una deflexión del flujo a causa del ángulo de entrada del álabe.

- La altura de la bomba no depende de la gravedad específica del líquido.
- Para lograr grandes alturas se necesita una gran velocidad de rotación.
- Un valor elevado de v_{2u} permite alcanzar mayores alturas, este se consigue con una mejor geometría del impulsor

De la Gráfica III-2 se tiene

$$v_{2u} = u_2 - v_2 \cot \beta_2 \quad \text{Eq. (3.9)}$$

El caudal del líquido a través del impulsor puede expresarse por las componentes radiales y las dimensiones de la misma manera:

$$Q = 2\pi r_2 b_2 v_{2u} \quad \text{Eq. (3.10)}$$

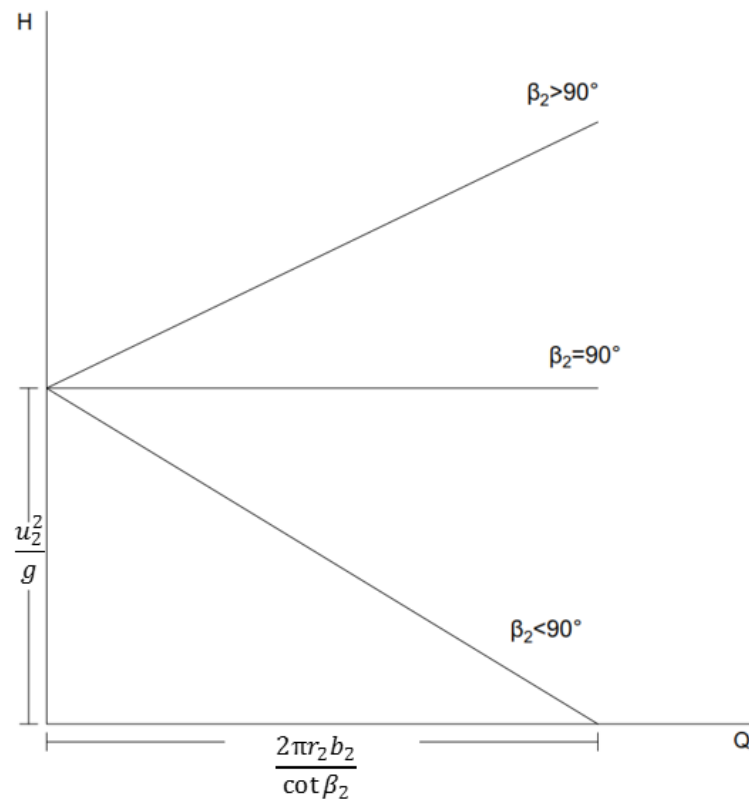
Donde

b_2 Altura del impulsor visto desde el plano superior.

Reemplazando y desarrollando (IX) y (X) en (VIII):

$$H_{teo} = \frac{u_2}{g} \left(u_2 - \frac{Q \cot \beta_2}{2\pi r_2 b_2} \right) \quad \text{Eq. (3.11)}$$

Esta ecuación (XI) permite trazar la curva característica ideal de la bomba para un caudal variable, una velocidad angular y diámetro de impulsor constante. Se puede observar en la gráfica siguiente que el dato más relevante en el diseño de un impulsor es el ángulo de salida del álabe β_2 .



Gráfica 18: Ángulos característicos para β_2 en bombas centrífugas

FUENTE: Elaboración propia.

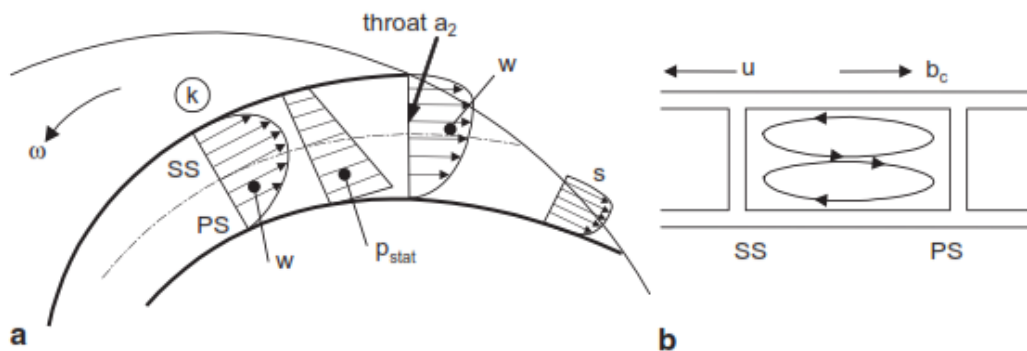
Se puede observar que con un ángulo mayor a 90° la altura teórica aumenta con el caudal, esto en la práctica hace que se formen remolinos y recirculación lo que hace que sean muy ineficientes. El álabe más usado es el inclinado con ángulos menores a 90° , teniendo mejores rendimientos entre los 15 a 45° y comúnmente usados entre 20 y 27° (Gulich, 2008) dependiendo de las características de la bomba. El ángulo igual a 90° es usado en ventiladores, sopladores y bombas tipo vortex.

Como se mencionó antes, la ecuación de Euler tiene varias limitaciones, pero nos da una introducción al comportamiento de la mecánica de las turbomáquinas y la influencia de la geometría del impulsor para predecir su funcionamiento. Dadas las

limitantes este tipo de análisis también es llamado “análisis unidimensional de las turbomáquinas”.

3.2.2 Efecto de deflexión del fluido por numero finito de álabes

En análisis unidimensional se considera el flujo que atraviesa el impulsor es constante en todas sus partes porque se consideran que existen “infinitos álabes de espesor despreciable” que llevan al fluido por una trayectoria paralela a la geometría del álabe y no se ve afectado por la fricción en la superficie de este. Esto en la práctica es poco real como se puede observar en la siguiente gráfica:



Gráfica 19: Flujo en el canal de los álabes A) flujo entre álabes B) flujo secundario

FUENTE: Centrifugal Pumps, Gulich, Friederich.

A partir de esta gráfica se considera lo siguiente:

- El momento del álabe origina zonas de presión en la cara del álabe (en la gráfica denominada *PS* por *Pressure Side*) y zonas de succión en la parte posterior (denominada *SS* por *Suction Side*) que provocan distribución de velocidades en el fluido diferentes a lo largo del plano meridional.

- El efecto Coriolis, mostrado en la parte *b*) de la Gráfica III-4 que transporta el fluido hacia el lado de la presión, reduciendo la velocidad relativa y conjuntamente el ángulo β_2 .
- La presión estática en el impulsor a lo largo del eje meridional es diferente ya que el fluido es conducido mejor en zona de presión del álabe (el fluido es tangente al álabe) produciendo diferente perfil de velocidades relativas.

El conjunto de estos efectos es llamado “efecto de deslizamiento” o “slip factor”. El efecto deslizamiento afecta al ángulo β_2 , que como se ha concluido anteriormente es uno de los principales factores que determinan el funcionamiento de las bombas centrífugas.

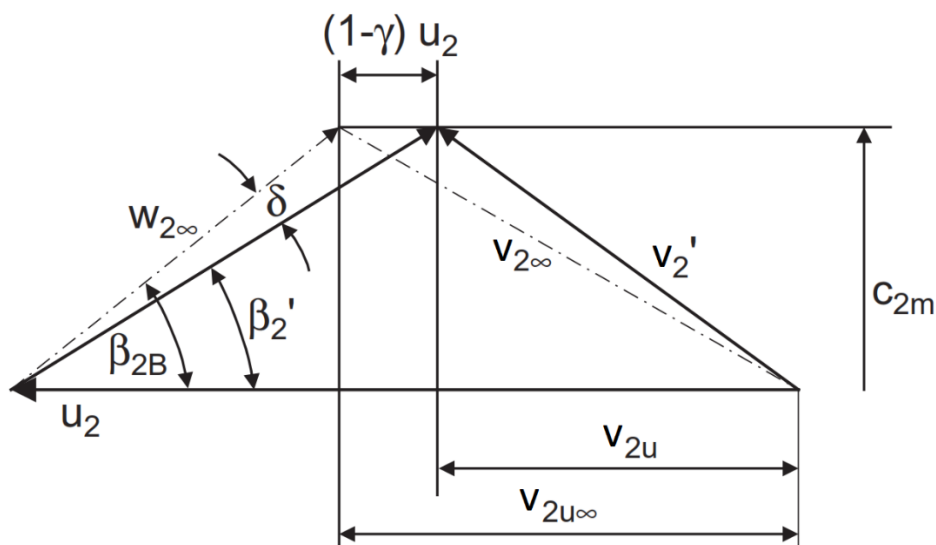
Este factor no puede ser calculado de manera analítica y se necesitan datos empíricos para cada diseño de impulsor y es calculado para el punto de mejor eficiencia BEP, de allí la necesidad de que las bombas centrífugas trabajen en este punto. El deslizamiento se define de la siguiente manera:

$$v_{2u\infty} - v_{2u} = (1 - \gamma)u_2 \quad \text{Eq. (3.12)}$$

Donde:

$v_{2u\infty}$ Velocidad absoluta ideal (álabes infinitos).

γ Factor de deslizamiento.



Gráfica 20: Efecto de deslizamiento en ángulo de salida del álabe.

Fuente: Elaboración propia

Cuando el factor de deslizamiento es $\gamma = 1$ es el deslizamiento definido como $(1 - \gamma)$ es cero y por lo tanto el perfil de velocidades del flujo es constante a lo largo del recorrido del impulsor.

Una buena aproximación para el cálculo de deslizamiento es la fórmula de Wiesner y Stondola (Wildredo, 1998) respectivamente:

$$\gamma = 1 - \frac{\pi \sin \beta_2}{Z} \quad \text{Eq. (3.13)}$$

$$\gamma = 1 - \frac{\sqrt{\sin \beta_2}}{Z^{0.7}} \quad \text{Eq. (3.14)}$$

Donde:

Z Numero de álabes.

Según Gulich (Gulich, 2008) la ecuación de Wiesner es la más acertada teniendo una desviación del 5%, lo que significa que tiene alrededor de 95% de confiabilidad.

Considerando que incertidumbres son esperadas durante la predicción del comportamiento del flujo en los impulsores, aun es necesario realizar pruebas experimentales y con CAD en los puntos de máxima eficiencia de la bomba.

3.2.3 Efecto de espesor de Álabes

La ecuación ideal de Euler para las maquinas rotodinámicas no considera el efecto que tiene un espesor real de los álabes, a este efecto se le denomina “bloqueo” y afecta en cantidades diferentes a la velocidad en la entrada y salida del impulsor dependiendo de la geometría del impulsor en la parte inter y externa. Está definida como:

$$v'_{1,2} = v_{1,2}\tau_{1,2} \quad \text{Eq. (3.15)}$$

$$\tau_{1,2} = \left\{ 1 - \frac{ze_{1,2}}{\pi d_{1,2} \sin \beta_{1,2} \sin \lambda_{1,2}} \right\}^{-1} \quad \text{Eq. (3.16)}$$

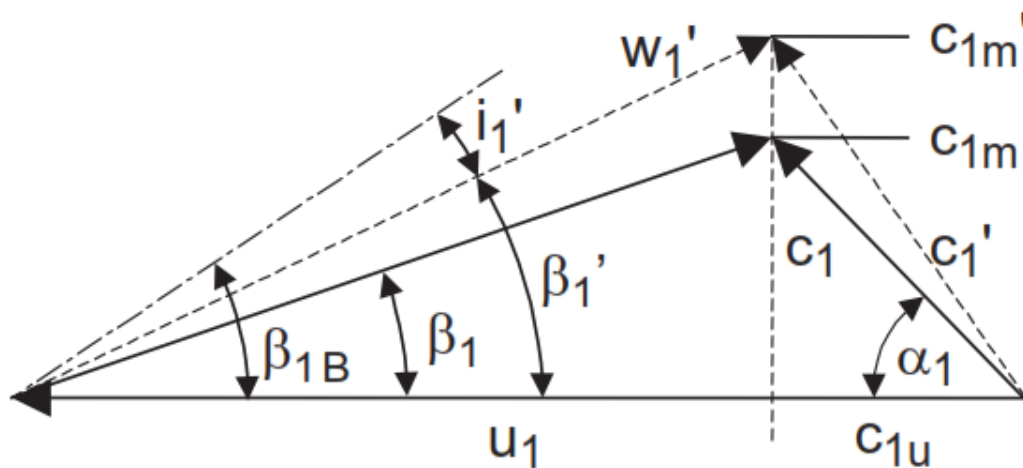
Donde:

$e_{1,2}$ Espesor del álabe en la entrada y salida [mm].

$\lambda_{1,2}$ Ángulo entre cubierta y álabe

$d_{1,2}$ Diámetro interno y externo del impulsor[mm].

La velocidad absoluta afectada por el bloqueo es mayor que la velocidad teórica ya que $\tau > 1$, esto se debe a que existe menor área por la que pasa el fluido entre los álabes, y por lo tanto la velocidad relativa aumenta.



Gráfica 21: Efecto de efecto de bloqueo en el triángulo de velocidades.

Fuente: Elaboración propia

La diferencia entre los ángulos $\beta_{1,2}$ y $\beta'_{1,2}$ se le denomina incidencia definida como $i'_{1,2}$. Cuando esta cantidad es igual o parecida a cero, se conoce como succión “sin shock” y ocurre en el punto de máxima eficiencia (BEP). La ubicación de este punto depende los factores combinados de bloqueo y deslizamiento.

3.2.4 Balance de potencia y pérdidas.

Las pérdidas existen en todos los componentes con piezas o fluidos en movimiento. La potencia útil de la bomba siempre es menor a la potencia requerida por la bomba, la diferencia de estas dos cantidades son las pérdidas totales que se disipan en forma de calor y se ven reflejadas en la eficiencia de la bomba, que siempre es menor a 1.

La potencia que requiere una bomba es:

$$P = \frac{\gamma Q H}{\eta_{tot}} \quad \text{Eq. (3.17)}$$

Donde η_{tot} es la eficiencia total que está definida como:

$$\eta_{tot} = \eta_{mec}\eta_{vol}\eta_{hidr}\eta_{rec} \quad \text{Eq. (3.18)}$$

La magnitud de estas pérdidas varía dependiendo la velocidad angular, caudal, y punto de operación, aunque existen aproximaciones para predecir su valor, la eficiencia total es necesariamente determinada empíricamente a través de pruebas en laboratorio, en campo y a través de prototipo y modelo para bombas de mayor tamaño.

3.2.4.1 Pérdidas mecánicas (η_{mec})

Las pérdidas mecánicas son generadas por la fricción en rodajes radiales, axiales, sellos y si la bomba cuenta con elementos de desgaste. En bombas tipo monoblock, tipo sumergibles, cantiléver y de turbina vertical se consideran las pérdidas mecánicas por acoples mecánicos. La eficiencia mecánica esta alrededor del 95% en bombas de potencias elevadas y en bombas pequeñas (menos de 5KW) puede considerarse hasta de 75% para sello mecánico simple y 60% para sello mecánico doble (bombas sumergibles).

Las pérdidas mecánicas son estimadas empíricamente y cuando se hacen pruebas para determinarlas se usa la siguiente ecuación:

$$\eta_{mec} = 1 - \frac{P_{mec}}{P_{total}} = 1 - \frac{KN^n}{P_{total}} \quad \text{Eq. (3.19)}$$

Donde:

η_{mec}	Eficiencia mecánica
P_{mec}	Potencia suministrada [KW, HP].
P_{total}	Potencia requerida [KW, HP].
K	Constante de velocidad, varía dependiendo de la máquina.

- N Velocidad angular [RPM].
- n Exponente de velocidad varia de 1.3 a 1.8.

3.2.4.2 Pérdidas volumétricas (η_{vol})

Son perdidas de fluido por fugas de fluido que no alcanzan la salida de la bomba.

Estas pueden ser:

- Perdidas en el sello (Q_{sello}), sea sello mecánico o empaquetadura, siendo la última de mayor cantidad que la primera. En empaquetaduras y algunos sellos mecánicos es necesario el goteo para reducir perdidas por fricción y extender la vida útil de los empaques. En bombas de potencias elevadas y bombas críticas existen sistemas de circulación externa donde se inyecta agua fresca en sellos mecánicos o empaquetaduras, en este caso la magnitud del caudal es negativo y se puede considerar despreciable.
- Perdidas por recirculación entre la descarga y la succión (Q_{recir}) se encuentran en bombas de voluta y de impulsor abierto y semi-abierto. En la primera es despreciable en punto de operación cercanos al BEP y se incrementa a medida que disminuye el caudal, teniendo un máximo cuando no circula caudal alguno, esto causa shock, vibración y en algunos casos cavitación. En bombas de impulsor semi abierto y abierto son de cantidad considerable y tienen efecto en la forma de la curva de operación, es por esto que bombas de slurry, de dewatering, desagüe y de impulsor tipo vortex tienen bajas eficiencias.

Las pérdidas volumétricas se son parte de la curva eficiencia general de la bomba, quiere decir que los proveedores no proporcionan el valor., se pueden definir de la siguiente manera:

$$\eta_{vol} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{Q_{\acute{u}til} + Q_{sello} + Q_{recir}} \quad \text{Eq. (3.20)}$$

Donde:

η_{vol} Eficiencia volumétrica

$Q_{\acute{u}til}$ Caudal útil [m³/hr, GPM].

Q_{sello} Caudal de pérdidas en el sello [m³/hr, GPM].

Q_{recir} Caudal de pérdidas en la recirculación [m³/hr, GPM].

3.2.4.3 Pérdidas hidráulicas por fricción (η_{hidr})

Son pérdidas por fricción del fluido en las paredes el impulsor, difusores, tobera y/o voluta. Su aproximación debe ser evaluada a través de CFD o empíricamente. Son parte de la curva eficiencia general de la bomba, quiere decir que los proveedores no proporcionan el valor. Es mayor en cuanto e punto de operación este en los extremos de la curva, ósea en los puntos de bloqueo de caudal o en los puntos de recirculación interna de la bomba.

3.2.4.4 Recirculación (η_{rec})

Son pérdidas de energía potencial del fluido por turbulencia y formación de remolinos dentro del impulsor asociados con el deslizamiento. Son casi nulas en el punto de máxima eficiencia (BEP) y mayores a medida que disminuye el caudal. Son parte de la curva eficiencia general de la bomba, quiere decir que los proveedores no proporcionan el valor.

3.2.5 Coeficientes adimensionales

El análisis dimensional permite describir fenómenos complejos a partir de relaciones que mantienen sus magnitudes físicas en forma de variables independientes y permite cambiar el conjunto original de parámetros de entrada dimensionales de un problema por otro conjunto de parámetros adimensionales más simples.

En las turbomáquinas existen relaciones que permiten predecir el comportamiento cuando se varían uno o más parámetros bajo criterio, como por ejemplo se puede reducir el diámetro del impulsor o variar la velocidad angular con un variador de frecuencia o un motor con más polos, he allí una de las ventajas que tienen las bombas centrífugas que es la flexibilidad que tienen para adaptarse a los requerimientos del sistema de manera económica.

Mientras que el análisis unidimensional ayuda a entender y predecir el comportamiento de diversas variables que influyen en la operación de la bomba, los flujos turbulentos en geometrías complejas no se pueden describir de manera exacta a través análisis matemáticos y se necesitan ensayos con modelos para poder determinarlo.

El comportamiento en la operación de las bombas centrífugas puede basarse en estar relaciones siempre y cuando exista semejanza hidrodinámica. Al existir semejanza hidrodinámica se puede considerar lo siguiente:

- La relación entre pérdidas volumétricas es constante.
- La relación entre pérdidas hidráulicas es constante.
- Las pérdidas mecánicas no son proporcionales entre sí, ya que la fricción en el sello mecánico, en la empaquetadura, y el impulsor con el líquido varían de

manera cuadrática con la velocidad angular. Aun así, se puede considerar que el cambio de proporcionalidad en el rendimiento es mínimo.

3.2.5.1 *Semejanza geométrica:*

Se refiere a semejanza de la geometría y características de los materiales (proporcionalidad de ángulos y dimensiones, rugosidad, densidad del material del impulsor, etc.).

La condición de semejanza geométrica puede ser representada de la siguiente manera:

$$\frac{(u_2)_I}{(u_2)_{II}} = \frac{(v_2)_I}{(v_2)_{II}} \quad \text{Eq. (3.21)}$$

El subíndice I indica la característica del modelo, ósea la condición inicial.

El subíndice II indica la característica del prototipo, ósea la condición final.

3.2.5.2 *Semejanza cinemática:*

Se refiere a proporcionalidad entre las velocidades absolutas del fluido, para que esta condición se cumpla tiene que relación entre la velocidad relativa y velocidad tangencial.

La condición de semejanza cinemática puede ser representada de la siguiente manera:

$$\frac{(u_2)_I}{(u_2)_{II}} = \frac{(v_2)_I}{(v_2)_{II}} = \frac{(v_{2u})_I}{(v_{2u})_{II}} = \frac{(v_{2r})_I}{(v_{2r})_{II}} = \frac{(w_2)_I}{(w_2)_{II}} = \frac{(ND)_I}{(ND)_{II}} \quad \text{Eq. (3.22)}$$

Donde:

N Velocidad angular [RPM].

D Diámetro exterior del impulsor [mm, in].

3.2.5.3 Semejanza dinámica:

Existe semejanza dinámica cuando los números de Euler, Froude y Reynolds son constantes. Esta condición es mayormente utilizada durante el diseño del impulsor.

La condición de semejanza dinámica puede ser representada de la siguiente manera:

$$N^{\circ}Eu = \frac{\Delta P}{\rho v^2} \quad \text{Eq. (3.23)}$$

$$N^{\circ}Fr = \frac{v^2}{gL} \quad \text{Eq. (3.24)}$$

$$N^{\circ}Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \quad \text{Eq. (3.25)}$$

$$\frac{(N^{\circ}Eu)_I}{(N^{\circ}Eu)_{II}} = cte \quad \frac{(N^{\circ}Fr)_I}{(N^{\circ}Fr)_{II}} = cte \quad \frac{(N^{\circ}Re)_I}{(N^{\circ}Re)_{II}} = cte$$

Donde:

ΔP	Diferencia de presiones [Pa].
ρ	Densidad del fluido [kg/m ³].
v	Velocidad característica del fluido [m/s].
D, L	Longitud característica [m].
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²].
μ	Viscosidad cinemática [kg/m.s].

El número de Euler o coeficiente de presión (White, 2008) es importante para mantener el impulsor sin cavitación en aplicaciones con altas caídas de presión.

El número de Froude mide el efecto en la resistencia por fricción de los impulsores en las superficies libres de los álabes y en los platos del impulsor **Máquinas Hidráulicas** (Wildredo, 1998).

El número de Reynolds es el más importante ya que demuestra el régimen del fluido en el impulsor evitando así estelas, remolinos y chorros que pueden representar pérdidas hidráulicas y recirculaciones.

3.2.5.4 Regímenes de trabajo semejantes

Si se consideran regímenes de trabajo semejantes de una misma bomba con velocidad angular diferente, las relaciones de semejanza se simplifican con diámetro y peso específico del fluido.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Eq. (3.26)}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad \text{Eq. (3.27)}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \quad \text{Eq. (3.28)}$$

En caso de que se permita una reducción en el impulsor:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \quad \text{Eq. (3.29)}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \quad \text{Eq. (3.30)}$$

3.2.5.5 Velocidad Específica de las Turbomáquinas

La velocidad específica se define como el número de revoluciones de una bomba semejante a la considerada pero dimensionada para una altura de 1m y un caudal de 1m³/s. Se define de la siguiente manera:

$$N_s = \frac{N\sqrt{Q}}{H^{3/4}} \quad \text{Eq. (3.31)}$$

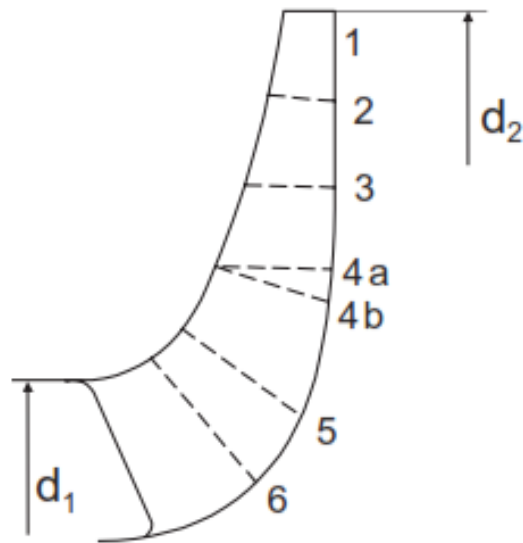
Donde:

N_s	Velocidad específica
N	Velocidad angular [RPM].
Q	Caudal del BEP[m ³ /s].
H	Altura del BEP[m].

La velocidad específica tiene dimensión y unidad sin importancia en los resultados, en países con Sistema Internacional de Unidades se utilizan las unidades descritas líneas arriba, en Estados Unidos de América se usa galones por minuto (GPM) y pies (ft) para caudal y altura respectivamente. El factor de conversión es:

$$N_{sUSA} = 51.64N_s \quad \text{Eq. (3.32)}$$

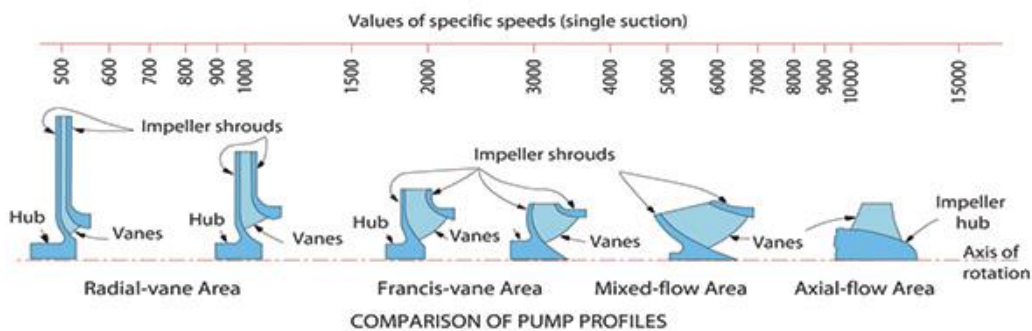
La velocidad específica está en relación a la forma del impulsor. Si un impulsor está diseñado con varios diámetros externos para un caudal y velocidad angular constante, según la ecuación (XXIV), la altura que podrá vencer variará de forma cuadrática en relación al diámetro externo de este. Ya que el caudal y la velocidad angular son constantes, velocidad específica aumenta según el diámetro del impulsor disminuya. En la gráfica se puede observar diversos cortes que se pueden realizar al impulsor, a medida que se hacen más “recortes” el ángulo de salida del impulsor.



Gráfica 22: Corte meridional de un impulsor según velocidad específica.

FUENTE: Centrifugal Pumps, Gulich, Friederich.

La velocidad específica debe ser calculada para el punto de máxima eficiencia (BEP) y por etapa (en el caso de bombas multietápicas) y permite la comparación geométrica de diferentes impulsores para los mismos caudales, alturas y velocidades angulares, esto quiere decir, que para la misma aplicación se puede comparar los impulsores de diferentes marcas y da a conocer el tipo de geometría de impulsor a usar.



Gráfica 23: Velocidades específicas y su relación con la geometría del impulsor.

FUENTE: Pump and Systems Unidades en Sistema Imperial

3.3 TIPOS DE BOMBAS CENTRIFUGAS

Las bombas centrífugas se adaptan a la mayoría de aplicaciones en la industria desde aplicaciones con caudal 1 L/s hasta 60 m³/s, alturas desde 1 a 5000 metros, para diversos fluidos de trabajo como agua, pastas, slurries, hidrocarburos, químicos, alimentos, etc.

3.3.1 Radial

Este tipo de bombas son características de bajos caudales y presiones elevadas, lo que se traduce en velocidades específicas bajas (según (Gulich, 2008) la velocidad específica varía en rango de $7 < N_s < 100$, unidades en sistema internacional) y relaciones de diámetros mayor y menor de 3.5 a 1.5. En caso de que la aplicación necesite de más altura se pueden colocar etapas siguientes a fin de que la velocidad específica no sobrepase valores inferiores y se vea afectada su eficiencia y costo (mayor diámetro del impulsor y/o velocidad angular).

Estos tipos de bombas son las más usadas en la industria como son las monoetápicas horizontales usadas en transporte de agua y fluidos de bajos a medianos caudales caracterizadas por su economía, acceso a equipos y repuestos en el mercado y su facilidad de mantenimiento. En caso de el espacio sea un factor a considerar existen tipos de bombas multietápicas cuyo eje está en posición horizontal, normalmente utilizadas en alimentación de calderos y sistemas de agua caliente.

Otra aplicación de estas bombas es en aplicaciones de transporte de fluidos ligeramente viscosos, contaminados y con residuos como las aguas negras, residuos

mineros y aplicaciones dewatering, especialmente diseñadas con trituradores, agitadores, impulsor recesado o tipo vortex dependiendo de la aplicación.



Gráfica 24: Impulsor radial cerrado

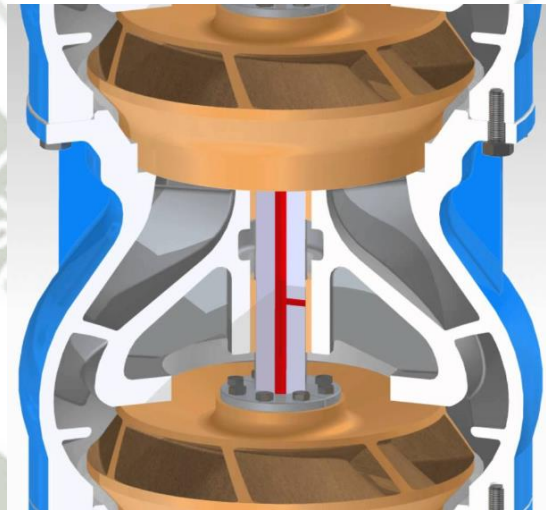
FUENTE: Grundfos.

3.3.2 Flujo Mixto o Semi Axial

Este tipo de bombas se caracterizan por velocidades específicas desde 70 hasta 170 para medianos caudales y medianas alturas, la relación de diámetro mayor y menor va de 1.5 a 1.1. Estas bombas son usadas en aplicaciones donde el espacio horizontal es un factor a considerar y donde la dirección de flujo necesariamente tiene que ser axial. Por ejemplo, bombas de pozo profundo donde existe necesidad económica en diseñar bombas que puedan caber en los pozos y cuya descarga sea en forma axial. También son usadas en aplicaciones donde la bomba tiene limitaciones por altura de succión y NSPH disponible, estas diseñadas para ser sumergidas y ser conectadas a través de un eje largo al motor que está al nivel del suelo, este eje también sirve como tubería para conducir el fluido hacia la “campana de descarga”, estas bombas son

denominadas “turbinas verticales” y se utilizan en lagos artificiales, relaveras y barcazas.

Estas bombas en la mayoría de los casos son multietápicas diseñadas para cumplir con los parámetros y restricciones de dimensión del impulsor y las grandes alturas que caracterizan a las aplicaciones en las que sirven. El flujo es redirigido a través de difusores o “tazas” de un impulsor hacia el siguiente como se puede observar en la siguiente figura:



Gráfica 25: Impulsor de bombas semi axiales en una turbina vertical.

FUENTE: National Pumps.

3.3.3 Axial

También llamadas bombas tipo hélice o propela, son bombas de grandes velocidades específicas (mayores a 170) para grandes caudales y pequeñas alturas, la relación entre diámetro mayor y menor es igual a 1. Su uso como bomba es muy limitado siendo muchas veces reemplazadas por varias bombas semi axiales en paralelo

dependiendo de la aplicación. Su uso como turbina es bien difundido siendo el tipo Kaplan la más usada para centrales hidroeléctricas con grandes volúmenes de reserva.



Gráfica 26: Bomba axial

FUENTE: Global Spec.



3.4 SISTEMAS DE BOMBEO DE SLURRY

3.4.1 Introducción

Se le denomina slurry a la mezcla de fluido con partículas sólidas, sus características dependen de varios factores como tamaño y distribución de la partícula, concentración de sólidos en peso, temperatura del agua, nivel de turbulencia, etc. El transporte de slurry mediante bombeo es bastante extendido en la industria minera, plantas de tratamiento de agua, cementera y en la generación de energía eléctrica en plantas de carbón, siendo muchas veces el método más económico para transportar material. El transporte por slurry tiene las siguientes ventajas:

- El impacto ambiental es mínimo ya que es posible recuperar el agua que se utiliza. Además, es necesario menos infraestructura de caminos para camiones y obras civiles para sistema por fajas.
- En algunos casos es posible el transporte por gravedad, haciendo mucho más económica la operación y mejorando la productividad.
- Permite operación continua sin necesidad de turnos, obteniendo además datos en tiempo real como caudal, presión, concentración, etc.
- Es posible monitorear la operación a través de un sistema SCADA.
- Los costos de inversión y de operación son muy competitivos comparados con el transporte por fajas y en camiones.
- Las condiciones geográficas y climáticas no afectan la producción ya que el material va dentro de una tubería.

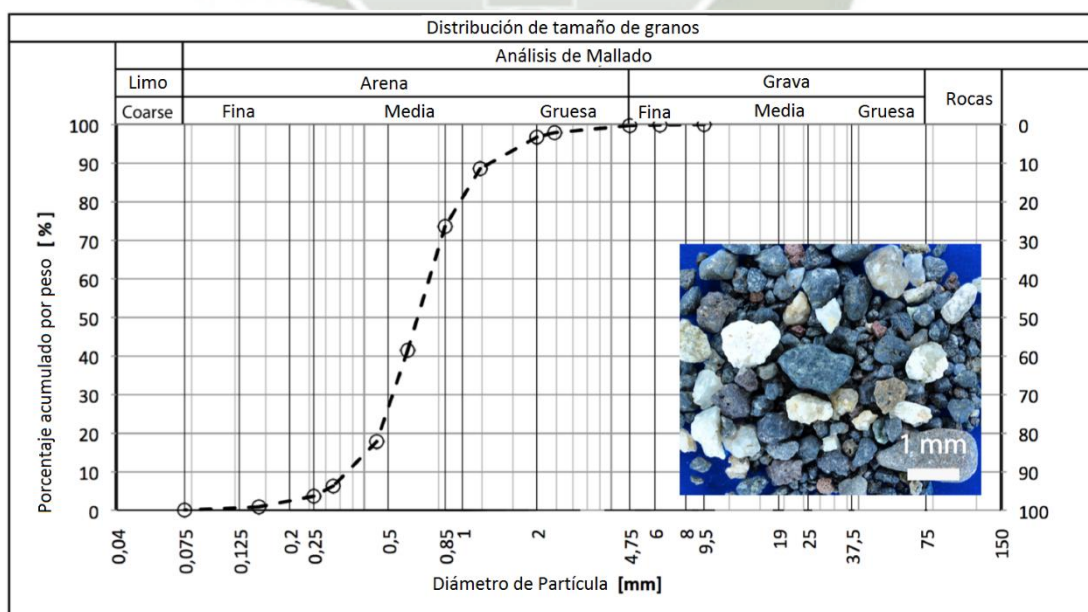
- Requiere menos personal de operación y mantenimiento.

El proceso de desgaste en los componentes de los sistemas de transporte de slurry es muy complejo y demanda evolución permanente de diseño de componentes y materiales por parte de los proveedores y la atención del cliente para mantener confiabilidad y seguridad del sistema. El desgaste que sufren los componentes dependen de muchos factores como la dureza del material de la bomba o su revestimiento, la forma de las partículas del slurry, la velocidad de flujo, etc. y que cuya disminución dependerá de una correcta selección de materiales.

3.4.2 Características de los Slurries

3.4.2.1 Diámetro promedio de partícula

La distribución de tamaño de partículas de slurry es muy variada y la determinación de un valor promedio es necesaria para la evaluación de velocidad crítica de transporte, velocidad de hundimiento, perdidas de carga y en esta tesis, la cantidad de espesor removido.



Gráfica 27: Curva granulométrica.

FUENTE: Slurry Systems Handbook, Abulnaga

3.4.2.2 Densidad de la mezcla

La densidad del slurry esta expresada por la siguiente ecuación:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{(1 - C_w)}{\rho_L}} \quad \text{Eq. (3.33)}$$

Donde:

ρ_m Densidad de la mezcla [kg/m³].

C_w Concentración por peso.

ρ_s Densidad de la fase sólida seca [kg/m³].

ρ_L Densidad de la fase líquida [kg/m³].

Para realizar una medición es necesario conocer la densidad específica del material seco y además realizar un correcto mezclado y centrifugado del slurry ya que las partículas finas tienden a entrapar bolsas de aire y las partículas más gruesas tienden a hundirse más rápido que las más pequeñas.

3.4.2.3 Concentración en volumen

Es común realizar los cálculos iniciales de la cantidad de material a procesar o desechar en términos de toneladas secas, es por esto que se incorpora el coeficiente de concentración por volumen (C_v) para su rápida conversión:

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} \quad \text{Eq. (3.34)}$$

Para conocer el caudal de mezcla por masa de material a transportar a partir de la concentración por volumen:

$$Q_m = \frac{\dot{m}_s}{C_v \rho_s} \quad \text{Eq. (3.35)}$$

Donde:

Q_m Caudal de la mezcla [m³/hr].

\dot{m}_s Flujo másico de material seco a transportar [kg/hr].

3.4.2.4 Velocidad crítica de hundimiento

Es la velocidad mínima que necesita el flujo para que no exista asentamiento de las partículas sólidas. Este depende del peso específico del material

Diámetro de partícula (micrómetros)	Velocidad de hundimiento(m/s)	Identificación
0.2	3e-8	Arcilla
0.6	2.8e-7	Arcilla gruesa
1	7e-6	
2	9.2e-6	
5	17e-6	Limo
6	25e-6	
20	28e-5	Limo grueso
50	17e-4	Arena
60	25e-4	
100	0.07	
200	0.021	
250	0.026	Arena gruesa

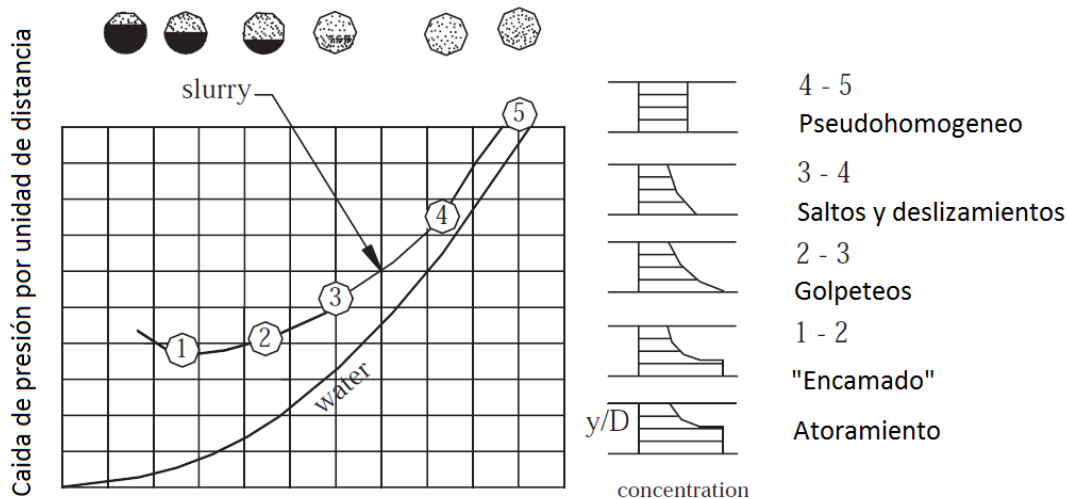
300	0.032	
500	0.053	
600	0.063	
1000	0.10	
2000	0.17	

Tabla 4: Velocidad de hundimiento para diversas partículas.

FUENTE: Slurry Systems Handbook, Abulnaga

3.4.2.5 Velocidad crítica de transporte

Es la velocidad que necesita el flujo de la mezcla heterogénea para que ocurra transición en diferentes regímenes. En la siguiente figura se puede ver que en el punto 1 existe un bloqueo de la tubería, que a medida que aumenta la velocidad del flujo en el punto 2, este se convierte en “camas” que se mueven junto con el flujo, nótese que el perfil de velocidades en la tubería tiene un perfil de concentración máxima en estos puntos. En el punto 3 y 4 existe se dispersa la cama y las partículas más pesadas saltan y ruedan en la parte inferior de la tubería y finalmente el punto 4 a 5 existe un régimen pseudohomogeneo de concentraciones en el que el perfil de concentraciones es “homogéneo”, pero no quiere decir que todas las partículas sean del mismo tamaño.



Gráfica 28: Comportamiento del flujo de slurry en tubería según velocidad crítica.

FUENTE: Slurry Systems Handbook, Abulnaga

3.4.3 Tipos de Slurry

3.4.3.1 Flujos Homogéneos

En los slurries homogéneos los sólidos están uniformemente distribuidos en el fluido como una “pasta”, un ejemplo de un slurry homogéneo es el concentrado de cobre después del proceso de molienda. Este tipo de slurry se caracteriza por contener partículas de diámetros menores 70 micrómetros (200 mesh en malla Tyler) dependiendo de la densidad del fluido y tener concentraciones altas de sólidos de alrededor de 40 a 60% de concentración por peso, además posee viscosidades altas y en algunos tipos de flujos que contiene arcilla, el slurry se comporta en su mayoría como un fluido no newtoniano.

3.4.3.2 Flujos Heterogéneos

Los fluidos de slurry heterogéneos no tienen uniformidad en su distribución gravimétrica a lo largo del eje horizontal a la tubería, ósea existe un gradiente de concentración diferente a cero. Los flujos heterogéneos son encontrados en aplicaciones severas de dragado, extracción de arena de petróleo y mineral de fosfatos. La concentración de partículas varía entre el 25 y 35% y se debe tener en cuenta las consideraciones de velocidad crítica para que no exista la formación de camas, salteo y rodado de partículas. Además, dentro del diseño de sistemas con este tipo de flujos se debe considerar el ángulo máximo de transporte por la formación de camas en los codos, salteo y obstrucción de la tubería.

3.4.4 Bombas para Slurry

3.4.4.1 Introducción

Las bombas de slurry son bombas centrífugas tienen el mismo principio de operación que las bombas centrífugas para agua, al igual que estas, las bombas de slurry son hidráulicamente diseñadas bajo la combinación de modelos matemáticos y modelos empíricos, pero con la diferencia de que estas tienen que soportar las más severas condiciones de desgaste e impacto, por lo que con la ayuda de la ciencia de materiales se deben diseñar componentes más robustos y con posibilidad de rápido intercambio. La correcta selección de una bomba para slurry depende del conocimiento exacto del fluido a transportarse; el comportamiento hidráulico de la bomba se puede predecir mediante un estudio del sistema de bombeo y finalmente se puede ajustar in situ el punto de operación mediante diferentes radios de poleas o variadores de velocidad,

pero la selección de materiales debe ser exacta a fin de evitar desgaste creciente que no se podrá corregir después.

3.4.4.2 Tipos de Bombas para slurry

3.4.4.2.1 Según su aplicación

Las bombas de slurry pueden ser tanto horizontales como verticales, pero solo se diseñan multietápicas radiales, presentan bajas eficiencias, velocidades de rotación bajas y NPSH requeridos altos, por lo que normalmente tienen succión positiva a través de una tolva de alimentación. Pueden ser los siguientes tipos:

3.4.4.2.1.1 Bombas de dragado:

Son bombas sumergibles muy resistentes al deterioro mecánico; pueden ser bombas de altas potencias usadas para obras de construcción bajo agua y limpieza de limo en represas de centrales hidroeléctricas o bombas de decenas de kilowatts en limpieza en lagunas artificiales de proyectos agroindustriales. Se caracterizan por tener impulsores metálicos de altas durezas y gran holgura para el paso de sólidos, además de tener la capacidad de soportar impactos y colisiones.

En el caso de las bombas dispuestas en barcazas, estas deben tener un bajo NPSH requerido, ya que deben ser instaladas a algunos metros del nivel del agua en la barcaza; para bombas de sumergibles de dragado es común utilizar impulsores tipo vortex.

3 4.4.2.1.2 Bombas de espuma, en sistemas de producción de concentrado y circuitos de flotación:

Son normalmente implementadas después de un hidrociclón. En general son bombas tipo cantiléver al tener la posibilidad de estar implementadas en un tanque, con la finalidad de evitar el uso de sellos mecánicos. Tienen como característica principal remover el aire disuelto en el líquido mediante la fuerza centrífuga del líquido que entra en forma tangencial y el impulsor que gira en el mismo sentido del fluido, así los sólidos y el líquido son empujados hacia afuera, mientras que los gases son recolectados en el centro del vórtice.

3 4.4.2.1.3 Bombas horizontales estacionarias

Son bombas estacionarias de altas presiones y potencias, estas pueden ir en serie en caso de que se necesite mayor presión. Estas bombas cuentan con sello de empaquetadura con un circuito de alimentación de agua externo, con el fin de alargar la vida útil del sello. El sello de empaquetadura a pesar de ser un método antiguo, tiene buen comportamiento en líquidos con alto contenido de sólidos.

Además, comúnmente son accionadas mediante un sistema VFD lo que posibilita el cambio del punto de operación según la dinámica de las operaciones.

3 4.4.2.1.4 Bombas sumergibles para drenado con alta concentración de sólidos.

Usadas en aplicaciones sumergibles estas vienen diseñadas con un agitador al final del eje para facilitar el levantamiento de material y una rejilla para no dejar ingresar piedras al impulsor que no puedan ser bombeadas. Son de impulsor abierto y algunas

bombas son diseñadas con impulsor tipo vortex dependiendo de la admisibilidad de sólidos. Estas bombas siempre estas provistas de doble sello mecánico.



Gráfica 29: Bomba para slurry con liner interior acoplada mediante faja de 8x6.

Fuente: Warman pumps.



Gráfica 30: Bomba sumergible para drenaje con agitador y descarga lateral.

Fuente Flygt pumps, una marca de Xylem.

3.4.4.2.2 Según su modo de transmisión de potencia

3 4.4.2.2.1 Mediante fajas

Es el modo más usado en bombas para transporte de slurry para potencias menores a 300 KW. Esta configuración permite fácilmente seleccionar el punto de trabajo óptimo mediante leyes de semejanza en bombas centrífugas y luego ajustar el punto de operación. Dependiendo de la potencia pueden ser fajas en V y fajas dentadas, este método tiene baja eficiencia y se recomienda en instalaciones de alimentación de concentrado donde las tuberías son de longitud corta.

3 4.4.2.2.2 Mediante árbol de engranajes

Escasamente usado debido a la dinámica de los puntos de operación de las bombas de slurry, su costo inicial y mantenimiento son una desventaja frente a la transmisión de potencia por fajas.

3 4.4.2.2.3 Acople directo y regulación mediante VFD

Es usado en bombas de alta potencia (mayores de 300 KW) y en instalaciones con largas líneas de tubería por ser capaces de atenuar efectos de golpe de ariete, cuyo efecto es mucho mayor en instalaciones de slurry.

Tiene las siguientes ventajas:

- Se puede controlar la velocidad de rotación en cualquier momento para mantener un caudal fijo.
- Se pueden configurar rampas de arranque y parada para evitar altas corrientes en el sistema de potencia y golpes de ariete en las tuberías por arranques intempestivos o paradas abruptas.

- Los variadores modernos vienen con control y monitoreo remoto incorporado.
- Tienen menores pérdidas de potencia que las transmisiones mecánicas comunes.
- Se puede acondicionar para varias bombas en serie o en paralelo para una operación conjunta.

Como desventaja se tiene el alto costo inicial que incluyen equipos, transformadores, filtros armónicos, protecciones y obras civiles.

3.4.5 Materiales en las bombas de slurry

3.4.5.1 Aceros Duros y aleaciones

Entre ellos se encuentran aceros auténticos y aleaciones con alto porcentaje de cromo y manganeso, se recomiendan en aplicaciones corrosivas con sulfatos, iones de fosfatos, contenido de cloro y partículas gruesas hasta 3.5 Ph. Son ideales en aplicaciones de dragado y transporte de partículas finas y gruesas con ángulos agudos a partir de malla Tyler 7 o menor (2.3 mm de diámetro de partícula) y a partir de malla 150 a mayor para aplicaciones de material pulverizado.

3.4.5.2 Recubrimientos de caucho

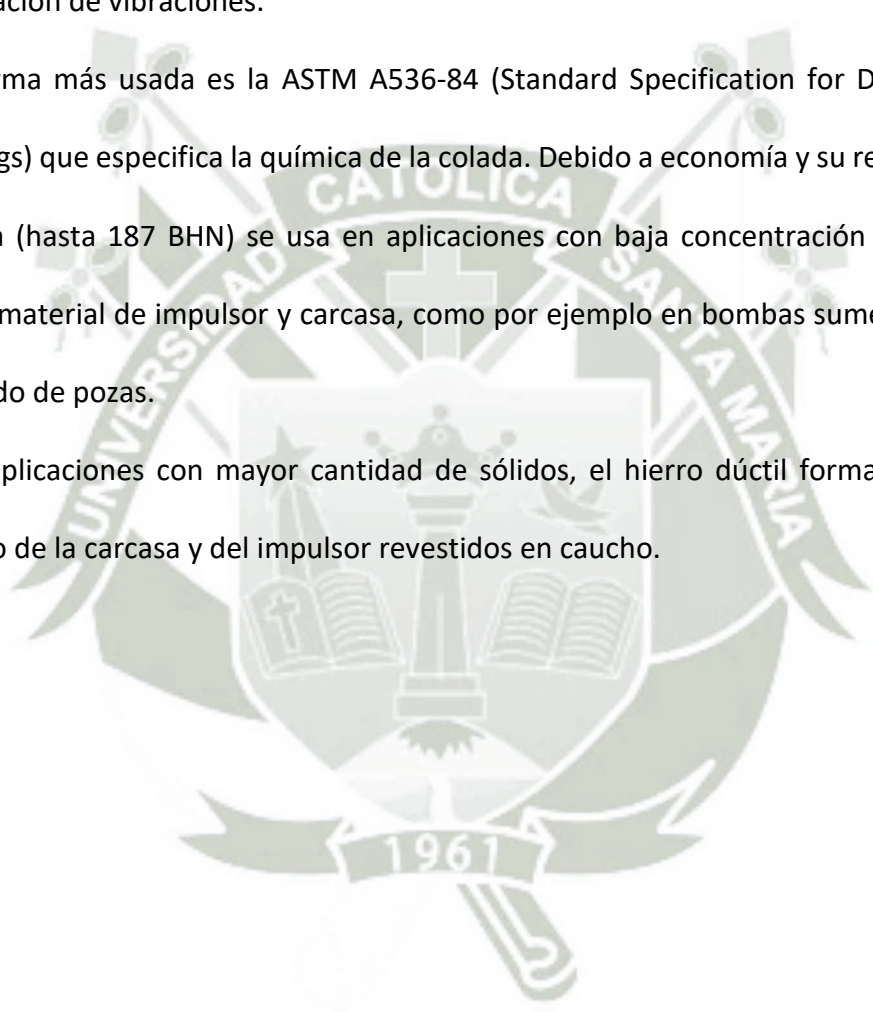
También llamados liners, son piezas de acero o fundición recubiertas con caucho natural o sintético, son usados más extensivamente que los aceros y aleaciones por ser más económicos frente a aplicaciones de corrosividad y desgaste leve o moderado. Las partículas que colisionan con este rebotan en vez de causar algún tipo de deformación.

3.4.5.3 Hierro dúctil

Hierro fundido con hasta 4% de carbono al cual se le adiciona magnesio para formar precipitados de carbono (grafito) en forma de nódulos. Se conforma mayormente de ferrita, pero para usos más propensos al desgaste se puede templar el acero en formaciones perlíticas y martensíticas. Tiene buena resistencia al impacto y buena atenuación de vibraciones.

La norma más usada es la ASTM A536-84 (Standard Specification for Ductile Iron Castings) que especifica la química de la colada. Debido a economía y su relativa baja dureza (hasta 187 BHN) se usa en aplicaciones con baja concentración de sólidos como material de impulsor y carcasa, como por ejemplo en bombas sumergibles de drenado de pozas.

Para aplicaciones con mayor cantidad de sólidos, el hierro dúctil forma parte del cuerpo de la carcasa y del impulsor revestidos en caucho.



Malla Tyler standart			Descripción de la Partícula	Clasificación general de las bombas			
Tamaño de partícula							
in	mm	mesh					
3.000			Guijarros de gravilla	Acero endurecido y alto contenido de cromo	Bombas de dragado		
2.000							
1.500							
1.050	26.67						
0.883	22.43						
0.742	18.85						
0.624	15.85						
0.525	13.34						
0.441	11.20						
0.371	9.423						
0.321	8.153	2.5					
0.263	6.680	3					
0.221	5.613	3.5					
0.185	4.699	4					
0.156	3.962	5					
0.131	3.327	6					
0.110	2.794	7					
0.093	2.362	8					
0.078	1.981	9					
0.065	1.651	10					
0.055	1.397	11					
0.046	1.168	12					
0.039	0.991	13					
0.0328	0.833	14					
0.0276	0.701	16					
0.0232	0.589	20					
0.0195	0.495	24					
0.0164	0.417	28					
0.0138	0.351	32					
0.0116	0.295	35					
0.0097	0.246	42					
0.0082	0.208	48					
0.0069	0.175	60					
0.0058	0.147	65					
0.0049	0.124	80					
0.0041	0.104	100					
0.0035	0.089	115					
0.0029	0.074	150					
0.0024	0.061	170					
0.0021	0.053	200					
0.0017	0.043	250					
0.0015	0.038	270					
	0.025	325					
	0.02	400					
	0.01	a500					
	0.005	a625					
	0.001	a1250					
		a2500					
		a12500					
		Arcilla					
			Arena muy gruesa	Liner de caucho impulsor cerrado	Bombas de arena y gravilla		
			Arena Gruesa				
			Arena mediana	Liner de Poliuretano impulsor abiertos	Bombas de slurry		
			Arena fina				
			Limo				
						Acero endurecido y alto contenido de cromo	

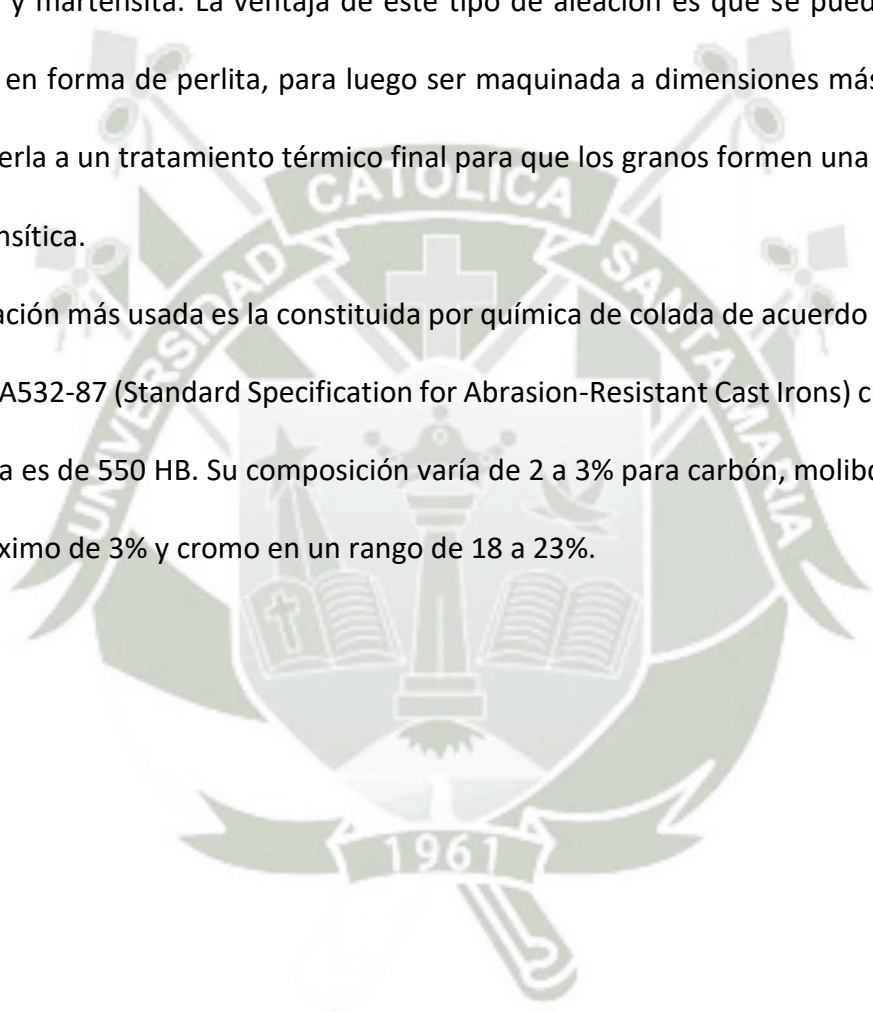
Gráfica 31: Clasificación de materiales de bombas de acuerdo al tamaño de partícula.

FUENTE: Slurry Systems Handbook, Abulnaga

3.4.5.4 Acero con alto contenido de cromo

La adición de molibdeno, níquel y cromo (en rangos de 12 a 28%) permite la formación de aleaciones resistentes a la erosión y permiten ser colados en grandes dimensiones para la industria del slurry. En este tipo de aleaciones predomina los carburos eutécticos de molibdeno y cromo en combinación con matrices de austenita, perlita y martensita. La ventaja de este tipo de aleación es que se puede colar las piezas en forma de perlita, para luego ser maquinada a dimensiones más exactas y someterla a un tratamiento térmico final para que los granos formen una estructura martensítica.

La aleación más usada es la constituida por química de colada de acuerdo a la norma ASTM A532-87 (Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons) cuya dureza mínima es de 550 HB. Su composición varía de 2 a 3% para carbón, molibdeno hasta un máximo de 3% y cromo en un rango de 18 a 23%.



Descripción	Clase IA	Clase IB	Clase ID	Clase IIB	Clase IIC	Clase IIIA
C (%)	3.0-3.6	2.5-3.0	2.5-3.6	2.4-2.8	2.4-2.8	2.3-3.0
Si (%)	0.8 max	1.3 max	1.3 max	1.0 max	1.0 max	0.5-1.5
Mn (%)	1.3 max	0.8 max	1.0-2.2	0.5-1.0	0.5-1.0	1.0 max
Ni (%)	3.0-5.0	3.0-5.0	4.5-7.0	0.5 max	0.5 max	1.5 max
Cr (%)	1.4-4.0	1.4-4.0	7.0-10.0	14.0- 18.0	14.0- 18.0	23.0- 28.0
Cu (%)	-	-	-	1.2 max	1.2 max	1.2 max
Mo (%)	-	1.0 max	1.0 max	1.0-3.0	1.0-3.0	1.5 max
P max (%)	-	0.3	0.1	0.1	0.1	0.1
S max (%)	0.15	0.15	0.15	0.06	0.06	0.06
Dureza Mínima	550 HB	550	550 HB	650 HB	650HB	650HB

Tabla 5: Aceros según la especificación ASTM A532-82 (Standard Specification for Ductile Iron Castings).

FUENTE: Slurry Systems Handbook, Abulnaga

En casos donde existan iones de sulfatos y fosfatos, los proveedores de bombas de slurry pueden obtener aleaciones especiales de norma interna para cada proveedor con 30 hasta 50% de cromo, que forma matrices dúplex en el material, esto quiere decir que se forma tantas estructuras austeníticas, perlíticas y martensíticas que son fáciles de colar.

3.4.5.5 Cauchos Naturales

Los elastómeros, en particular los cauchos tienen mayor ventaja económica en la industria de bombas y tuberías para transporte de slurry frente a los aceros con alto contenido de cromo. Además, estos resisten naturalmente acidez de menos de 6 Ph, La desventaja es que no se pueden usar con temperaturas mayores a 65°C, algunos no pueden bombear productos petroquímicos y no se pueden bombear partículas con ángulos muy agudos. Estos pueden ser:

- Caucho natural con agregado de carbón
- Caucho natural con agregado de carbón y silicio
- Butadieno estireno con grafito

3.4.5.6 Cauchos sintéticos

Los cauchos sintéticos son más usados en la industria, por su durabilidad, resistencia a corrosión y accesibilidad.

La principal ventaja que tienen es su fácil mantenimiento y la posibilidad de cambiar el recubrimiento de caucho cuando este sufre deterioro. Algunos de estos son:

3.4.5.7 Policloropeno o Neopreno

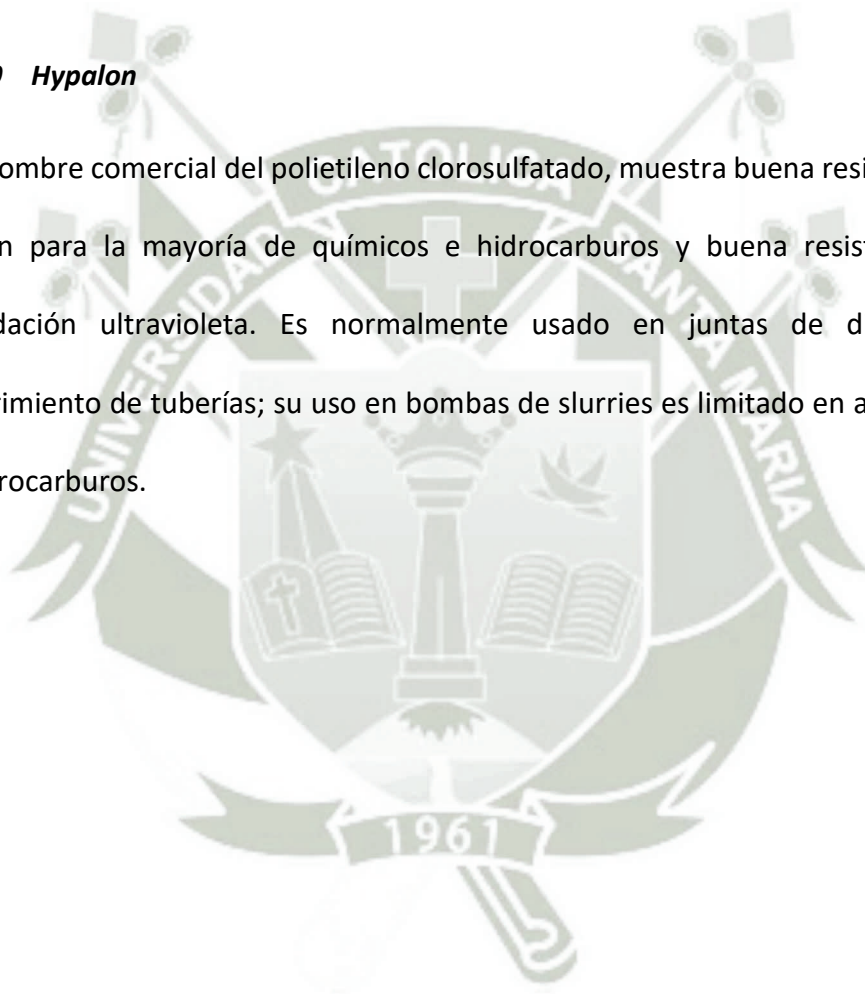
Es superior al caucho natural en temperatura de operación y posibilidad de trabajo con hidrocarburos, aunque su resistencia a la erosión es menor a la del caucho natural, es el material más común en componentes y liners de bombas para transporte de slurry. Su dureza nominal es de Shore A 80 y se considera el material para liners de uso estándar en el proceso de slurries de arena de petróleo.

3.4.5.8 Etilene propilene terpolímero (EPDM)

El EPDM tiene mejor resistencia mecánica que los cauchos naturales y resistencia para la mayor parte de químicos y ácidos leves, pero no es recomendable su uso con aplicaciones de hidrocarburos y ácidos fuertes. Su uso es extendido en juntas y sellos secundarios para bombas de agua y de slurry. Soporta un rango amplio de temperaturas de -51 a 177°C.

3.4.5.9 Hypalon

Es el nombre comercial del polietileno clorosulfatado, muestra buena resistencia a la erosión para la mayoría de químicos e hidrocarburos y buena resistencia a la degradación ultravioleta. Es normalmente usado en juntas de dilatación y recubrimiento de tuberías; su uso en bombas de slurries es limitado en aplicaciones de hidrocarburos.



CAPITULO IV: DESARROLLO DEL MODELO DE PLACA PLANA

4.1 DESARROLLO DEL MODELO DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN EN PLACA PLANA

4.1.1 Introducción y Alcances

El modelo de erosión que se desarrollará para el impulsor centrífugo aproximará la superficie curva del álabe como una serie de placas planas, por esta razón primero es necesario realizar el modelo de erosión en una placa plana y conocer los efectos de erosión en ella. El modelo para la placa fue programado en la función **placa.m** en Matlab.

Se considerará lo siguiente:

- La tasa de degradación y variación del espesor es directamente proporcional al tiempo.
- Todas las partículas impactan con la misma velocidad a la placa plana.
- La degradación de material es uniforme en toda la placa.
- No se consideran efectos viscosos ni turbulencias.

4.1.2 Datos de Entrada para la función “placa.m”

- Caudal de la mezcla [Q_m].
- Ángulo de ataque [α].
- Concentración en peso [C_w].
- Diámetro promedio de partícula [d_p].
- Dureza del material de la placa [H_v].

- Densidad del material de la placa [ρ_p].
- Área de la placa [A].

4.1.3 Datos de Salida de la función “placa.m”

- Peso específico de la mezcla.
- Flujo másico de sólidos [m/s].
- Velocidad de impacto [m/s].
- Tiempo de desgaste completo de la placa [hr].
- Tasa de erosión del modelo de Oka [mm³/kg].
- Tiempo de desgaste completo de la placa plana vs ángulo de ataque [hr].
- Tasa de espesor de material removido [mm/hr].
- Degradación del espesor de la placa plana [hr].

4.1.4 Flujo másico de sólidos

La densidad de la mezcla está definida por la siguiente formula:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{(1 - C_w)}{\rho_L}} \quad \text{Eq. (4.1)}$$

La concentración en volumen de la mezcla de slurry está definida por la siguiente formula:

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} \quad \text{Eq. (4.2)}$$

El flujo másico de sólidos se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{m}_s = C_v \rho_s Q_m \quad \text{Eq. (4.3)}$$

Donde:

ρ_m	Densidad de la mezcla [kg/m ³].
C_w	Concentración en peso.
ρ_s	Densidad de las partículas sólidas [kg/m ³].
ρ_L	Densidad del agua [kg/m ³].
C_v	Concentración en volumen.
Q_m	Caudal de la mezcla [m ³ /hr].
\dot{m}_s	Flujo másico de sólidos [kg/hr].

4.1.5 Velocidad de impacto en la placa

Se considera que la velocidad de impacto es la misma velocidad del fluido:

$$V_{abs} = 277.78 \frac{Q_m}{A} \quad \text{Eq. (4.4)}$$

Donde:

V	Velocidad de impacto [m/s].
Q_m	Caudal de la mezcla [m ³ /hr].
A	Área de la placa [mm ²].

4.1.6 Remoción de material de la placa a través del tiempo

La remoción de material a través del tiempo viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_{90} = K(Hv)^{k1} \left(\frac{V_{abs}}{V'}\right)^{k2} \left(\frac{d}{d'}\right)^{k3} \quad \text{Eq. (4.5)}$$

$$g(\varphi) = (\sin \varphi)^{n1} (1 + HV(1 - \sin \varphi))^{n2} \quad \text{Eq. (4.6)}$$

$$ER = E_{90}g(\varphi) \quad \text{Eq. (4.7)}$$

$$W_{OKA} = ER\dot{m}_s \quad \text{Eq. (4.8)}$$

Donde:

ER Tasa de Erosión volumétrica por unidad de masa de erosivo [mm³/kg].

E₉₀ Tasa de erosión en ángulo normal [mm³/kg].

g(α) Función del ángulo de impacto.

α Ángulo de ataque.

K Factor de forma del erosivo.

Hv Dureza Vickers del material erosivo [GPa].

V Velocidad absoluta de las partículas erosivas [m/s].

d Diámetro promedio de las partículas erosivas [μm].

k₁, k₂ y k₃ Constante de indentación y penetración de partículas

n₁ y n₁ Constantes para cada material determinado experimentalmente.

W_{OKA} Tasa de volumen removido por unidad de tiempo [mm³/hr].

Las constantes del modelo de Oka pueden encontrarse en la Tabla 2 y 3.

4.1.7 Degradación del espesor de la placa por unidad de tiempo

La degradación del espesor viene dada por la siguiente ecuación:

$$\Delta e_r = \frac{W_{OKA}}{A} \quad \text{Eq. (4.9)}$$

Donde

Δe_r Tasa de espesor removido por unidad de tiempo [mm/hr]

A Área de la placa plana [mm²].

4.1.8 Tiempo de degradación del espesor

El tiempo de degradación del espesor se define como:

$$t = \frac{e}{\Delta e_r} \quad \text{Eq. (4.10)}$$

Donde:

t Tiempo de degradación [hr].

e Espesor del álabe [mm]

4.2 Código del archivo “placa.m” en Matlab.

```
% Entrada: densidad agua [kg/m3]
rhoa=1000;
% Entrada: densidad arena [kg/m3]
rhog=2600;
% Entrada: Concentración en peso
Cw=0.5;
% Entrada: caudal [m3/hr]
Qm=600;
% Cálculo del peso específico solido
Sg=rhog/rhoa;
% Cálculo del peso específico mezcla
Sm=Sg/((Sg-Cw*(Sg-1)));
% Entrada: diámetro de partícula
dp=30;
% Cálculo de concentración en volumen
Cv=(Cw*Sm)/Sg;
% Cálculo de flujo másico de solidos
fmg=Cv*rhog*Qm;
% Entrada: área [mm2]
A=100*200;
% Cálculo de velocidad [m/s]
V=(Qm/A)*(1e6/3600);
% Entrada: densidad [kg/m3]
rhom=7890;
% Entrada: dureza Vickers (Gpa)
Hv=6.835;
% Entrada: espesor placa [mm]
esp=20;

% datos del erosión
% Constantes del modelo de Oka
% Factor de forma del abrasivo
okaK=65;
% Constantes de penetración
```

```
okak1=-0.12;
okak2=2.3*((Hv^(0.038)));
okak3=0.19;
% Velocidad experimental
vin=104;
% Diámetro de la partícula experimental
dpin=326;
% Constantes del abrasivo
okan1=0.71*((Hv^(0.14)));
okan2=2.4*((Hv^(-0.94)));

% plot
% tiempo vs espesor
ii=100;
a=5;
xe=linspace(0,ii,ii);
% ángulo
ang=linspace(15,55,a)*(pi/180);

%calculo de factores de Oka
oka90=okaK*(2*(Hv).^okak1)*((V/vin).^okak2)*((dp/dpin).^okak3);
;
okange=zeros(a);
okaERe=zeros(a);
e=zeros(a);

for i=1:a
    okange(i)=(((sin(ang(i))).^okan1))*((1+Hv*(1-
sin(ang(i))).^okan2);
    okaERe(i)=okange(i)*oka90*fmg;
    % espesor
    e(i)=(okaERe(i)/A);
end

% plot

% Tasa
alpha=linspace(0,pi/2,ii);

% Cálculo de factores de Oka
okang=(((sin(alpha)).^okan1)).*((1+Hv*(1-sin(alpha))).^okan2);
okaERout=okang*oka90;

figure(1);
plot(alpha*(180/pi),okaERout,'g')
title('Tasa de erosión del modelo de Oka')
xlabel('Ángulo de ataque [deg]')
ylabel('Tasa de Erosión volumétrica por unidad de masa de
erosivo [mm3/kg]')
hold on

% plot
% tiempo vs angulo
```

```
angt=linspace(pi/12,pi/2,100);

okanget=((sin(angt)).^okan1).*((1+Hv*(1-sin(angt))).^okan2);
okaERet=okanget*oka90*fmg*(1/A);

% Cálculo de espesor degradado
tr=esp./okaERet;
trt=esp./e;

figure(2);
plot(angt*(180/pi),tr,'b')
title('Tiempo de desgaste completo de la placa plana')
xlabel('Ángulo de ataque [deg]')
ylabel('Tiempo de desgaste [hr]')
hold on

% plot
% degradación
for i=1:a
    okange(i)=(((sin(ang(i))).^okan1))*((1+Hv*(1-
sin(ang(i))).^okan2);
    okaERe(i)=okange(i)*oka90*fmg;
    % tasa de espesor removido
    e(i)=(okaERe(i)/A);
    figure(3)
    esp_re=esp-e(i)*xe;
    for k=1:ii
        if esp_re(k)<0
            esp_re(k)=NaN;
        end
    end
    plot(xe,esp_re,'LineWidth',1)
    hold on
end

axis([0 inf 0 inf])
title('Degradación del espesor de la placa plana')
xlabel('Tiempo de desgaste [hr]')
ylabel('Espesor de la placa [mm]')
hold on

legend('\alpha=15°','\alpha=25°','\alpha=35°','\alpha=45°','\a
lpha=55°');
hold on
```

4.3 EJEMPLO DE PREDICCIÓN DE EROSIÓN EN PLACA PLANA

4.3.1 Datos de Entrada

Para el siguiente ejemplo se asumirán los siguientes datos:

Descripción	Denominación	Unidad	Valor
Largo	l	cm	10
Ancho	a	cm	20
Espesor	e	mm	20
Tipo de acero	Alto cromo	ASTM A532 clase III 30%	
Dureza Vickers del material	Hv	GPa	6.835
Diámetro de la partícula	d_p	Micras	30
Concentración en peso	C_w	%	50
Densidad del material erosivo	ρ_{arena}	Kg/m ³	2600
Caudal de la mezcla	Q_m	m ³ /hr	600
Tipo de material erosivo	Silice	Oxido de silicio	

Tabla 6: Datos de Entrada para modelo de placa plana.

FUENTE: Elaboración propia.

4.3.2 Datos de Salida

Descripción	Denominación	Unidad	Valor
Gravedad específica de la mezcla	S_m	adim	1.444
Flujo másico de solidos	\dot{m}_s	Ton/hr	4333.3
Velocidad de impacto	V	m/s	8.33

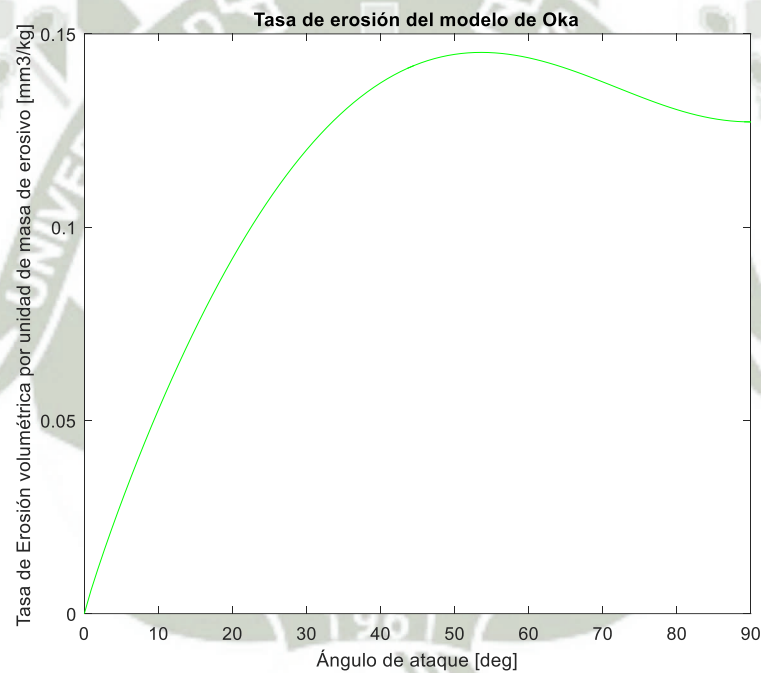
Tabla 7: Datos de Salida para modelo de placa plana.

FUENTE: Elaboración propia.

Ángulo de ataque [deg]	Tiempo [hr]
$\alpha=^{\circ}15$	12.52
$\alpha=^{\circ}25$	8.60
$\alpha=^{\circ}35$	7.10
$\alpha=^{\circ}45$	6.50
$\alpha=^{\circ}55$	6.35

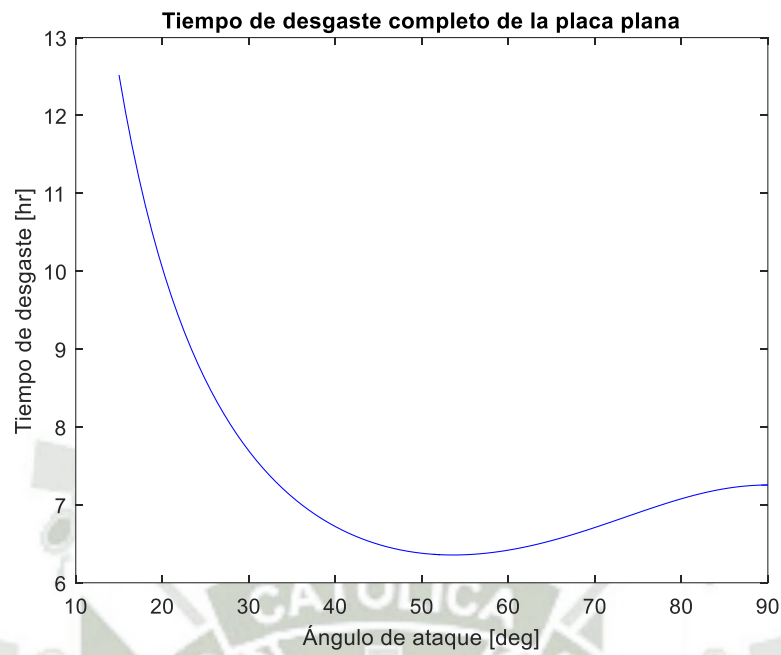
Tabla 8: Tiempo de degradación completa de la placa.

FUENTE: Elaboración propia.



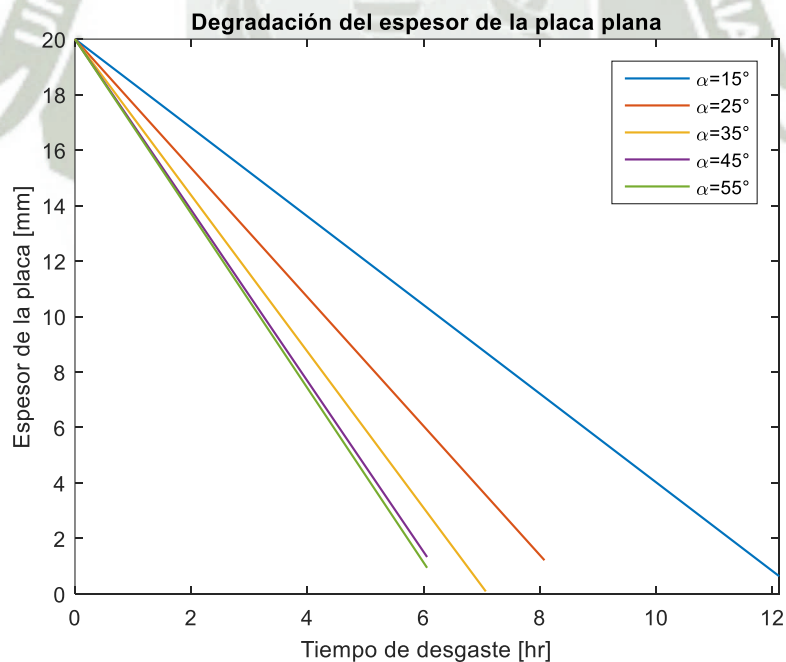
Gráfica 32: Tasa de erosión dependiente del ángulo de ataque.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 33: Tiempo de desgaste completo de la placa plana dependiendo del ángulo de ataque.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 34: Degradación de espesor de la placa a través del tiempo

FUENTE: Elaboración propia.

CAPITULO V: DESARROLLO DEL MODELO PARA EL IMPULSOR

5.1 GEOMETRÍA DEL IMPULSOR

5.1.1 Introducción y alcances

El impulsor es la parte más importante de la bomba y servirá de base para el análisis de todos los resultados en esta tesis. Es necesario establecer las ecuaciones que gobiernan la geometría del impulsor y el álabe para más adelante poder construir la malla de las superficies y así poder calcular el perfil de velocidades y ángulo de ataque del fluido, variables necesarias en los modelos de predicción de tasa erosión. Todos los datos relevantes serán calculados en la función **geo.m**. programada en Matlab. Aunque existe diversas formas y geometrías de impulsores dependiendo de la aplicación, caudal, presión, numero de etapas, etc. se toman las siguientes consideraciones a fin de simplificar el modelo:

- La geometría del impulsor que se usará para esta tesis es semi abierto con álaves de progresión recta de perfil meridional recto (bidimensional) y de espesor constante.
- La geometría de los alabes se construirá a partir de la sección de un arco.

5.1.2 Datos de entrada de la función “geo.m”

- El ángulo de ingreso [β_1] en grados, dato inicial.
- El ángulo de salida [β_2] en grados, dato inicial.
- Radio externo del impulsor [r_e] en [mm] dato inicial.

- Radio interno del impulsor [r_i] en [mm] dato inicial.
- Numero de álabes [Z] dato inicial.
- Espesor de los álabes [e] en [mm] dato inicial.
- Altura de los álabes [h] en [mm] dato inicial.

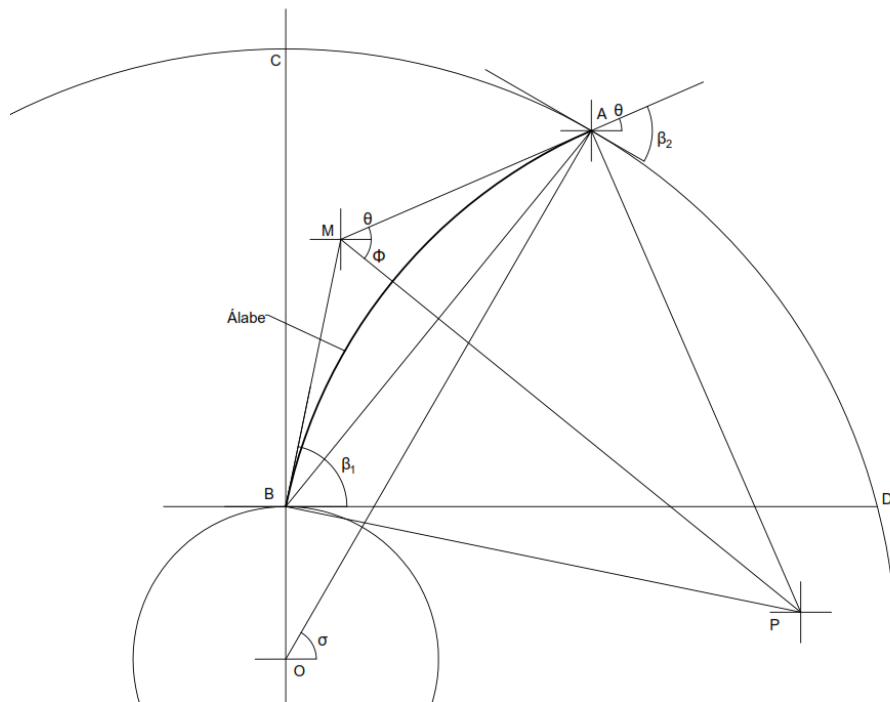
5.1.3 Datos de salida de la función “geo.m”

- Coordenada x de la placa i de la malla [M_{xi}] en [mm].
- Coordenada y [M_{yi}] en [mm].
- Ángulo normal al álabe [μ_{nor}] en grados.
- Ángulo tangente al álabe [μ_{tan}] en grados.
- Radio al centro del impulsor [R_{Mi}] en [mm].

5.1.4 Modelamiento de la Geometría del Impulsor

Para realizar el modelamiento matemática del impulsor se toma como punto de partida la geometría de un alabe. Antes de plantear las ecuaciones se realizan los siguientes pasos de acuerdo a la Gráfica 35:

1. Se nombran los puntos O, A, B, C, D y M . Sabiendo que $\overline{OB} = r_i$ y $\overline{OA} = r_e$
2. Se traza líneas perpendiculares a los segmentos \overline{MA} y \overline{MB} y se nombra P su punto de intersección.
3. Se nombran los ángulos σ, ϕ y θ .
4. Finalmente se traza una línea del punto P al punto M .



Gráfica 35: Ángulos y segmentos propuestos para el modelamiento del álabe el impulsor.

FUENTE: Elaboración propia

Luego se procede a establecer las ecuaciones que caracterizan el arco:

$$\sphericalangle MBP = \sphericalangle MBD + \sphericalangle PBD \quad \text{Eq. (5.1)}$$

$$\sphericalangle DBP = \sphericalangle PBA + \sphericalangle ABD \quad \text{Eq. (5.2)}$$

$$\sphericalangle OBA = \sphericalangle ABD + 90 \quad \text{Eq. (5.3)}$$

Reemplazando (5.3) y (5.2) en (5.1):

$$\sphericalangle MDB = \sphericalangle OBA - \sphericalangle PBA = \beta_1 \quad \text{Eq. (5.4)}$$

Luego tenemos que:

$$\sphericalangle PBD = 90 + \sphericalangle PBA + \sphericalangle OBA \quad \text{Eq. (5.5)}$$

$$\vartheta + \varphi = 90 - \frac{\sphericalangle BPA}{2} \quad \text{Eq. (5.6)}$$

$$\varphi = \sphericalangle PBD + \frac{\sphericalangle BPA}{2} \quad \text{Eq. (5.7)}$$

Despejando ϑ y reemplazando en (5.7):

$$\vartheta = 90 - \sphericalangle PBD - \sphericalangle BPA \quad \text{Eq. (5.8)}$$

Luego:

$$\beta_2 = 90 + \vartheta - \sigma \quad \text{Eq. (5.9)}$$

Reemplazando la ecuación (5.8) en (5.9):

$$\beta_2 = 180 - \sphericalangle PBD - \sphericalangle BPA - \sigma \quad \text{Eq. (5.10)}$$

Reemplazando la ecuación (5.10) con (5.4) y (5.5) y despejando tenemos:

$$2\sphericalangle OBA - \sigma = \beta_1 + \beta_2 + 90 \quad \text{Eq. (5.11)}$$

Luego se tiene:

$$\overline{AB}^2 = \overline{BO}^2 + \overline{AO}^2 - 2\overline{BOAO} \cos(90 - \sigma) \quad \text{Eq. (5.12)}$$

$$\overline{AB} = \overline{AO} \frac{\sin(90 - \sigma)}{\sin(\sphericalangle OBA)} \quad \text{Eq. (5.13)}$$

Reemplazando (5.8) en (5.12):

$$\left(\overline{AO} \frac{\sin(90 - \sigma)}{\sin(\sphericalangle OBA)} \right)^2 = \overline{BO}^2 + \overline{AO}^2 - 2\overline{BOAO} \cos(90 - \sigma) \quad \text{Eq. (5.14)}$$

Con las ecuaciones (5.14) y (5.11) podemos hallar la longitud del segmento \overline{BP} y en ángulo $\sphericalangle PBD$. La ecuación se puede resolver numéricamente con la función *VPASOLVE* en el paquete de Matlab.

$$\overline{AB} = \sqrt{BO^2 + AO^2 - 2BOAO \cos(90 - \sigma)} \quad \text{Eq. (5.15)}$$

$$\sphericalangle PBA = \sphericalangle OBA - \beta_1 \quad \text{Eq. (5.16)}$$

$$\sphericalangle BPA = 180 - 2\sphericalangle PBA \quad \text{Eq. (5.17)}$$

$$\sphericalangle PAB = \sphericalangle PBA \quad \text{Eq. (5.18)}$$

$$\sphericalangle PBD = 90 + \sphericalangle PBA - \sphericalangle OBA \quad \text{Eq. (5.19)}$$

Finalmente sustituyendo las ecuaciones (5.16) y (5.19):

$$\overline{BP} = \overline{AB} \frac{\sin(\sphericalangle PAB)}{\sin(\sphericalangle BPA)} \quad \text{Eq. (5.20)}$$

De esta manera se podrá calcular la ubicación del centro del alabe en forma de arco en el plano cartesiano. Las ecuaciones de las coordenadas cartesianas para cada punto p_i en el segmento de arco son las siguientes de acuerdo al Gráfico 36:

$$p_{x,i} = \overline{BP}(\cos \theta_i + \cos(\sphericalangle PBD)) \quad \text{Eq. (5.21)}$$

$$p_{y,i} = \overline{BP}(\sin \theta_i + \sin(\sphericalangle PBD)) \quad \text{Eq. (5.22)}$$

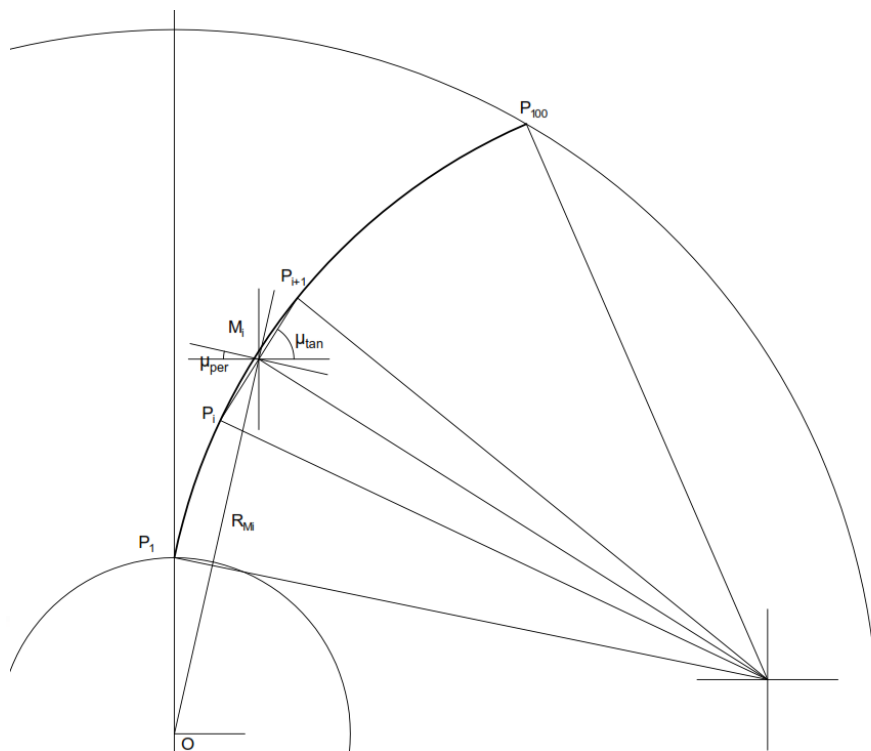
Las divisiones del ángulo fueron hechas con la función Linspace de Matlab, el dominio del ángulo es el siguiente:

$$180 - (\sphericalangle PBD + BPA) < \theta_i < 180 - \sphericalangle PBD$$

El número de placas i en el que será formada la malla será determinado como dato de entrada, a fin de elaborar los cálculos rápidamente se eligió $i=100$.

5.1.5 Generación de la malla

De acuerdo a los modelos de erosión, es necesario una superficie plana para poder calcular la profundidad que se está erosionando, es por esto que este modelo introduce la superficie del álabe como una superficie enmallada compuesta por pequeñas placas planas.



Gráfica 36: Construcción de la placa i de la malla

FUENTE: Elaboración propia

Con los puntos P_i obtenidos podemos generar la malla de acuerdo a la Gráfica 35. Al estar entre la mitad de los puntos P_i y P_{i+1} , las coordenadas de M_i son:

$$M_{x,i} = \frac{P_{xi} + P_{xi+1}}{2} \quad \text{Eq. (5.23)}$$

$$M_{y,i} = \frac{P_{yi} + P_{yi+1}}{2} \quad \text{Eq. (5.24)}$$

El ángulo normal del álabe se calcula de la siguiente forma:

$$\mu_{nor,i} = 180 - \frac{\left(\tan^{-1} \frac{M_{xi}}{M_{yi}} + \tan^{-1} \frac{M_{xi+1}}{M_{yi+1}}\right)}{2} \quad \text{Eq. (5.25)}$$

El ángulo tangente del alabe se calcula de la siguiente forma:

$$\mu_{tan,i} = 90 - \alpha PBD - (\alpha BPA_i + \alpha BPA_{i+1}) \quad \text{Eq. (5.26)}$$

El radio al centro del ojo del impulsor se calcula:

$$r_{M,i} = \sqrt{M_{xi}^2 + M_{yi}^2} \quad \text{Eq. (5.27)}$$

5.1.6 Código del archivo “geo.m” en Matlab.

```
function [gmesh, mesh, amesh, mcen, mesha]=geo (geo_d, ii)

% Entrada:
% geo_d:   Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% gmesh   Matriz de datos de centroides placas iniciales
% mesh    Matriz de coordenadas de puntos de placas iniciales
% amesh:  Matriz de datos de la altura del álabe
% mcen    Matriz de coordenadas de centros de impulsor
% mesha   Matriz de coordenadas de las placas de todos los
álaves

digits(8);
% Inicialización de matrices
SAO=geo_d(1);
SBO=geo_d(2);
Abeta1=geo_d(3)*(pi/180);
Abeta2=geo_d(4)*(pi/180);
Z=geo_d(5);
angcir=linspace(0,2*pi,ii);

mcen=zeros(ii,4);
for i=1:ii
    % Circunferencia exterior
    mcen(i,1)=SAO*cos(angcir(i));
    mcen(i,2)=SAO*sin(angcir(i));

    %Circunferencia interior
    mcen(i,3)=SBO*cos(angcir(i));
    mcen(i,4)=SBO*sin(angcir(i));
end
```

```

syms SAaa SAOBA SSAB Stheta

eq1=SSAB==SAO*(sin(pi/2-SAaa)/sin(SAOBA));
eq2=SAO/SBO==sin(SAOBA)/sin(Stheta);
eq3=2*SAOBA-SAaa==Abeta1+Abeta2+(pi/2);
eq4=SAOBA+Stheta-SAaa==pi/2;

[~,AOBA,SAB,~]=vpasolve([eq1,eq2,eq3,eq4],[SAaa,SAOBA,SSAB,Stheta],
[0 pi/2;pi/2 pi;0 Inf;0 pi/4]);

AOBA=double(AOBA);
SAB=double(SAB);
APBA=AOBA-Abeta1;
ABPA=pi-2*APBA;
APAB=APBA;
APBD=pi/2+APBA-AOBA;
SBP=SAB*sin(APAB)/sin(ABPA);

% espesor de los álabes
anga=atan(geo_d(6)*tan(APBD)/(SBP-geo_d(6)))-0.025;

% Cálculo de coordenadas de putnos de los alabes
ang2=linspace((pi-(APBD+ABPA)),(pi-APBD),ii);
ang2k=linspace((pi-(APBD+ABPA+4*anga)),(pi-(APBD+anga)),ii);
centmeshx=SBP*cos(APBD);
centmeshy=(-SBP*sin(APBD))+SBO;
x2=SBP*cos(ang2);
y2=SBP*sin(ang2);

centax=zeros(Z);
centay=zeros(Z);
xa=zeros(Z,ii);
ya=zeros(Z,ii);
mesha=zeros(Z,ii,2);

for k=1:2
    for i=1:Z
        for j=1:ii
            centax(i)=SBP*cos(-APBD+2*pi*(i-1)/Z)+SBO*cos(2*pi*((i-1)/Z)+pi/2);
            centay(i)=SBP*sin(-APBD+2*pi*(i-1)/Z)+SBO*sin(2*pi*(i-1)/Z+pi/2);
            if k==1
                xa(i,j)=SBP*cos(ang2(j)+2*pi*(i-1)/Z);
                ya(i,j)=SBP*sin(ang2(j)+2*pi*(i-1)/Z);
            else
                xa(i,j)=(SBP-geo_d(6))*cos(ang2k(j)+2*pi*(i-1)/Z);
                ya(i,j)=(SBP-geo_d(6))*sin(ang2k(j)+2*pi*(i-1)/Z);
            end
            mesha(i,j,k,1)=xa(i,j)+centax(i);
            mesha(i,j,k,2)=ya(i,j)+centay(i);
        end
    end
end

```

```

        end
    end
end

% Geometria de la i-ésima placa
mesh=zeros(ii,2);

for i=1:ii
    % coordenada X del punto "p"
    mesh(i,1)=x2(i)+centmeshx;
    % coordenada Y del punto "p"
    mesh(i,2)=y2(i)+centmeshy;
end
mesh=flipud(mesh);

% Vector Distancia al centro de la i-ésima placa
for i=1:ii
    mesh(i,3)=(((mesh(i,1).^2)+(mesh(i,2).^2))^(1/2));
    mesh(i,4)=abs(atan(mesh(i,1)/mesh(i,2)));
end

% Ángulo relativo del punto "p"
for i=1:ii
    mesh(i,5)=ang2(i);
end
mesh(1,6)=ABPA;

% Centro de la i-ésima placa
angmeshABPA=linspace(0,ABPA,ii);
angmesh=zeros(1,ii-1);

for i=1:(ii-1)
    angmesh(i)=((angmeshABPA(i)+angmeshABPA(i+1))/2);
end

gmesh=zeros(ii-1,5);
for i=1:(ii-1)
    % coordenada X del centroide de la i-ésima placa
    gmesh(i,1)=(mesh(i,1)+mesh(i+1,1))/2;
    % coordenada Y del centroide de la i-ésima placa
    gmesh(i,2)=(mesh(i,2)+mesh(i+1,2))/2;
    % ángulo normal al álabe
    gmesh(i,3)=pi-(mesh(i,4)+mesh(i+1,4))/2;
    % ángulo tangente al álabe
    gmesh(i,4)=pi/2-APBD-angmesh(i);
    % radio al centro
    gmesh(i,5)=(((gmesh(i,1).^2)+(gmesh(i,2).^2))^(1/2));
end

% longitud de la i-ésima placa [mm]
amesh(1)=SBP*((2*(1-cos(ABPA/ii)))^(1/2));

% Ancho de la i-ésima placa [mm]

```

```
amesh(2)=geo_d(7)/round(geo_d(7)/amesh(1));  
  
% altura triangulo  
amesh(3)=SBP*sin(pi/2-(ABPA/(2*ii)));  
  
% numero de elementos  
amesh(4)=round(geo_d(7)/amesh(1));  
  
end
```

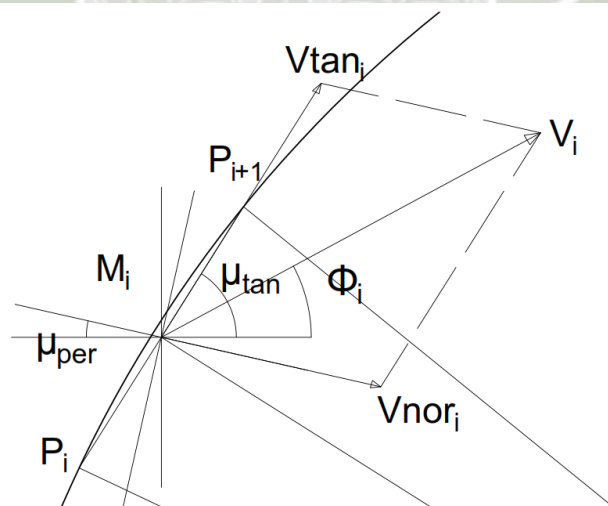


5.2 CÁLCULO DE VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS

5.2.1 Introducción y alcances

Se usará la teoría de bombas centrífugas para calcular la velocidad absoluta y el ángulo de ataque del fluido en cada punto M_i de la malla del álabe es necesario primero calcular la velocidad relativa y la velocidad tangencial. Todos los datos relevantes serán calculados en la función **velocidad.m**. programada en Matlab.

- Se asumirá que las partículas disueltas en el agua tienen la misma velocidad y dirección que el flujo.
- Se asumirá como referencia el álabe como elemento estático, teniendo de esta forma más facilidad al calcular la velocidades tangenciales y normales relativas al álabe. Bajo esta premisa la velocidad normal o perpendicular al álabe tiene sentido contrario (en dirección opuesta al giro de la bomba). Esto se explica como que el fluido está impactando el álabe.



Gráfica 37: Vectores velocidad normal, tangencial, absoluta y ángulo de ataque

FUENTE: Elaboración propia

5.2.2 Datos de entrada de la función “velocidad.m”

- Velocidad angular [N] en [RPM] dato inicial.
- Ángulo normal al álabe [μ_{nor}] calculado a través de **geo.m**.
- Ángulo tangente al álabe [μ_{tan}] calculado a través de **geo.m**.
- Radio al centro del impulsor [R_{Mi}] calculado a través de **geo.m**.
- Altura del álabe [h_a] en [mm] dato inicial.
- Número de álabes [Z] dato inicial.

5.2.3 Datos de salida de la función “velocidad.m”

- Velocidad absoluta [V_i] en [m/s].
- Ángulo de impacto [ϕ_i] en grados.

5.2.4 Cálculo de la velocidad tangencial

La velocidad tangencial se define como la velocidad de un punto en una circunferencia producida por una velocidad angular, en un impulsor es tangente a la circunferencia del ojo de succión, pero tiene un ángulo normal al radio al centro del ojo de succión, por eso a partir de ahora se le denominará velocidad normal (respecto a la placa i del álabe). La velocidad normal para cada i -ésima placa viene definida por:

$$V_{tan,i} = \frac{\pi}{30} \frac{N}{1000} r_i \quad \text{Eq. (5.28)}$$

Donde:

$V_{tan,i}$ Velocidad tangencial [m/s].

N Velocidad angular [RPM].

r_i Radio al centro del impulsor para cada i -ésima placa [mm].

Según la Gráfica 37, el ángulo que tiene la velocidad normal viene dado por la expresión, en referencia al ángulo tangente al álabe.

$$\theta_{tan,i} = 90 - \tan^{-1} \frac{M_{y,i}}{M_{x,i}} - \alpha_{PBD} - \theta_i \quad Eq. (5.29)$$

5.2.5 Cálculo de la velocidad relativa

La velocidad relativa para cada i -ésima placa viene definida por:

$$V_{rel,i} = 277.78 \frac{Q_m}{\left(\frac{2\pi r_i}{Z} - e\right) h_a} \quad Eq. (5.30)$$

Donde:

$V_{rel,i}$ Velocidad relativa de la placa i [m/s].

Q_m Caudal de la mezcla [m³/hr].

r_i Radio al centro del impulsor para cada i -ésima placa [mm].

Z Número de álabes

e Espesor del álabe [mm].

h_a Altura del álabe [mm].

Según la Gráfica 35, este ángulo se toma como referencia para calcular la velocidad absoluta de impacto.

5.2.6 Cálculo de la velocidad absoluta de impacto

Está definida como la suma de los vectores de velocidad absoluta, que es la suma de las coordenadas cartesianas x y y de las componentes respectivamente:

$$\bar{V}_{abs,i} = \bar{V}_{rel,i} + \bar{V}_{tan,i} \quad Eq. (5.31)$$

El ángulo de impacto viene dado por la ecuación:

$$\varphi_i = \tan^{-1} \frac{V_{abs,i,y}}{V_{abs,i,x}} \quad \text{Eq. (5.32)}$$

Este vector se usará para calcular la tasa de erosión en cada elemento del álabe.

Donde:

$\bar{V}_{abs,i}$	Vector velocidad absoluta de impacto para cada i-ésima placa [m/s].
$V_{abs,i,y}$	Componente vertical del vector velocidad absoluta de impacto para cada i-ésima placa [m/s].
$V_{abs,i,x}$	Componente horizontal del vector velocidad absoluta de impacto para cada i-ésima placa [m/s].
φ_i	Ángulo de impacto para cada i-ésima placa

5.2.7 Código del archivo “velocidad.m” en Matlab.

```
function V=velocidad(inst_d,slu_d,gmesh,geo_d,ii)
% Entrada:
% inst_d: Matriz de datos de la instalación
% slud_d: Matriz de datos del slurry
% gmesh: Matriz de coordenadas de las placas
% geo_d: Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% V: Matriz de velocidades y ángulos

% velocidad angular
w=inst_d(1)*(pi/30);

% Inicialización de matrices
Utan=zeros(ii-1,4);
Wrel=zeros(ii-1,3);
V=zeros(ii-1,5);

for i=1:ii-1
    % Cálculo de velocidad tangencial al álabe para cada i-
    %ésima placa [m/s]
    Utan(i,1)=w*gmesh(i,5)/1000;

    Utan(i,2)=Utan(i,1)*cos(gmesh(i,3)-gmesh(i,4));
    Utan(i,3)=Utan(i,1)*sin(gmesh(i,3)-gmesh(i,4));
```

```
Utan(i,4)=(gmesh(i,3)-gmesh(i,4))*(180/pi);

% Cálculo de velocidad relativa i-ésima placa [m/s]
Wrel(i,1)=(slu_d(4)/3600)/(((2*pi*gmesh(i,5))/geo_d(5)-
geo_d(6))*geo_d(7)*1e-6);

Wrel(i,2)=Wrel(i,1);
Wrel(i,3)=0;

% Cálculo de velocidad absoluta de y ángulo de impacto
para cada i-ésima placa
% suma de componentes horizontales y verticales de cada i-
ésima placa
V(i,3)=-Utan(i,2)+Wrel(i,2);
V(i,4)=-Utan(i,3)+Wrel(i,3);

% Ángulo de impacto [rad]
V(i,2)=atan(V(i,4)/V(i,3));
V(i,2)=abs(V(i,2));
% Velocidad absoluta de impacto [m/s]
V(i,1)=(((V(i,3).^2)+V(i,4).^2)+2*V(i,3)*V(i,4)*cos(V(i,2)))
).^^(1/2);

% Cálculo de velocidad absoluta y ángulo de salida [m/s]
% suma de componentes horizontales y verticales de cada i-
ésima placa

% Velocidad relativa [m/s]
V(i,5)=Wrel(i,1);
% Velocidad tangencial [m/s]
V(i,6)=Utan(i,1);

end

end
```

5.3 CÁLCULO DE TASA DE EROSIÓN

5.3.1 Introducción y alcances

Se usarán las ecuaciones predictivas de erosión por impacto de partículas para el cálculo de la tasa de erosión. Se utilizará el modelo de Oka, expuesto en el Capítulo II. Todos los datos relevantes serán calculados en la función *erosion*.

Se utiliza el modelo de Oka por los siguientes motivos:

- Es un modelo cuya función de ángulo de impacto se adapta tanto para materiales dúctiles como para materiales duros.
- El modelo incluye como variable de entrada la dureza del material objetivo, en este caso el material de los álabes
- El modelo incluye como variable el diámetro promedio de partícula, lo que resulta provechoso para darle flexibilidad al modelo.
- Sus resultados experimentales se aproximan bastante al modelo, como se puede apreciar en la Gráfica 11.
- Todas sus variables pueden ser calculadas a partir de los datos experimentales presentados y contenidos en las Tablas 1 y 2.

5.3.2 Datos de entrada de la función “erosion.m”

- Dureza Vickers del material del impulsor [Hv] en [Gpa] dato inicial.
- Diámetro de la partícula [d] en [micras] dato inicial.
- Velocidad absoluta de impacto de la placa i [$\bar{V}_{abs,i}$] calculado con **velocidad.m**.
- Ángulo de impacto de la placa i [φ_i] calculado con **velocidad.m**.
- Constantes del modelo de Oka de Tabla 1 y Tabla 2.

- Caudal de la mezcla [Q_m] en [m³/hr] dato inicial.
- Densidad del material de impulsor [ρ_{imp}] en [kg/m³] dato inicial.
- Altura del álabe [h_a] en [mm] dato inicial.
- Número de álabes [Z] dato inicial.

5.3.3 Datos de salida de la función “erosion.m”

- Tasa de remoción volumétrica a través del tiempo para cada i -ésima placa [W_{oka}] en [mm³/hr].

5.3.4 Calculo del flujo másico de partículas que impactan cada i -ésima placa.

El flujo másico de solidos se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{m}_{s,i} = C_v \rho_s Q_{m,i} \quad \text{Eq. (5.33)}$$

El caudal que impacta para cada i -ésima placa es:

$$Q_{m,i} = \frac{\bar{V}_{abs,i}}{2777.78} \frac{La}{ENT \left(\frac{h_a}{L} \right)_i} \quad \text{Eq. (5.34)}$$

Donde L es la longitud para cada i -ésima placa de la malla en milímetros y se define de la siguiente manera:

$$L = \overline{BP} \sqrt{2 - 2\cos\left(\frac{\alpha BPA}{i}\right)} \quad \text{Eq. (5.35)}$$

El ancho a para cada i -ésima placa en milímetros se define como lo siguiente:

$$a = \frac{h_a}{ENT \left(\frac{h_a}{L} \right)} \quad \text{Eq. (5.36)}$$

La densidad de la mezcla está definida por la siguiente formula, se encontraron mediante la función **slurry** programada en Matlab:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{C_w}{\rho_s} + \frac{(1 - C_w)}{\rho_l}} \quad \text{Eq. (5.37)}$$

La concentración en volumen de la mezcla de slurry está definida por la siguiente formula:

$$C_v = \frac{C_w \rho_m}{\rho_s} \quad \text{Eq. (5.38)}$$

Donde:

$\dot{m}_{s,i}$	Flujo másico de sólidos para cada i-ésima placa [kg/hr].
ρ_s	Densidad de las partículas sólidas [kg/m ³].
$Q_{m,i}$	Caudal de la mezcla para cada i-ésima placa [m ³ /hr].
$\bar{V}_{abs,i}$	Velocidad absoluta definida en la ecuación (5.31) [m/s].
φ_i	Ángulo de ataque definido en la ecuación (5.32) [deg]
L	Largo de la placa i [mm].
a	Ancho de la placa i [mm].
\overline{BP}	Radio del arco de álabe definido en la ecuación (5.20) en [mm].
α_{BPA}	Ángulo del arco de álabe definido en la ecuación (5.17) en [deg].
i	Número de placas igual a 100.
h_a	Altura del álabe [mm].
ρ_m	Densidad de la mezcla [kg/m ³].
C_w	Concentración en peso.
ρ_l	Densidad del agua [kg/m ³].
C_v	Concentración en volumen.

5.3.5 Cálculo de tasa de volumen erosionado en cada *i*-ésima placa

Con las ecuaciones 2.11, 2.12 y 2.13 se puede calcular la tasa de erosión en milímetros cúbicos de material por kilogramo de slurry que pasa por una placa *i* de álabe. La tasa de erosión para cada *i*-ésima placa es:

$$E_{90,i} = K(Hv)^{k1} \left(\frac{V_{abs,i}}{V'} \right)^{k2} \left(\frac{d}{d'} \right)^{k3} \quad \text{Eq. (5.39)}$$

$$g(\varphi_i) = (\sin \varphi_i)^{n1} (1 + HV(1 - \sin \varphi_i))^{n2} \quad \text{Eq. (5.40)}$$

$$ER_i = E_{90,i} g(\varphi_i) \quad \text{Eq. (5.41)}$$

Donde:

ER Tasa de Erosión volumétrica por unidad de masa de erosivo [mm³/kg].

E₉₀ Tasa de erosión en ángulo normal [mm³/kg].

g(α) Función del ángulo de impacto.

α Ángulo de ataque.

K Factor de forma del erosivo.

Hv Dureza Vickers del material erosivo [GPa].

V Velocidad absoluta de las partículas erosivas [m/s].

d Diámetro promedio de las partículas erosivas [micras].

k₁, k₂ y k₃ Constante de indentación y penetración de partículas Tabla 1.

n₁ y n₁ Constantes para cada material determinado experimentalmente Tabla 2.

El subíndice *i* indica que pertenece a cada “placa *i*”.

La tasa de erosión por unidad de tiempo para cada elemento por álabe es:

$$W_{oka,i} = ER_i \dot{m}_{s,i} \quad \text{Eq. (5.42)}$$

Donde:

$W_{OKA,i}$ Tasa de remoción volumétrica a través del tiempo para cada i-ésima placa [mm³/hr].

ER_i Tasa de erosión volumétrica de Oka [mm³/kg].

$\dot{m}_{p,i}$ Flujo másico de material erosivo [kg/hr] para cada i-ésima placa.

5.3.6 Código del archivo “erosion.m” en Matlab

```
function [volR_tas,mati_d]=erosion(matg_d,slu_d,V,amesh,ii)

% Entrada:
% matg_d: Matriz de datos de las partículas sólidas
% slud_d: Matriz de datos del slurry
% V: Matriz de velocidades y ángulos
% amesh: Matriz de datos de la altura del álabe

% Salida
% volR_tas Matriz de tasa de volúmen removido en cada placa
% mati_d: Matriz de datos del material del impulsor

% Datos del material del impulsor: Acero alto cromo
% densidad [kg/m3]
rhom=7890;
% dureza Vickers (Gpa)
Hv=600*0.009807;
mati_d=[rhom,Hv];

% datos erosión
% Modelo de Oka
% Factor de forma del abrasivo
okaK=65;
% Constantes de penetración
okak1=-0.12;
okak2=2.3*((mati_d(2)^(0.038)));
okak3=0.19;
% Velocidad experimental [m/s]
vin=104;
% Diámetro de la partícula experimental [micras]
dpin=326;
% Constantes del abrasivo
okan1=0.71*((mati_d(2)^(0.14)));
okan2=2.4*((mati_d(2)^(-0.94)));
```

```

% Inicialización de matrices
okang=zeros(ii-1,1);
oka90=zeros(ii-1,1);
volR_tas=zeros(ii-1,1);
fmg=zeros(ii-1,1);

% Resolución del modelo de Oka
for i=1:ii-1
    % Cálculo de erosión normal y función de impacto de Oka

oka90(i,1)=okaK*(2*(mati_d(2)).^okak1)*((V(i,1)/vin).^okak2)*
(matg_d(3)/dpin).^okak3);
    okang(i,1)=(((sin(V(i,2))).^okan1))*((1+mati_d(2)*(1-
sin(V(i,2))))).^okan2);
    % Cálculo de tasa de erosión a través del tiempo
    fmg(i,1)=V(i,1)*amesh(1)*amesh(2)*1e-
6*slu_d(3)*matg_d(1)*(3600/(amesh(4)*ii));
    volR_tas(i,1)=okang(i,1)*oka90(i,1)*fmg(i,1);
end
end

```

5.4 CALCULO DE TASA DE REMOCIÓN DE MASA Y DE ESPESOR

Calculados a partir de la función “**perdmas.m**” a partir de “pérdida de masa”.

5.4.1 Variables de entrada de la función “perdmas.m”

- Tasa de remoción volumétrica a través del tiempo para cada i-ésima placa [W_{oka}] en [mm³/hr] calculada con la función “**erosion.m**”.
- Espesor del álabe [e] en [mm] dato inicial.

5.4.2 Variables de salida de la función “perdmas.m”

- Tasa de remoción de espesor a través del tiempo [$\Delta e_{r,i}$] en [mm/hr].
- Tiempo medio entre fallas [MTBF] en [horas].
- Masa perdida para cada i-ésima placa [$m_{p,i}$] en [kg].
- Masa pérdida total [$m_{p,total}$] en [kg].

- Espesor removido para cada i-ésima placa [e_i] en [mm].

5.4.3 Cálculo de tasa de masa removida en la placa i por álabe

La tasa de masa perdida a lo largo de álabe para cada i-ésima placa es:

$$\Delta m_{p,i} = \frac{W_{OKA,i} \rho_{imp}}{(1000)^3} \quad \text{Eq. (5.43)}$$

Donde:

$\Delta m_{p,i}$ Masa removida de la placa i por álabe [kg/hr]

$W_{OKA,i}$ Tasa de remoción de material a través del tiempo [mm³/hr]

ρ_{imp} Masa del material del impulsor [kg/m³]

5.4.4 Cálculo de tasa masa pérdida total para cada álabe

La pérdida de masa a lo largo de álabe para cada i-ésima placa es:

$$m_{p,total} = ENT \left(\frac{h_a}{L} \right) \sum_1^i \Delta m_{p,i} \quad \text{Eq. (5.44)}$$

Donde h_a y L son la altura del álabe y longitud de cada placa y ENT es la función en MATLAB que devuelve el número entero. El resultado en kilogramos de material del impulsor para cada álabe, solo se considera la cara en el lado de presión del álabe ya que es donde existen mayores velocidades de impacto según **Centrifugal Pumps** (Gulich, 2008).

5.4.5 Cálculo de tasa de espesor removido por unidad de tiempo para cada i-ésima placa

El espesor se considerará como el segmento colineal a la bisectriz del ángulo que forma cada i-ésima placa.

Las relaciones geométricas pueden ser halladas a través de la Gráfica 38. Al ser una ecuación cuadrática solo se considera la solución positiva.

$$-\frac{\Delta e_{r,i}^2 L}{2\overline{M}'_i} a + \Delta e_{r,i} La - W_{oka,i} = 0 \quad \text{Eq. (5.45)}$$

Donde L y a fueron definidas en la ecuación 5.35 y 5.36 respectivamente

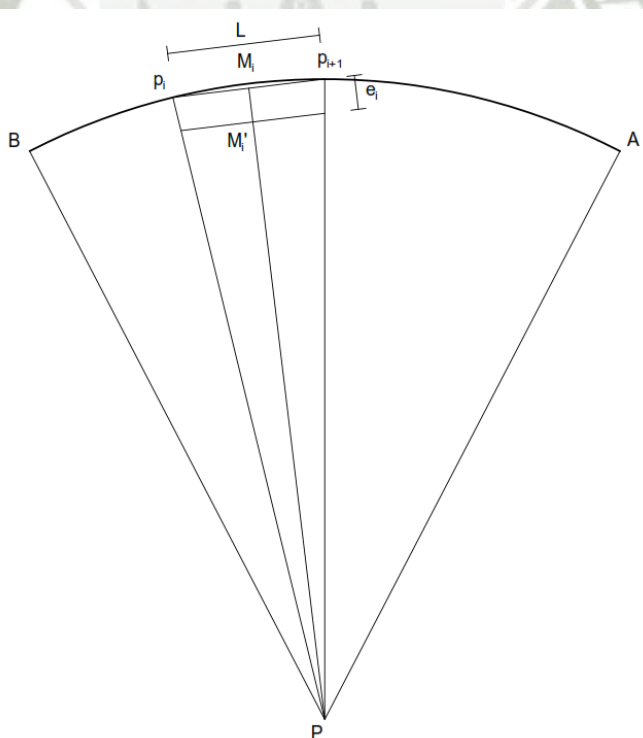
La función ENT brinda el entero más cercano hacia arriba, la razón por la que se aplica esta ecuación es para tener un numero entero de subdivisiones en la altura del álabe.

Y \overline{PM} se define como:

$$\overline{M}'_i = \overline{BP} \sin \left(90 - \frac{\angle BPA}{2i} \right) \quad \text{Eq. (5.46)}$$

La ecuación (5.39) al ser de forma cuadrática solo se considera la solución positiva.

El resultado de la ecuación (5.39) tiene unidades en [mm/hr].



Gráfica 38: Relaciones geométricas en la cara del álabe.

FUENTE: Elaboración propia

5.4.6 Cálculo del tiempo medio entre fallas según modelo propuesto

El tiempo medio entre fallas según el modelo propuesto al 80% del espesor nominal del álabe se calcula con la siguiente fórmula:

$$MTBF = \frac{0.8e}{MAX(\Delta e_{r,i})} \quad \text{Eq. (5.47)}$$

Donde MAX es la función de MATLAB que encuentra el máximo valor de tasa de espesor removido.

MTBF Tiempo medio entre fallas [horas].

e Espesor del álabe [mm]

$\Delta e_{r,i}$ Tasa de espesor removido [mm/hr]

5.4.7 Código del archivo “perdm.m” en Matlab

```
function
[esp_tasMAX,esp_tasa,mptot,mas_tasa,esp_tot,mesher,MTBF]=perdm
as(amesh,mati_d,geo_d,volR_tas,mesh,tens,ii)

% Entrada:
% amesh:            Matriz de datos de la altura del álabe
% mati_d:           Matriz de datos del material del impulsor
% geo_d:            Matriz de datos de la geometría del impulsor
% volR_tas          Matriz de tasa de volumen removido en cada
placa
% mesh             Matriz de coordenadas de puntos iniciales de
placas
% tens             Matriz de tiempos de ensayo

% Salida
% esp_tasMAX        Máxima tasa de remoción de espesor
% mptot             Masa total removida
% mas_tasa          Matriz de tasa de remoción de masa
% esp_tot           Matriz de espesor removido en cada placa
% mesher            Matriz de coordenadas de placas erosionadas
% MTBF             Tiempo medio entre fallos

digits(8);
% Inicialización de matrices
mas_tasa=zeros(ii-1,length(tens));
esp_tasa=zeros(ii-1,1);
esp_tot=zeros(ii-1,length(tens));
```

```
mas_tot=zeros(1,length(tens));
mesher=zeros(ii-1,4,length(tens));
xer=zeros(ii-1,2,length(tens));
yer=zeros(ii-1,2,length(tens));
c=zeros(1,ii-1);

for jj=1:length(tens)

    for i=2:ii;
        % Cálculo de masa perdida en la i-ésima placa [kg]
        mas_tasa(i-1,jj)=volR_tas(i-1)*mati_d(1)*1e-
9*tens(jj)*amesh(4);
        % Cálculo de masa perdida total
        mas_tot(1,jj)=mas_tot(1,jj)+mas_tasa(i-1,jj);
    end

    % Cálculo de tasa de espesor removido en la i-ésima placa
[mm]
    for i=1:ii-1
        a=amesh(1)*amesh(2)/(2*amesh(3));
        b=amesh(1)*amesh(2);
        co=-volR_tas(i);
        esp_tasa(i,1)=(-b+((b^2)-4*a*co)^(1/2))/(2*a);
        esp_tot(i,jj)=esp_tasa(i,1)*tens(jj);
    end

    % Máxima tasa de remoción de espesor
    esp_tasMAX=max(esp_tasa(:,1));

    % Cálculo de MTBF
    MTBF=0.8*geo_d(6)/esp_tasMAX;

    % Generado de mallado de erosión en el álabe
    tetha=mesh(1,6)/ii;
    phi=mesh(:,5);

    for i=2:ii-1
        if esp_tot(i,jj)<geo_d(6)
            c(i)=esp_tot(i,jj)/cos(tetha/2);
        else
            c(i)=NaN;
        end
        % punto inferior
        xer(i,1)=mesh(i,1)+c(i)*cos(phi(i)+tetha/2);
        yer(i,1)=mesh(i,2)-c(i)*sin(phi(i)+tetha/2);
    end

    for i=2:ii
        % punto superior
        xer(i-1,2)=mesh(i-1,1)+c(i-1)*cos(phi(i-1));
        yer(i-1,2)=mesh(i-1,2)-c(i-1)*sin(phi(i-1));
    end
end
```

```

for i=1:ii-1;
    mesher(i,1,jj)=xer(i,1);
    mesher(i,2,jj)=yer(i,1);
    mesher(i,3,jj)=xer(i,2);
    mesher(i,4,jj)=yer(i,2);
end
end
mesher(1, :, :) = NaN;
mptot = mas_tot;
end
    
```

5.5 CALCULO DE REMOCIÓN DE TASA DE MASA Y DE ESPESOR SEGÚN

GULICH

5.5.1 Variables de entrada de la función gulich.m

- Dureza Vickers del material del impulsor [Hv] en [Gpa] dato inicial.
- Diámetro de la partícula [d] en [micras] dato inicial.
- Espesor del álabe [e] en [mm] dato inicial.
- Concentración en peso [C_w] dato inicial.
- Densidad de la arena [ρ_s] en [kg/m³] dato inicial.

5.5.2 Variables de salida de la función gulich.m

- Tiempo medio entre fallas [MTBF_{Gulich}] en [horas].

5.5.3 Modelo de predicción de tasa de remoción de espesor de Gulich

El modelo de Gulich nos servirá para comparar los resultados con el modelo que se propone en esta tesis.

$$\frac{ER_{Gulich}}{ER_{a,ref}} = \frac{F_{Form} F_{Mat} F_{KG} F_{KF} F_{HS}}{1 + \frac{C_s}{\rho_s}} \left(\frac{C_{s,eq}}{C_{s,ref}} \right) \left(\frac{W_{mix}}{W_{ref}} \right)^3 \quad Eq. (5.48)$$

$$c_s = \frac{C_w}{1 - C_w} \rho \quad \text{Eq. (5.49)}$$

$$c_{s,eq} = c_s \left(\frac{H_{Mat}}{H_{Quar}} \right) \quad \text{Eq. (5.50)}$$

$$w_{mix} = u_2 - c_{2u} \quad \text{Eq. (5.51)}$$

$$F_{Mat} = 0.54 \frac{H_{Ref}}{H_{Mat}} - 0.22 \quad \text{Eq. (5.52)}$$

$$F_{KG} = \frac{d_s}{d_{ref}} \quad \text{Eq. (5.53)}$$

Donde:

- ER_a Tasa de erosión [mm/año].
- $ER_{a,ref}$ Tasa de erosión de referencia igual a 1 mm/año.
- F_{Form} Factor de forma con valor de 40 para la cara del álabe.
- F_{Mat} Factor de dureza del material del impulsor.
- F_{KG} Factor geométrico de la partícula erosiva.
- F_{KF} Factor de forma de la partícula erosiva cuyo valor va desde 0.6 para granos redondos a 1 para granos con ángulos agudos.
- F_{HS} Factor de dureza de la partícula erosiva entre 0.1 a 0.5
- ρ_s Densidad de las partículas erosivas [kg/m³].
- C_s Contenido de solidos equivalentes por volumen de agua [kg/m³].
- $C_{s,eq}$ Contenido de solidos equivalentes según dureza por volumen de agua [kg/m³].
- w_{mix} Velocidad de la mezcla [m/s].
- w_{ref} Velocidad de la mezcla de referencia igual a 10 m/s.

u_2	Velocidad angular en la salida del impulsor [m/s].
c_{2u}	Componente tangencial de la velocidad absoluta [m/s].
C_w	Concentración por peso [kg/kg]
H_{Ref}	Dureza Vickers de referencia igual a 700HV
H_{Quar}	Dureza del Cuarzo equivalente a 1150HV
H_{Mat}	Dureza Vickers del material del impulsor.
d_s	Diámetro promedio de partícula [mm].
d_{ref}	Diámetro promedio de partícula de referencia igual a 1mm.

Ya que el factor de forma es el único valor que no se conoce, se establecerá un valor promedio en el cual el modelo propuesto podrá ser comparado con el modelo de Gulich. De igual manera que el modelo que se propone en esta tesis las variables de entrada serán el diámetro de partícula y la concentración en peso (cuyo resultado se ve reflejado en el flujo másico de sólidos de la mezcla). Los resultados del modelo de Gulich fueron hallados con la función **gulich** en Matlab.

5.5.4 Cálculo del tiempo medio entre fallas según modelo de Gulich

El tiempo medio entre fallas al 80% del espesor nominal del álabe se encuentra con la siguiente fórmula:

$$MTBF_{Gulich} = \frac{0.8e}{ER_{gul}} 8640 \quad Eq. (5.54)$$

Donde MAX es la función que encuentra el máximo valor de tasa de espesor removido.

Las unidades de MTBF se encuentran en horas.

Donde:

MTBF Tiempo medio entre fallas [horas].

e	Espesor del álabe [mm]
$\Delta e_{r,i}$	Tasa de espesor removido [mm/año]

5.5.5 Código del archivo “gulich.m” en Matlab

```
function MTBFgul=gulich(inst_d,mati_d,matg_d,V,geo_d)
% Entrada:
% inst_d:   Matriz de datos de la instalación
% gmesh    Matriz de datos de centroides placas iniciales
% mati_d:   Matriz de datos del material del impulsor
% matg_d:   Matriz de datos de las partículas sólidas
% V:       Matriz de velocidades y ángulos
% geo_d:   Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% MTBFgul  Tiempo medio entre fallos según Gulich

% Ingreso de variables del modelo
fform=40;
hmat=mati_d(2)/0.009807;
fmat=0.54*(700/hmat)-0.22;
fkg=matg_d(3)*1e-3;
fkf=0.8;
fhs=0.5;
cs=inst_d(3)*1000/(1-inst_d(3));
cseq=inst_d(3)*1000/(1-inst_d(3))*(hmat/1150);

% Cálculo de velocidad de la mezcla
w=V(1,5)*cos(geo_d(4)*pi/180);

gulEout=(fform*fmat*fkg*fkf*fhs/(1+cs/matg_d(1)))*cseq*(w/10)^3;
MTBFgul=(0.8*geo_d(6)/gulEout)*8640;

end
```

5.6 CÓDIGO DE EJECUCIÓN Y REPRESENTACIÓN

5.6.1 Código del archivo “plotER.m” en Matlab

En Matlab los datos de salida en manera de matrices necesitan instrucciones para ser mostradas de manera comprensible y ordenada, para ello fue escrita la función **plotER.m** de tal manera que nos muestre gráficas con las variables (velocidad

absoluta, ángulo de impacto, tasa de erosión volumétrica, etc) que se necesitan analizar.

```
function
plotER(V,volR_tas,mass_tasa,esp_tasa,esp_tot,mcen,masha,masher,
geo_d,matg_d,tens,inst_d,ii)

% Entrada:
% V:      Matriz de velocidades y ángulos
% volR_tas Matriz de tasa de volumen removido en cada placa
% mass_tasa Matriz de tasa de remoción de masa
% esp_tot Matriz de espesor removido en cada placa
% mcen    Matriz de coordenadas de centros de impulsor
% masha   Matriz de coordenadas de las placas de todos los
álabes
% masher  Matriz de coordenadas de placas erosionadas
% geo_d:  Matriz de datos de la geometría del impulsor
% tens    Matriz de tiempos de ensayo
% inst_d: Matriz de datos de la instalación

% Salida
% Gráficas

% Inicialización de colores y ancho de líneas
lnwg=1.5;

% Geometría impulsor antes de erosión
fig1=figure(1);
set(fig1, 'Position', [0 0 500 500]);
plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);
axis off
title('Geometría inicial del Impulsor')
xlim([-mcen(ii,1)+20 mcen(ii,1)+20])
ylim([-mcen(ii,1)+20 mcen(ii,1)+20])
hold on
plot(mcen(:,3),mcen(:,4),'b','LineWidth',lnwg);
hold on
for k=1:2
    for i=1:geo_d(5)
plot(masha(i,:,k,1),masha(i,:,k,2),'k','LineWidth',lnwg)
        hold on
    end
end

% Gráfica de perfil de velocidades absolutas y ángulos de
impacto
fig2=figure(2);
set(fig2, 'Position', [0 0 800 700]);
subplot(2,1,1);
plot(V(:,1),'r','LineWidth',lnwg);
```

```
hold on
plot(V(:,5), 'g', 'LineWidth', lnwg);
hold on
plot(V(:,6), 'b', 'LineWidth', lnwg);
hold on
legend('Velocidad absoluta [V]', 'Velocidad relativa
[W]', 'Velocidad tangencial [U]', 'Location', 'northwest');
title('Perfil de velocidades')
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Velocidad absoluta de la partícula [m/s]')
hold on

vtemp=V(:,2)*(180/pi);
subplot(2,1,2);
plot(vtemp, 'r', 'LineWidth', lnwg);
title('Perfil de Ángulos')
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Ángulo de impacto de la partícula [deg]')
hold on

% Gráfica de tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor
fig3=figure(3);
set(fig3, 'Position', [0 0 800 900]);
subplot(2,1,1);
plot(volR_tas, 'r', 'LineWidth', lnwg);
title(['Tasa de Erosión Volumétrica [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Tasa de erosión volumétrica para cada placa i
[mm3/hr]')
hold on

subplot(2,1,2);
plot(esp_tasa, 'b', 'LineWidth', lnwg);
title(['Cantidad de espesor removido del álabe [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Tasa de espesor removido para cada placa i [mm/hr]')
hold on

% Gráfica de masa y espesor en elemento i
fig4=figure(4);
set(fig4, 'Position', [0 0 800 900]);
subplot(2,1,1);
plot(mas_tasa, 'LineWidth', lnwg);
legend('1000 horas', '3000 horas', '5000 horas');
title(['Cantidad de masa removida [Cw=' num2str(inst_d(3)*100)
'% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Masa perdida del elemento i [kg]')
hold on

subplot(2,1,2);
```

```

plot(esp_tot, 'LineWidth', lnwg);
legend('1000 horas', '3000 horas', '5000 horas');
title(['Cantidad de espesor removido del álabe [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']'])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Espesor removido del elemento i [mm]')
hold on

% Visualización de álabe erosionado

for jj=1:length(tens)

    % Por perfil
    fig6=figure(5+(jj-1)*2);
    set(fig6, 'Position', [0 0 500 500]);
    xt=zeros(ii-1,2,geo_d(5));
    yt=zeros(ii-1,2,geo_d(5));
    for j=1:geo_d(5)
        for i=1:ii-1
            xt(i,1,j)=mesher(i,1,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))-
mesher(i,2,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            xt(i,2,j)=mesher(i,3,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))-
mesher(i,4,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            yt(i,1,j)=mesher(i,2,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))+mesher(i,1,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            yt(i,2,j)=mesher(i,4,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))+mesher(i,3,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
        end
        for i=2:ii-2
            plot([xt(i,1,j) xt(i+1,2,j)], [yt(i,1,j)
yt(i+1,2,j)], 'r', 'LineWidth', lnwg);
            hold on
        end
    end
end

plot(mcen(:,1),mcen(:,2), 'b', 'LineWidth', lnwg);
xlim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
ylim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
hold on
plot(mcen(:,3),mcen(:,4), 'b', 'LineWidth', lnwg);
hold on

for i=1:geo_d(5)
    plot(mesha(i, :, 1, 1), mesha(i, :, 1, 2), '--
k', 'LineWidth', lnwg)
    hold on
end
for i=1:geo_d(5)

plot(mesha(i, :, 2, 1), mesha(i, :, 2, 2), 'k', 'LineWidth', lnwg)
    hold on
end

```

```

axis off
title(['Visualización de espesor removido ['
num2str(tens(jj)) ' horas Cw=' num2str(inst_d(3)*100) '% dp='
num2str(matg_d(3)) '\mum]'])
xlabel('Coordenada "x"')
ylabel('Coordenada "y"')
plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);

% Por puntos
fig7=figure(6+(jj-1)*2);
set(fig7, 'Position', [500 0 550 500]);
c=zeros(1,ii-1);

pointsize=10;
for k=1:jj
    for j=1:geo_d(5)
        for i=1:ii-1;
            c(i)=esp_tot(i,k);
        end
        scatter(xt(:,1,j),yt(:,2,j),pointsize,c,'filled');
        hold on
        scatter(xt(:,2,j),yt(:,2,j),pointsize,c,'filled');
        hold on
        colorbar;
    end
end
set(gca, 'CLim', [min(esp_tot(:,k)),max(esp_tot(:,k))])
end

axis off
title(['Visualización de espesor removido ['
num2str(tens(jj)) ' horas Cw=' num2str(inst_d(3)*100) '% dp='
num2str(matg_d(3)) '\mum]'])
xlabel('Coordenada "x"')
ylabel('Coordenada "y"')
plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);
% xlim([min(mesh(:,1))-20 max(mesha(1, :, 1, 1))+50])
% ylim([min(mesha(1, :, 2, 2))-20 max(mesh(:,2))+20])
plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);
xlim([-mcen(ii,1)+20 mcen(ii,1)+20])
ylim([-mcen(ii,1)+20 mcen(ii,1)+20])
hold on
plot(mcen(:,3),mcen(:,4),'b','LineWidth',lnwg);
hold on

for i=1:geo_d(5)
    plot(mesha(i, :, 1, 1),mesha(i, :, 1, 2), '--
k', 'LineWidth',lnwg)
    hold on
end
for i=1:geo_d(5)

plot(mesha(i, :, 2, 1),mesha(i, :, 2, 2), 'k', 'LineWidth',lnwg)

```

```
        hold on
    end

end

end
```

5.6.2 Código del archivo “principal.m” en Matlab

Las funciones creadas anteriormente no funcionarían si no se ejecutan en un orden establecido con las variables y datos de salida y/o entrada necesaria en cada línea del código, para ello es necesario reunir las a través de una función “**principal.m**”. Esta función llamada **principal.m** ejecuta todas las funciones anteriormente descritas.

```
function [esp_tasMAX,MTBF,MTBFgul]=principal(Cw, dp)
% Entrada:
% Cw:      Matriz de concentraciones en peso
% Z:      Matriz de número de álabes

% Salida
% esp_tasMAX  Máxima tasa de remoción de espesor
% mptot      Masa total removida
% MTBF       Tiempo medio entre fallos
% MTBFgul    Tiempo medio entre fallos según Gulich

%
% Datos de la instalación
%
% 1: velocidad angular [RPM]
N=600;
% 2: Caudal de la mezcla [m3/hr]
Qm=2000;
% 3: concentración en masa
% ingreso como variable independiente
% matriz de datos
inst_d=[N,Qm,Cw];

% Geometría del impulsor
% 1: radio externo impeller [mm]
rei=457;
% 2: radio interno impeller [mm]
rii=153;
% 3: angulo ataque del álabe entrada [deg]
Abeta1=55;
% 4: angulo ataque del álabe salida [deg]
Abeta2=25;
```

```

% 5: numero de álabes
dp=30 micras;
% 6: espesor alabe [mm]
ale=35;
% 7: altura alabe [mm]
alh=171;
% matriz salida de datos
geo_d=[rei,rii,Abeta1,Abeta2,Z,ale,alh];

%
% datos de las partículas
%
% densidad agua [kg/m3]
rhoa=1000;
% 1: densidad arena [kg/m3]
rhog=2600;
% 2: gravedad específica arena [adim]
Sg=rhog/rhoa;
% 3: diámetro de partícula [um]
% ingreso como variable independiente

% matriz de salida de datos
matg_d=[rhog,Sg,dp];

% datos del slurry
% 1: gravedad específica mexcla [adim]
Sm=Sg/((Sg-inst_d(3)*(Sg-1)));
% 3: concentración por volumen [adim]
Cv=inst_d(3)*Sm/Sg;
% 2: flujo másico sólidos[kg/hr]
fmg=Cv*rhog*Qm;
% matriz de salida de datos
slu_d=[Sm,fmg,Cv,Qm];

%
% Otros
%
% Numero de iteraciones
ii=100;
% Matriz de tiempo de ensayo [horas]
tens=[1000 3000 5000];

% Outputs
[gmesh,mesh,amesh,mcen,mesha]=geo(geo_d,ii);
V=velocidad(inst_d,slu_d,gmesh,geo_d,ii);
[volR_tas,mati_d]=erosion(matg_d,slu_d,V,amesh,ii);
[esp_tasMAX,esp_tasa,mptot,mas_tasa,esp_tot,mesher,MTBF]=perdm
as(amesh,mati_d,geo_d,volR_tas,mesh,tens,ii);
MTBFgul=gulich(inst_d,mati_d,matg_d,V,geo_d);
plotER(V,volR_tas,mas_tasa,esp_tasa,esp_tot,mcen,mesha,mesher,
geo_d,matg_d,tens,inst_d,ii);
end

```

5.6.3 Código del archivo “completo.m” en Matlab

La función **completo.m** ejecuta la función **principal.m** con las variables dependientes de número de álabes (3, 4 y 5) y concentración en peso (30, 40 y 50%) y grafica la relación entre MTBF calculado con el modelo propuesto y el calculado con el modelo de Gulich.

```
% Inicialización de matriz de concentraciones en peso
Cw=linspace(0.2,0.6,21);
% Inicialización de matriz de diámetro de partículas
dp=[30,40,50];
% Inicialización de matrices
MTBF=zeros(length(Cw),3);
MTBFgul=zeros(length(Cw),3);
esp_tasMAX=zeros(length(Cw),3);
mptot=zeros(length(Cw),3,3);

for i=1:length(Cw)
    for j=1:3

[esp_tasMAX(i,j),MTBF(i,j),MTBFgul(i,j)]=principal(Cw(i),dp(j)
);
        end
    end

% Gráficas de MTBF

MTBFout(1,:,1)=MTBF(6,:);
MTBFout(2,:,1)=MTBF(11,:);
MTBFout(3,:,1)=MTBF(16,:);
MTBFout(1,:,2)=MTBFgul(6,:);
MTBFout(2,:,2)=MTBFgul(11,:);
MTBFout(3,:,2)=MTBFgul(16,:);
MTBFout(1,:,3)=MTBFout(1,:,1)./MTBFout(1,:,2);
MTBFout(2,:,3)=MTBFout(2,:,1)./MTBFout(2,:,2);
MTBFout(3,:,3)=MTBFout(3,:,1)./MTBFout(3,:,2);
MTBFout(1,:,4)=MTBFout(1,:,1)./MTBFout(1,:,2)-1;
MTBFout(2,:,4)=MTBFout(2,:,1)./MTBFout(2,:,2)-1;
MTBFout(3,:,4)=MTBFout(3,:,1)./MTBFout(3,:,2)-1;

% Inicialización de colores y ancho de líneas
morado=[128 0 128]./255;
naranja=[255 165 0]./255;
verde=[0 128 0]./255;
mrksize=8;
lnwg=1.5;
for kk=1:2
    ecart=max(max(MTBFout(:,:,,kk)))+500;
```

```
end
% Validación de resultados
fig1=figure(1);
ay1=gca;
ay1.YAxis.Exponent = 0;
ay1.YAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
ax1=gca;
ax1.XAxis.Exponent = 0;
ax1.XAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
set(fig1, 'Position', [0 0 800 800])

plot([0 ecart],[0 ecart],'k','LineWidth',lnwg)
hold on
scatter(MTBFout(1,:,2),MTBFout(1,:,1),72,morado,'s','filled')
axis([0 ecart 0 ecart])
hold on
scatter(MTBFout(2,:,2),MTBFout(2,:,1),72,naranja,'d','filled')
hold on
scatter(MTBFout(3,:,2),MTBFout(3,:,1),72,verde,'filled')
hold on

plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,1,3)*ecart],'--r','LineWidth',lnwg)
hold on
plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,2,3)*ecart],'--g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,3,3)*ecart],'--b','LineWidth',lnwg)
hold on
[h,~]=legend('MTBFprop/MTBFgul=1','Cw=30%','Cw=40%','Cw=50%',
'dp=30\mum','dp=40\mum','dp=50\mum','Location','southeast');
title('Variación de resultados del modelo propuesto vs modelo
de Gulich')
xlabel('MTBF Gulich [hr]')
ylabel('MTBF propuesto [hr]')

% Comparación de resultados
fig2=figure(2);
% Continuo
plot(Cw*100,MTBF(:,1),'r')
axis([-inf inf 0 inf])

ay2 = gca;
ay2.YAxis.Exponent = 0;
ay2.YAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
set(fig2, 'Position', [800 0 800 800])

hold on
plot(Cw*100,MTBF(:,2),'g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBF(:,3),'b','LineWidth',lnwg)
hold on
```

```

plot(Cw*100,MTBFgul(:,1),'--r','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBFgul(:,2),'--g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBFgul(:,3),'--b','LineWidth',lnwg)
hold on
legend('Propuesto dp=30 \mum','Propuesto dp=40\mum','Propuesto
dp=50\mum','Gulich dp=30\mum','Gulich dp=40\mum','Gulich
dp=50\mum')
title('Comparación de resultados del modelo propuesto vs
modelo de Gulich')
xlabel('Concentración en peso [%]')
ylabel('Tiempo medio entre falas [hr]')

% Puntos propuesto
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace
Color','r')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','r')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','r')
hold on
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace
Color','g')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','g')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','g')
hold on
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace
Color','b')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','b')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa
ceColor','b')
hold on

% Puntos Gulich
plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'MarkerF
aceColor','r')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'Marke
rFaceColor','r')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'Marke
rFaceColor','r')
hold on

```

```

plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','g')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','g')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','g')
hold on
plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')
hold on
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')
hold on
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')
hold on

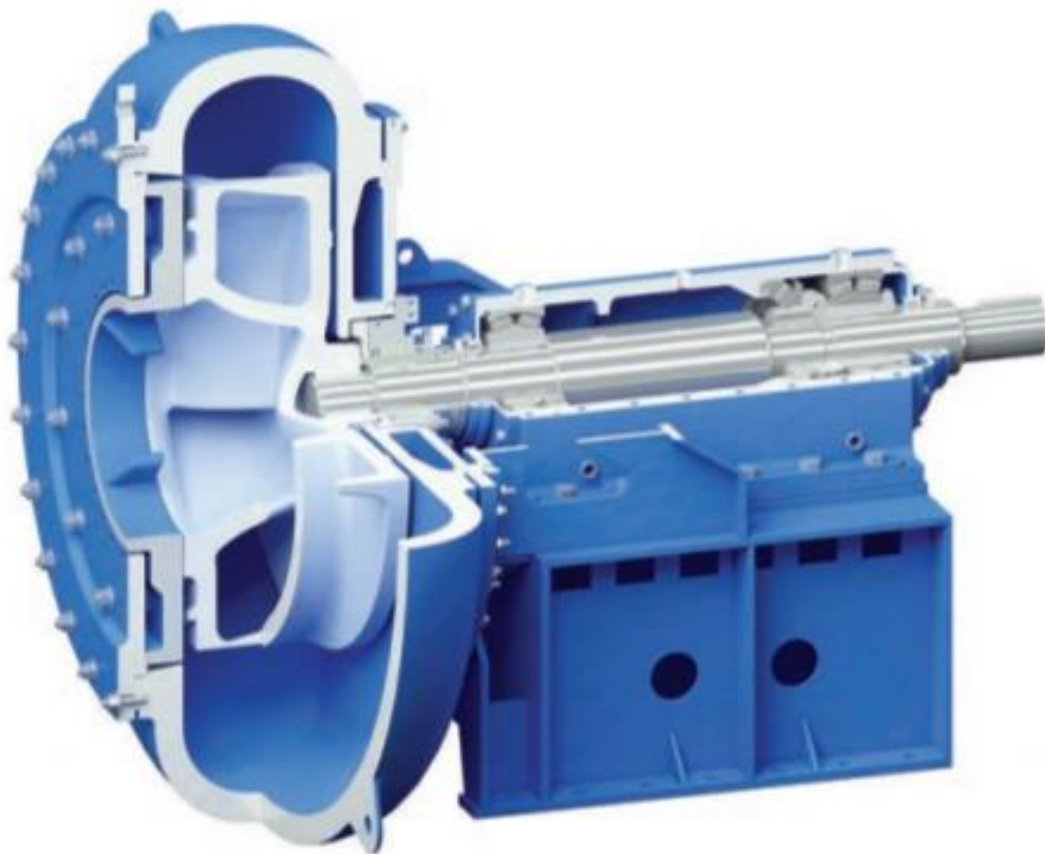
```



CAPITULO VI: PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

6.1 DATOS DE LA BOMBA PROPUESTA PARA EL ANÁLISIS

Para el análisis se usará una bomba centrífuga de acero sin recubrimiento marca GIW serie LSA cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 9, Se usará los datos nominales de altura y caudal en el BEP (punto de mejor eficiencia por sus siglas en ingles) en agua.



Gráfica 39: Bomba de slurry GIW serie LSA 10x12

FUENTE: https://www.ksb.com/ksb-us/Products_and_Markets/Mining/Severe_Duty_Slurry_Pumps/LSA_Series_Slurry_Pump/

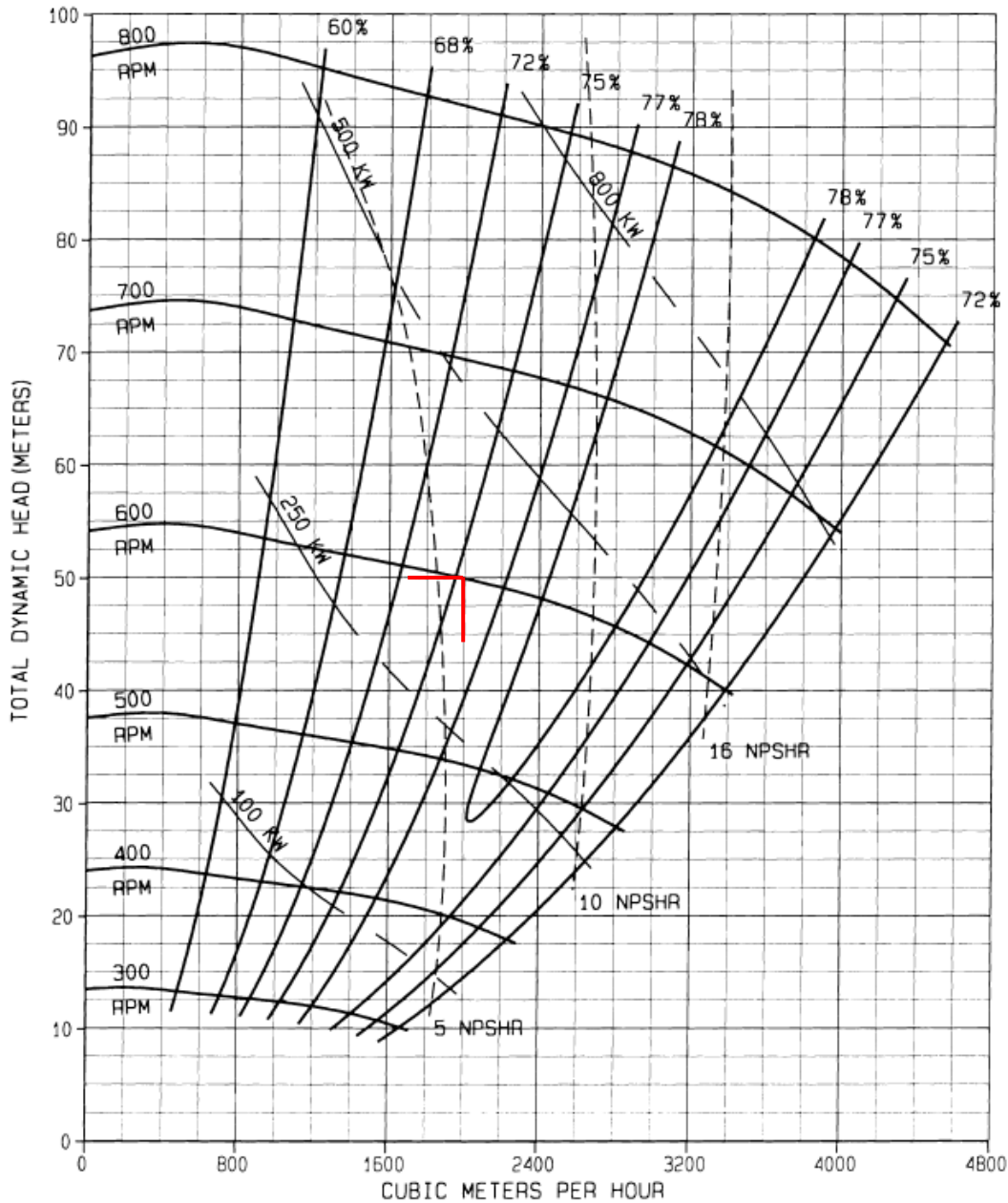
Pump Type LSA 10x12-36 (HD) CH10-1/4 /5ME 9-31/64	Model	Vane Diameter 914 MM	Free Passage 88X150MM
Clear Water Performance The effects of specific gravity, viscosity and solids on performance with slurry must be accounted for. Alternate choice for frame size or seal type may also have some effects.	Frame Size 4-5G	Seal Type K, F, M	Curve Number E 11A-05 TP Basis B 21A-05



GIW Industries Inc.

A KSB Company . KSB

APPROX. 250 MM DISCH. 300 MM SUCT.



Gráfica 40: Curva de la bomba de slurry GIW serie LSA 10x12 y punto de operación.

FUENTE:

<https://www.ksb.com/ksb->

[us/Products_and_Markets/Mining/Severe_Duty_Slurry_Pumps/LSA_Series_Slurry_Pump/](https://www.ksb.com/ksb-us/Products_and_Markets/Mining/Severe_Duty_Slurry_Pumps/LSA_Series_Slurry_Pump/)

6.2 DATOS DE INGRESO

Datos	Denominación	Unidad	Valor
Ángulo de ingreso del álabe	β_1	Deg	55
Ángulo de salida del álabe	β_2	Deg	25
Radio externo del impulsor	r_e	mm	457
Radio interno del impulsor	r_i	mm	153
Número de álabes	Z	3	
Espesor de los álabes	e	mm	35
Altura de los álabes	h	mm	171
Revoluciones por minuto	N	RPM	600
Tipo de acero	Alto cromo	ASTM A532 clase III 30%	
Dureza Vickers del material del impulsor	Hv	GPa	6.835
Densidad del material de impulsor	ρ_{imp}	Kg/m ³	7860
Diámetro de la partícula d ₆₀	D	Micras	30, 40 y 50
Concentración en peso	C _w	30, 40 y 50 %	
Densidad de las partículas	ρ_{arena}	Kg/m ³	2600
Caudal de la mezcla	Q _m	m ³ /hr	200
Altura (agua)	H	mca	50
Potencia (agua) para el QH indicado de agua	P	HP	500 HP
Tipo de material erosivo	Silice	Oxido de silicio	

Tabla 9: Datos de Entrada para modelo del impulsor

FUENTE: Elaboración propia.

6.3 RESULTADOS

6.3.1 Presentación de resultados

Según el modelo propuesto, se tienen los siguientes MTBF:

Diámetro de partículas	MTBF [horas]		
	dp=30 micras	dp=40 micras	dp=50 micras
Cw=30%	5168	4893	4690
Cw=40%	3583	3393	3252
Cw=50%	2633	2493	2390

Tabla 10: Resumen de MTBF propuestos para el modelo del impulsor

FUENTE: Elaboración propia.

Se puede observar que el valor del MTBF disminuye según aumenta el diámetro de partículas, siendo la tasa de erosión directamente al diámetro de partículas. También se puede observar que el MTBF disminuye a aumenta la concentración en peso de arena en el fluido que es un comportamiento esperado por la mayor cantidad de partículas que impactan cada parte del álabe.

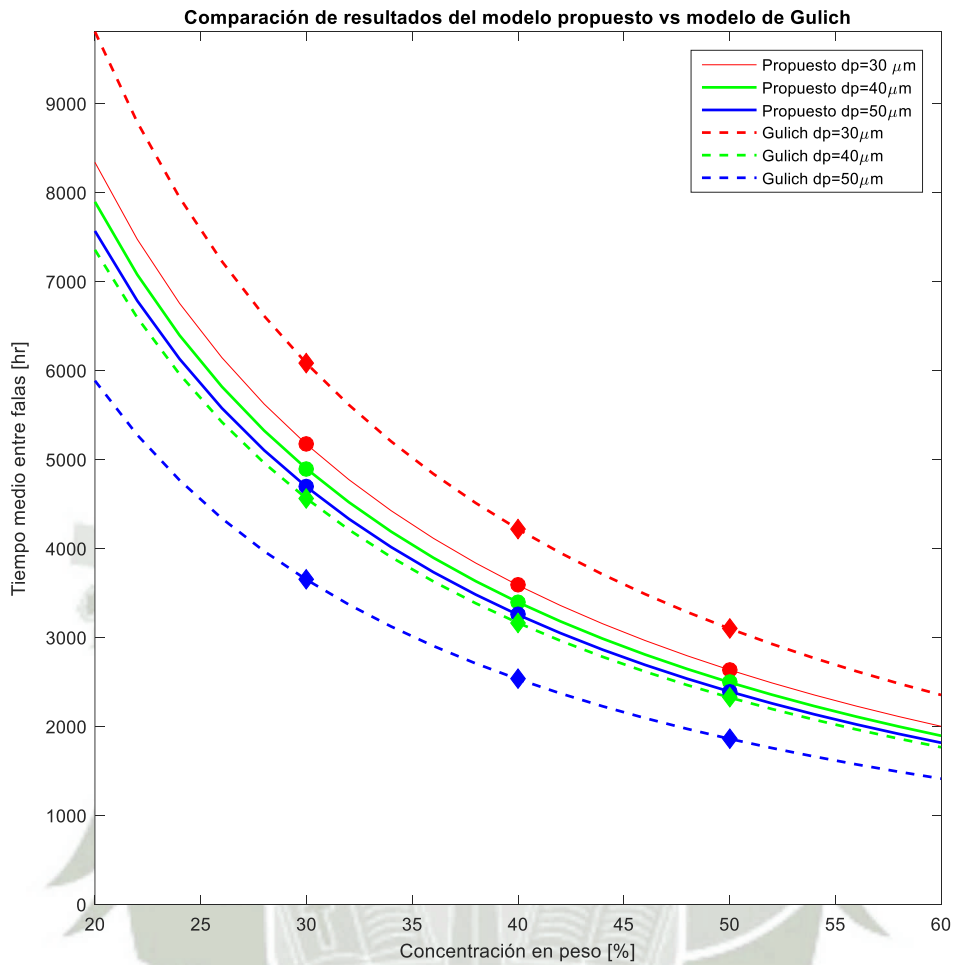
Según el modelo de Gulich, se tienen los siguientes MTBF:

Diámetro de partículas	MTBF [horas]		
	dp=30 micras	dp=40 micras	dp=50 micras
Cw=30%	6078	4558	3646
Cw=40%	4214	3161	2529
Cw=50%	3096	2322	1858

Tabla 11: Resumen de MTBF Gulich para el modelo del impulsor

FUENTE: Elaboración propia.

Los resultados de las Tablas 10 y 11 se pueden apreciar en la Gráfica 41:



Gráfica 41: Comparación de resultados del modelo propuesto vs modelo de Gulich

FUENTE: Elaboración propia.

La variación porcentual entre el MTBF propuesto y el MTBF calculado con el modelo de Gulich se puede encontrar en la Tabla 12

Diámetro de partículas	Variación [%]		
	dp=30 micras	dp=40 micras	dp=50 micras
Cw=30%	14.97	7.34	28.6
Cw=40%	14.97	7.34	28.6
Cw=50%	14.97	7.34	28.6

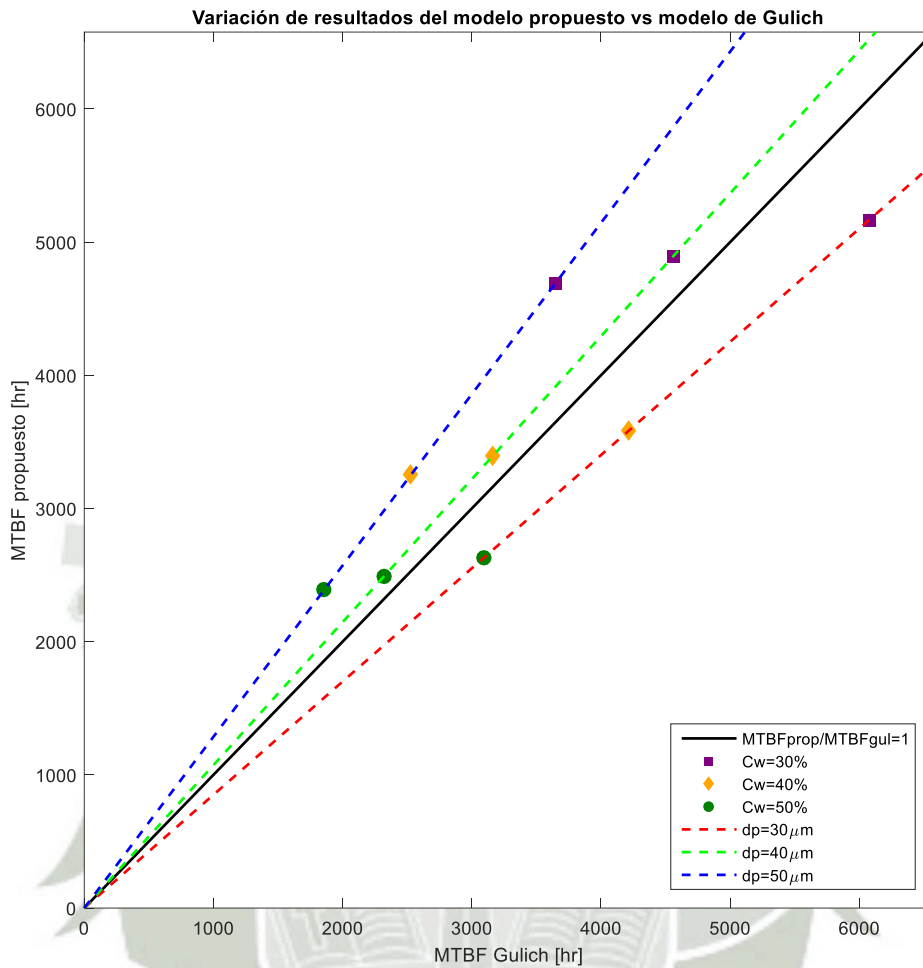
Tabla 12: Variación de porcentual de resultados para el modelo del impulsor

FUENTE: Elaboración propia.

En la Tabla 12 podemos observar que, para un diámetro de partículas dado, la variación de la cantidad de MTBF para el modelo propuesto y el modelo de Gulich es el mismo, esto muestra la dependencia lineal de la tasa de remoción de espesor con la concentración en peso para los 2 modelos. Además, se observa que existe buena correlación de datos para todas las concentraciones en peso en dp=30,40 y 50 micras, Con 14.97 en exceso 7.34 y 28.6% y defecto de variación respecto al modelo de Gulich que se está tomando como referencia.

Una explicación para esta variación de resultados para dp=40 micras y dp=50 micras es que en la ecuación del modelo de Gulich el diámetro de partícula esta elevado a la potencia 1, mientras que en la ecuación del modelo de Oka, este está elevado a una potencia k3, cuyo valor es 0.19 y es constante.

La variación entre resultados se puede apreciar en la Gráfica 42:



Gráfica 42: Variación de resultados del modelo propuesto vs modelo de Gulich.

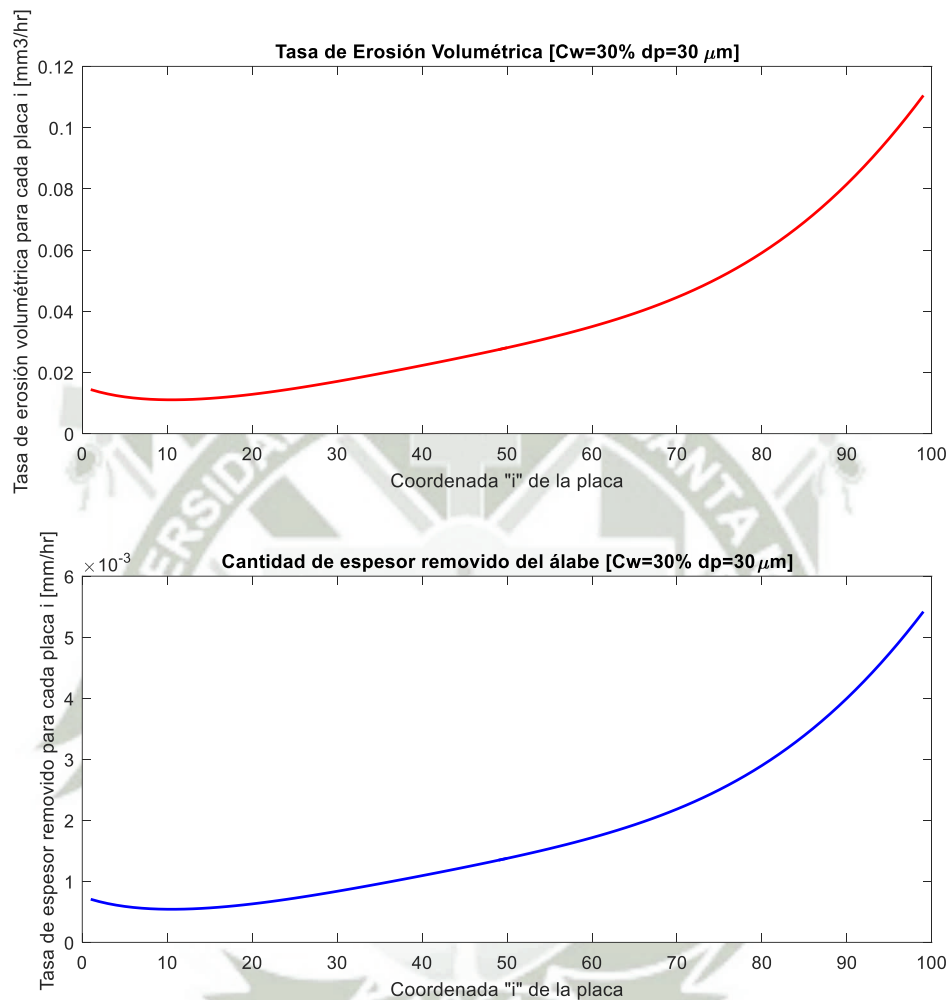
FUENTE: Elaboración propia.

La línea central es recta donde existe completa validación de resultados según la siguiente ecuación:

$$\frac{MTBF_{propuesto}}{MTBF_{Gulich}} = 1 \quad \text{Eq. (6.1)}$$

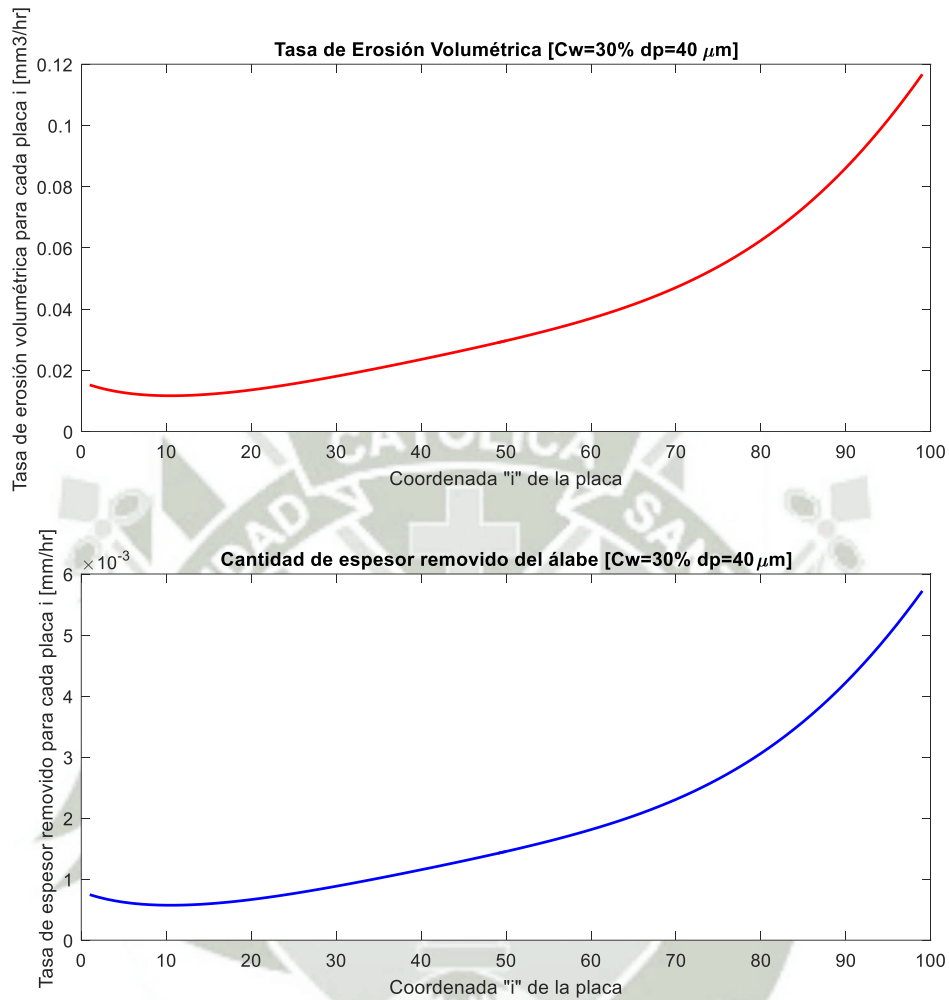
Esta línea tiene pendiente de 45 grados y en cuanto los resultados este más próximos a esta línea, mayor será su confiabilidad

6.3.2 Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido en cada *i*-ésima placa



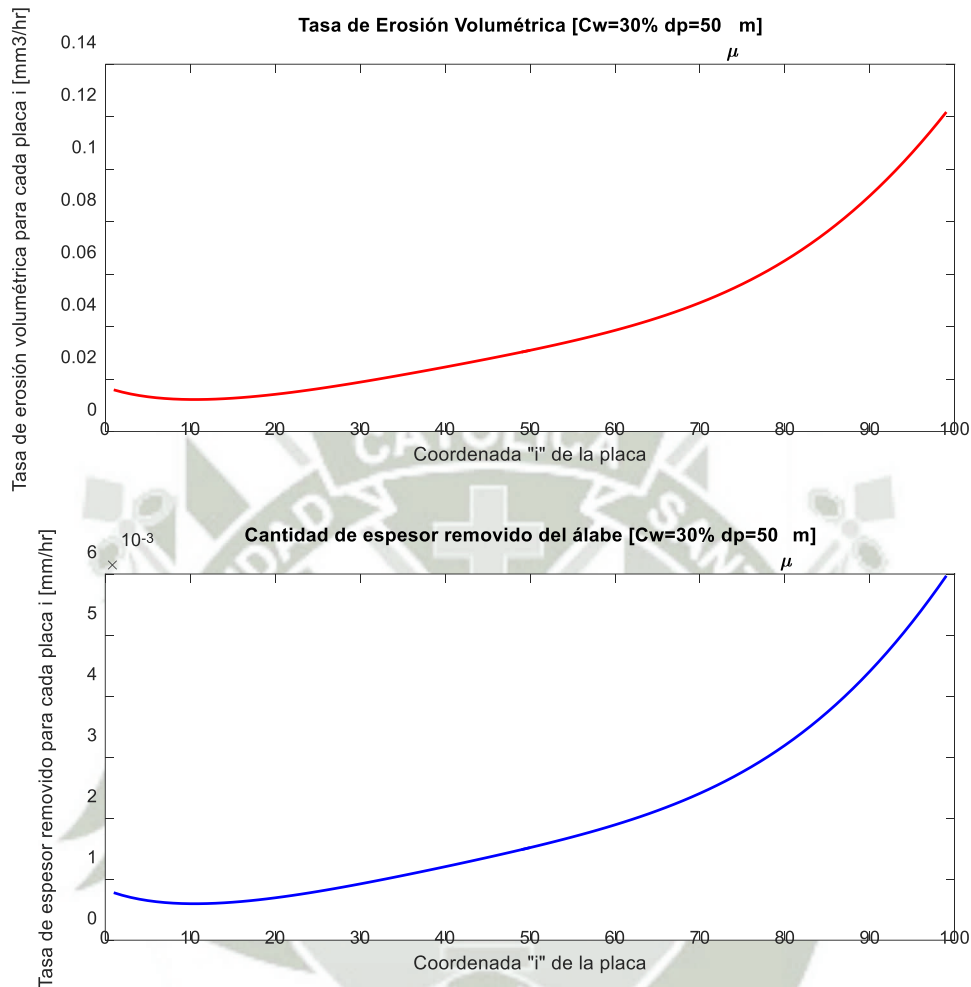
Gráfica 43: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada *i*-ésima placa Cw=30% y dp=30 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



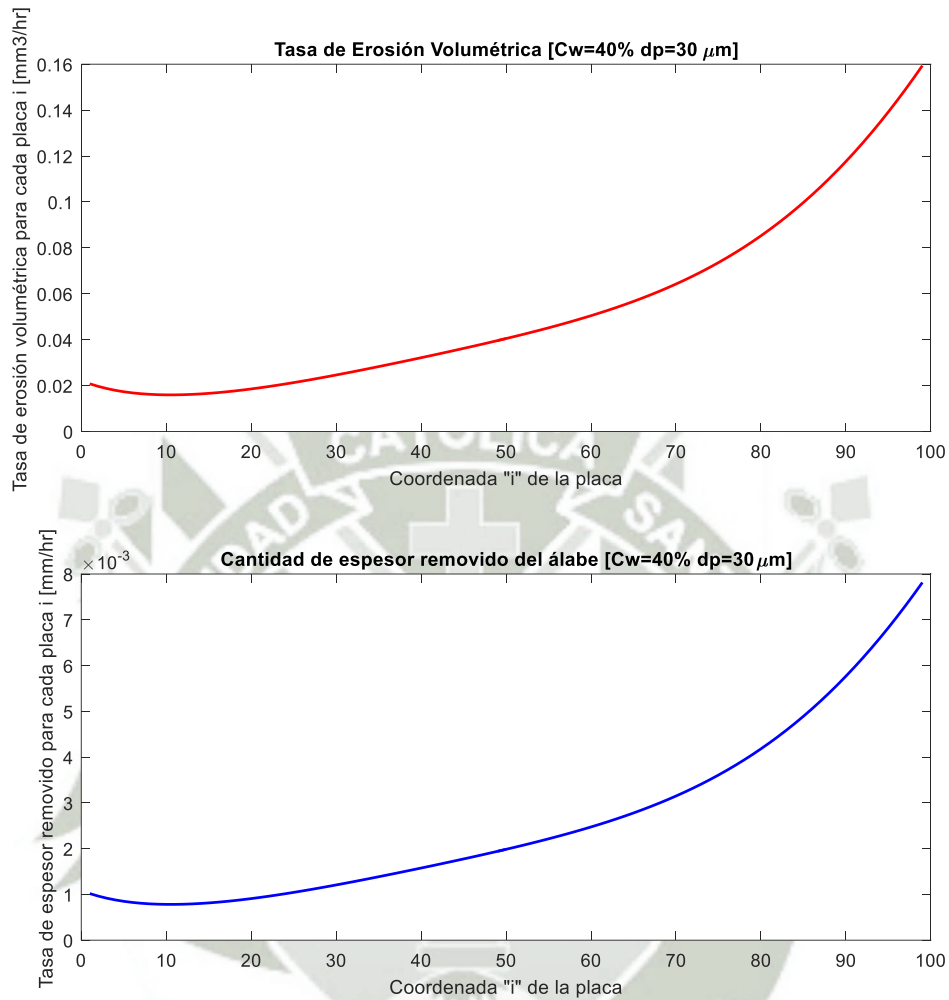
Gráfica 44: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa Cw=30% y dp=40 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



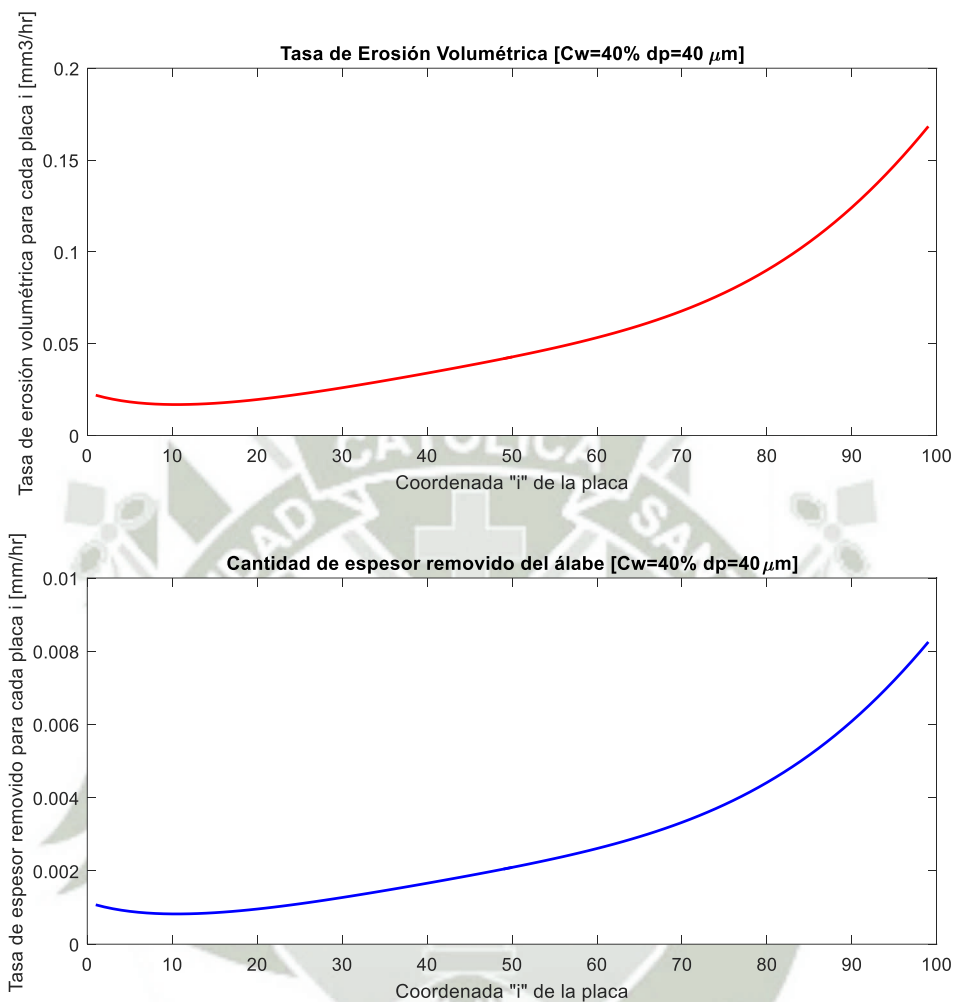
Gráfica 45: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i -esima placa $C_w=30\%$ y $d_p=50$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



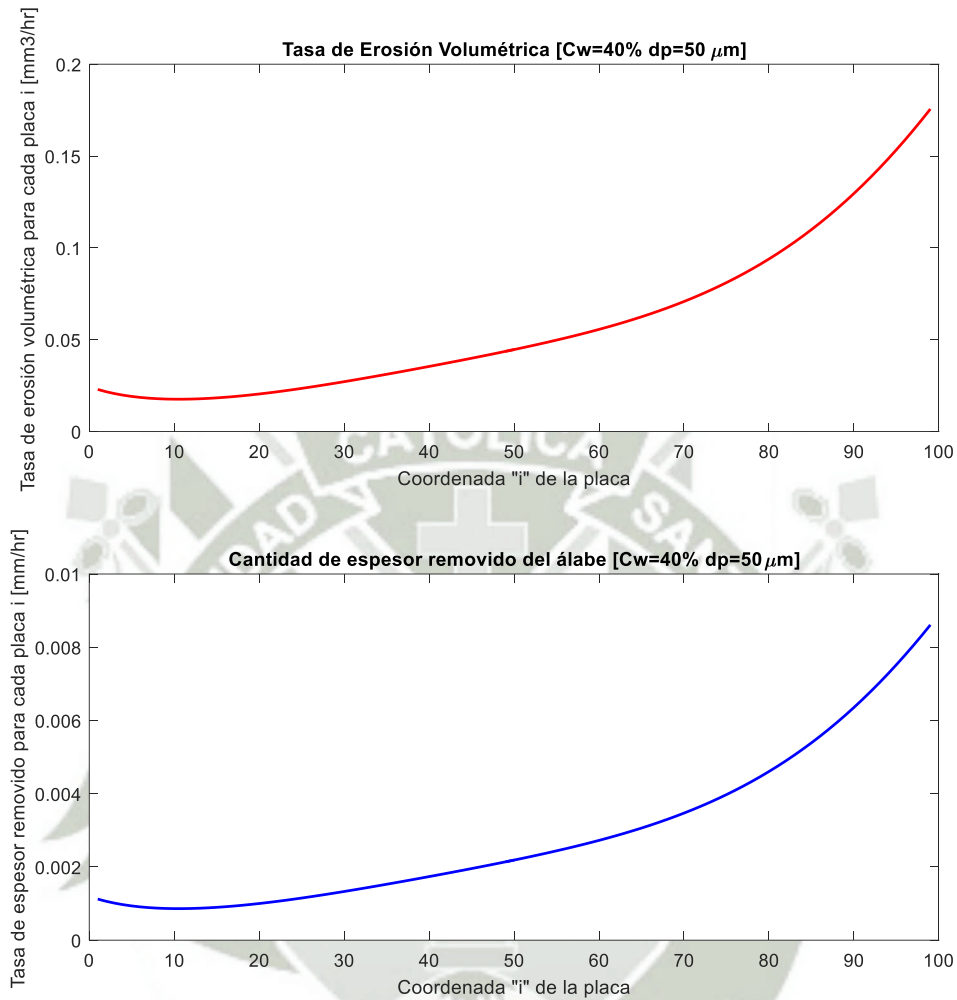
Gráfica 46: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada *i*-esima placa $C_w=40\%$ y $d_p=30$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



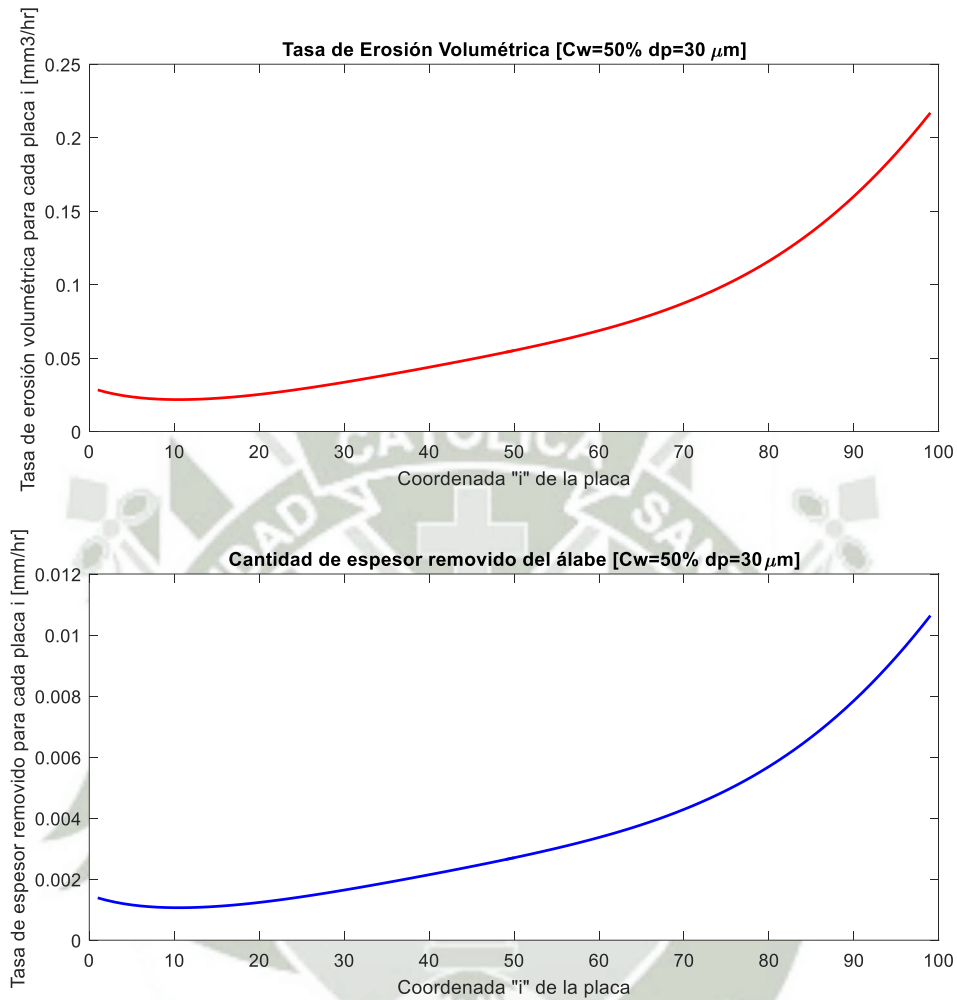
Gráfica 47: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa Cw=40% y dp=40 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



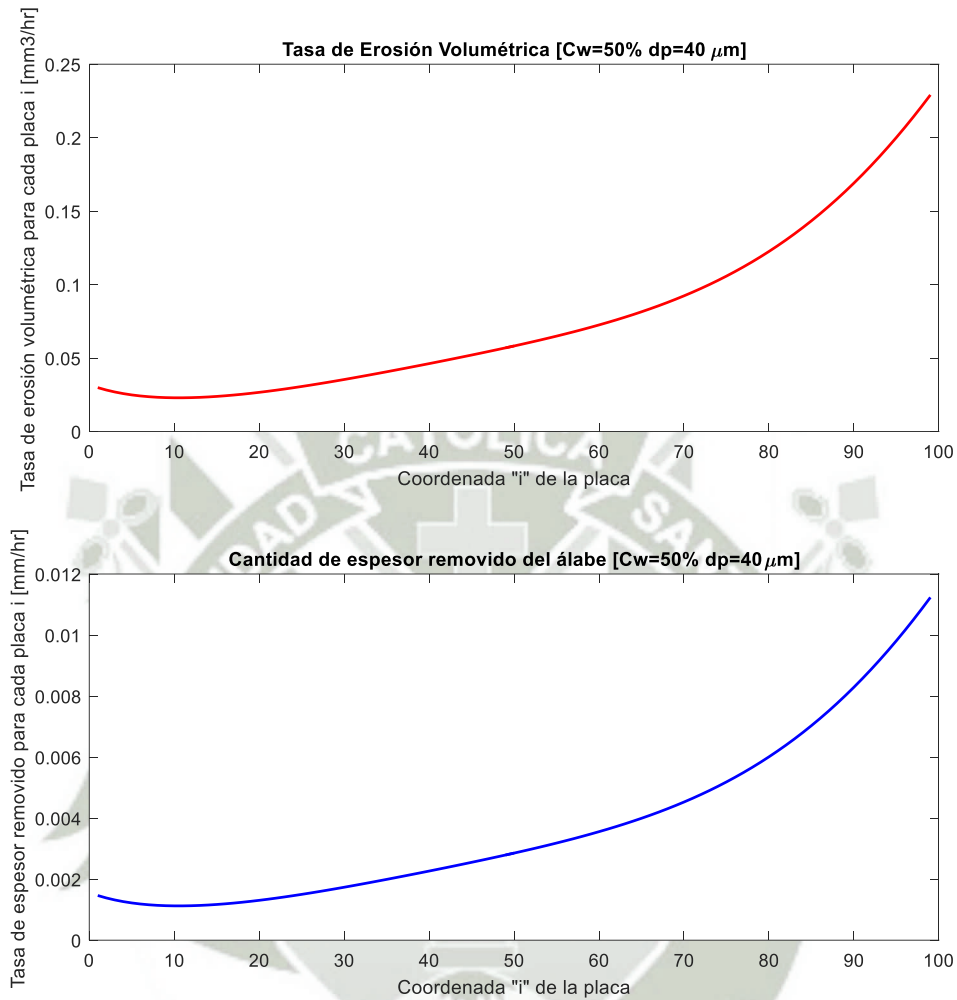
Gráfica 48: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i -esima placa $C_w=40\%$ y $d_p=50$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



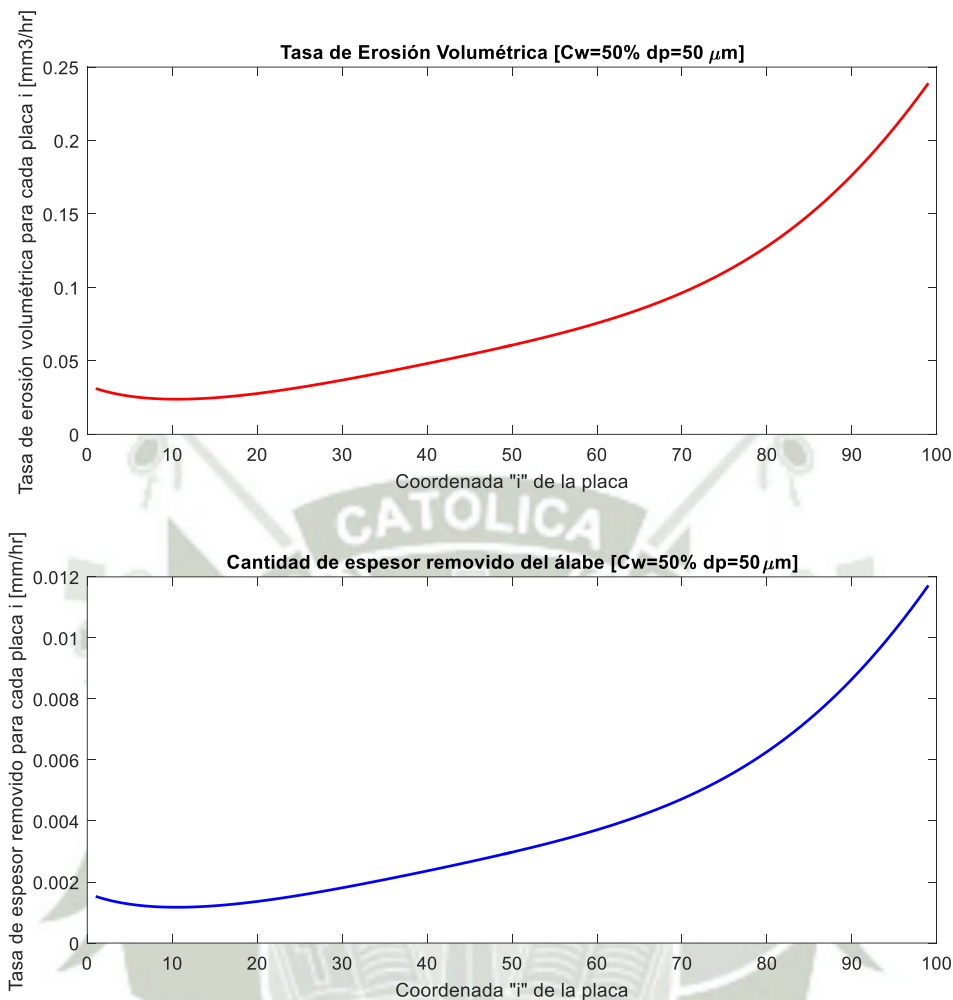
Gráfica 49: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa Cw=50% y dp=30 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 50: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i-esima placa $C_w=50\%$ y $d_p=40$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.

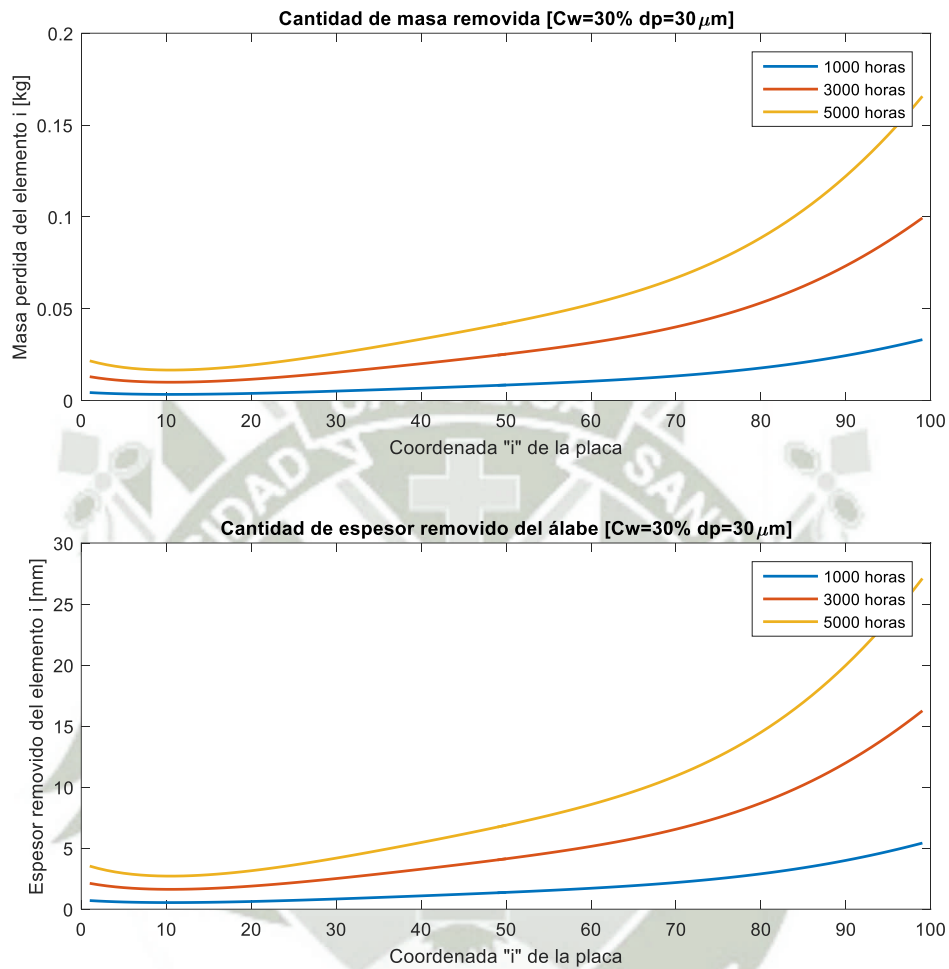


Gráfica 51: Tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor removido para cada i -esima placa $C_w=50\%$ y $d_p=50$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.

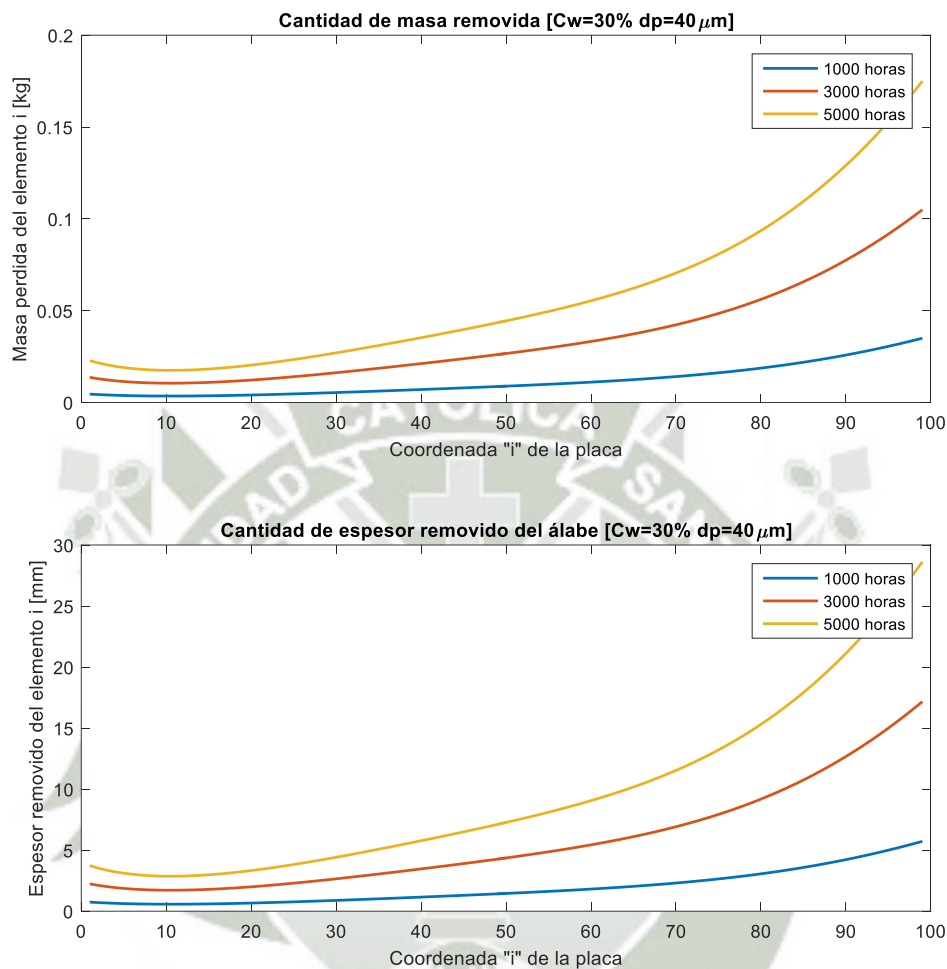
Se puede observar que la mayor cantidad de tasa de erosión y tasa de remoción de espesor se ubica al principio y final del álabe con mayor predominancia en el final, esto concuerda con la bibliografía de **SLURRY SYSTEMS HANDBOOK** (Abulnaga, 2002) y **CENTRIFUGAL PUMPS** (Gulich, 2008).

6.3.3 Masa y espesor removido por álabe



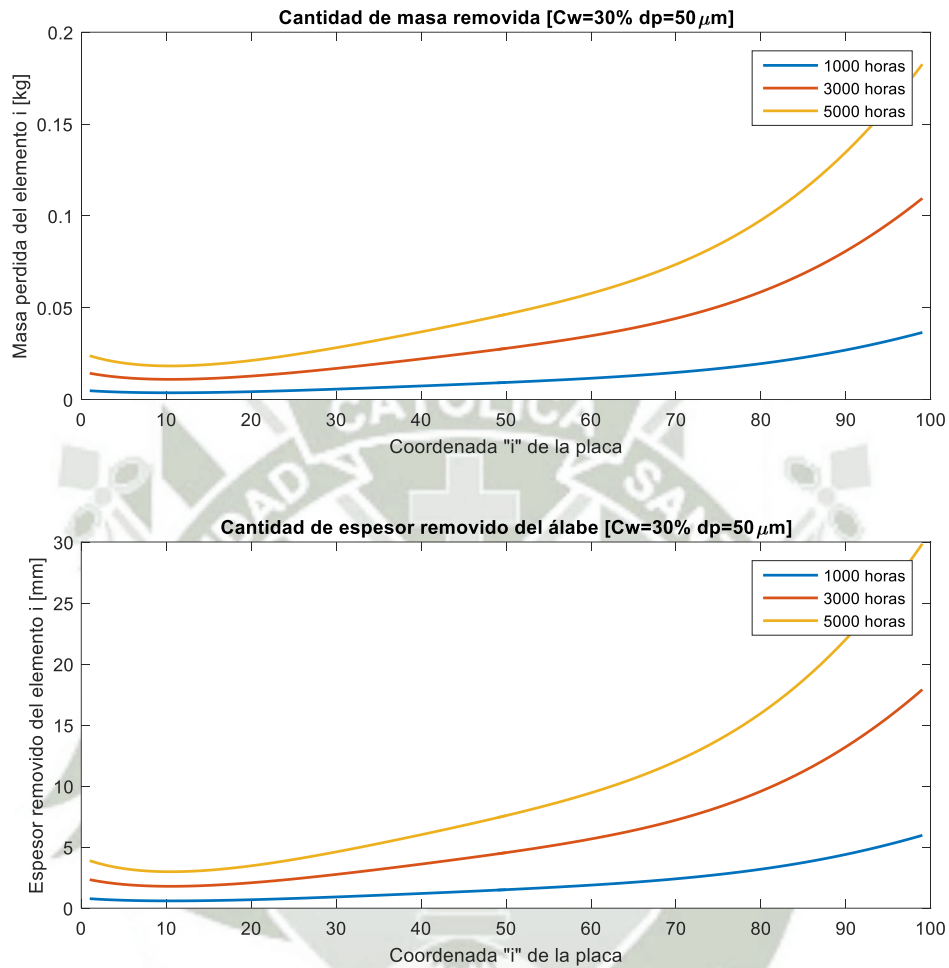
Gráfica 52: Masa y espesor removido por álabe Cw=30% dp=30 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



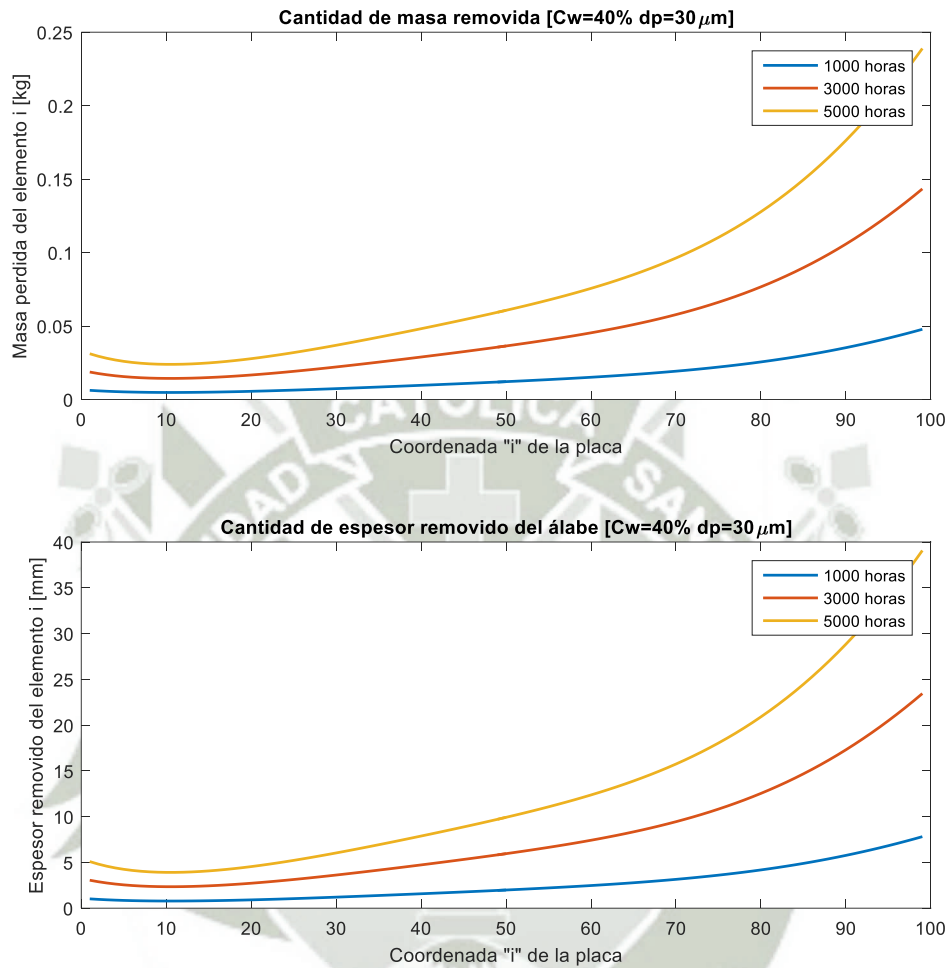
Gráfica 53: Masa y espesor removido por álabe Cw=30% dp=40 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



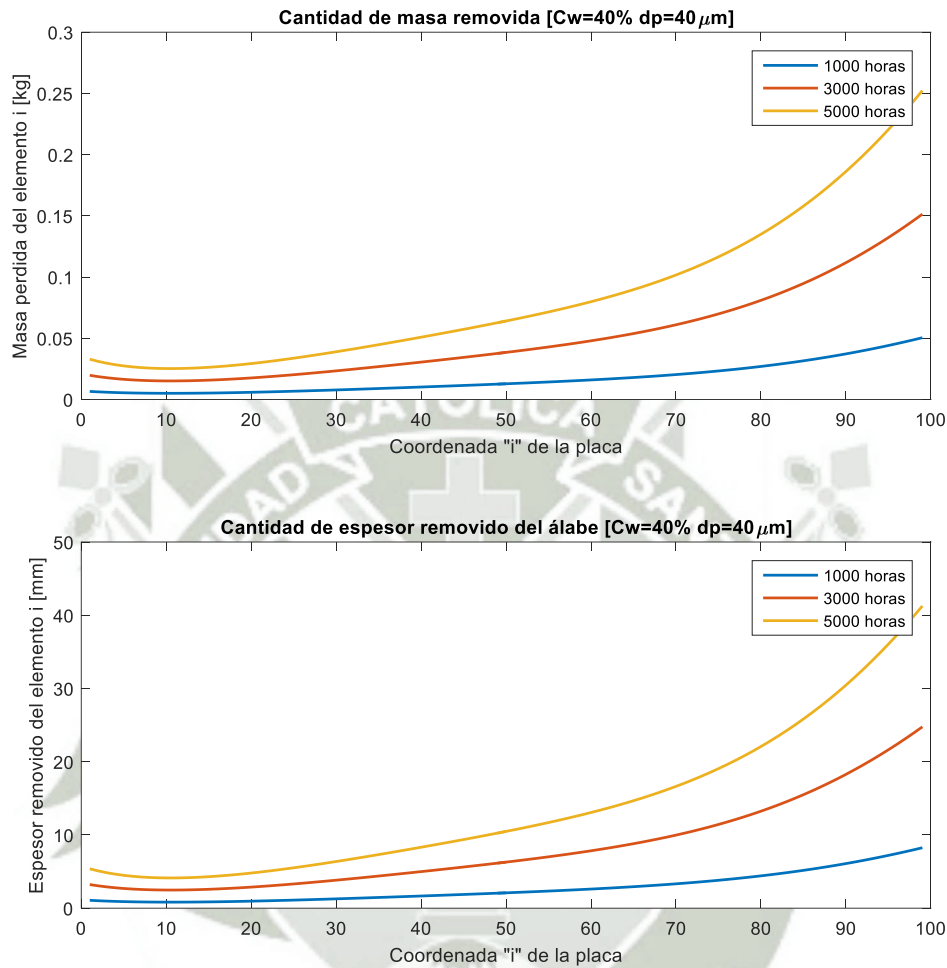
Gráfica 54: Masa y espesor removido por álabe Cw=30% dp=50 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



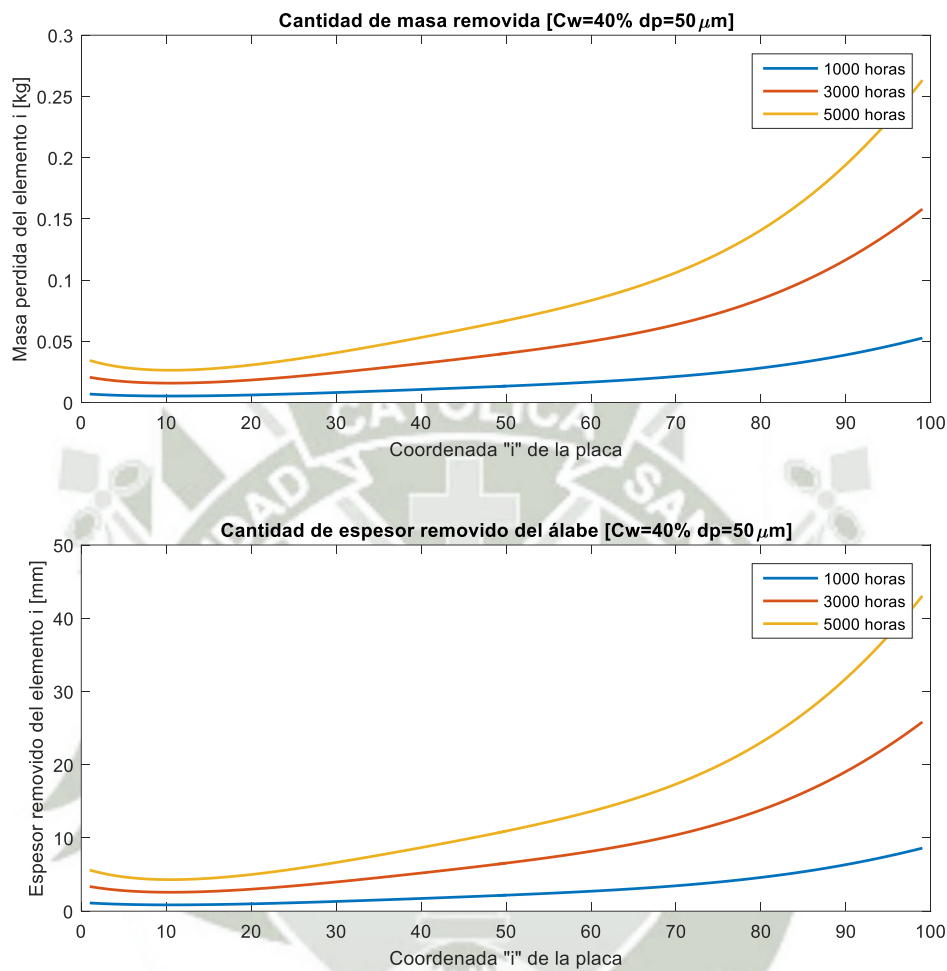
Gráfica 55: Masa y espesor removido por álabe Cw=40% dp=30 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



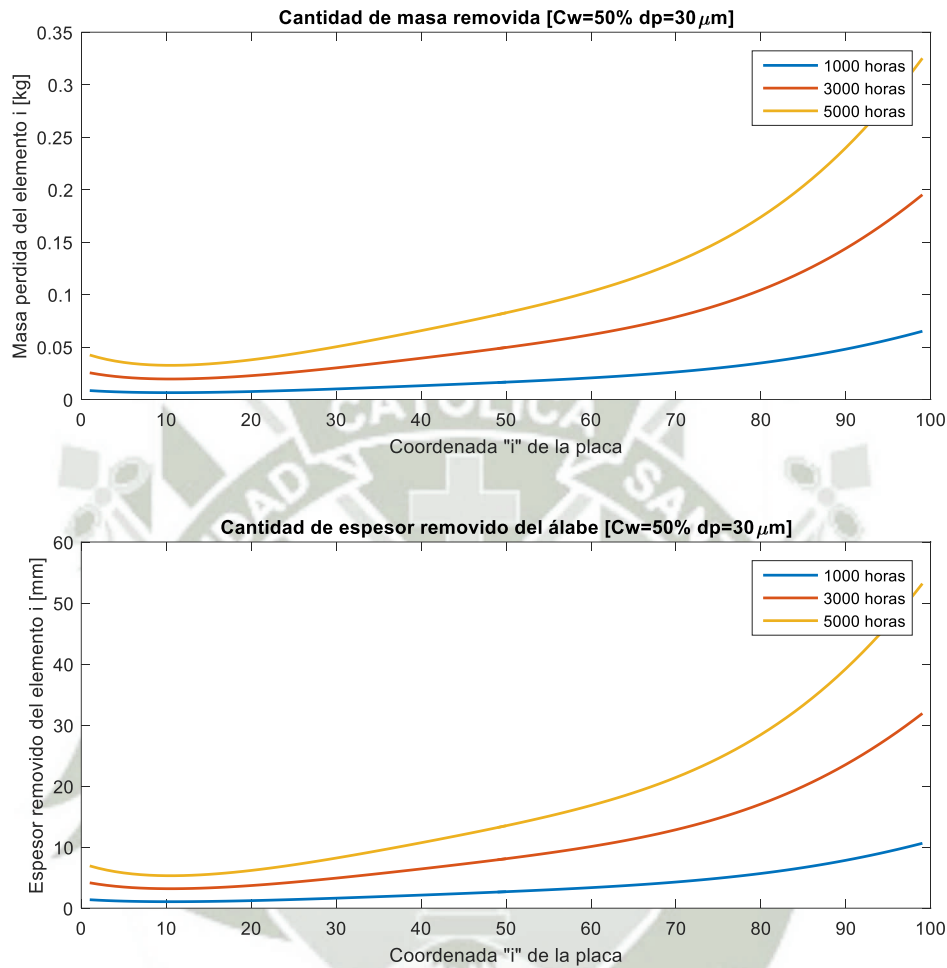
Gráfica 56: Masa y espesor removido por álabe Cw=40% dp=40 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



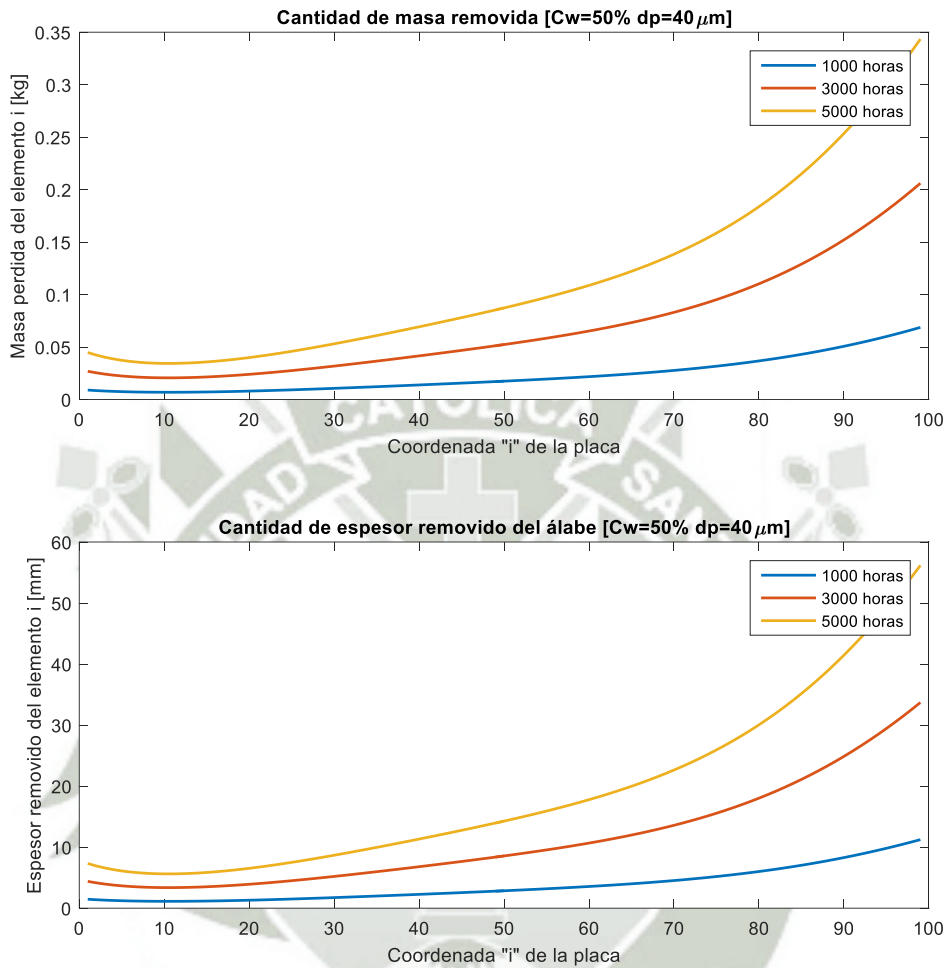
Gráfica 57: Masa y espesor removido por álabe Cw=40% dp=50 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



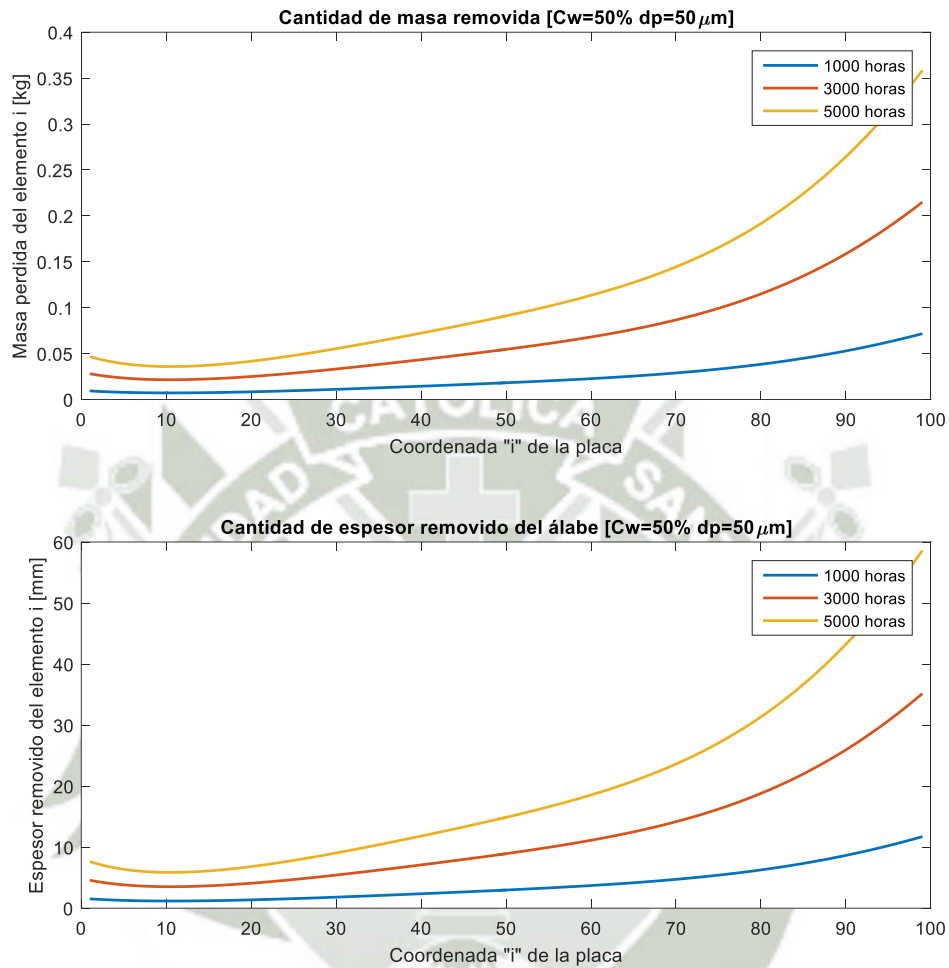
Gráfica 58: Masa y espesor removido por álabe Cw=50% dp=30 micras.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 59: Masa y espesor removido por álabe Cw=50% dp=40 micras.

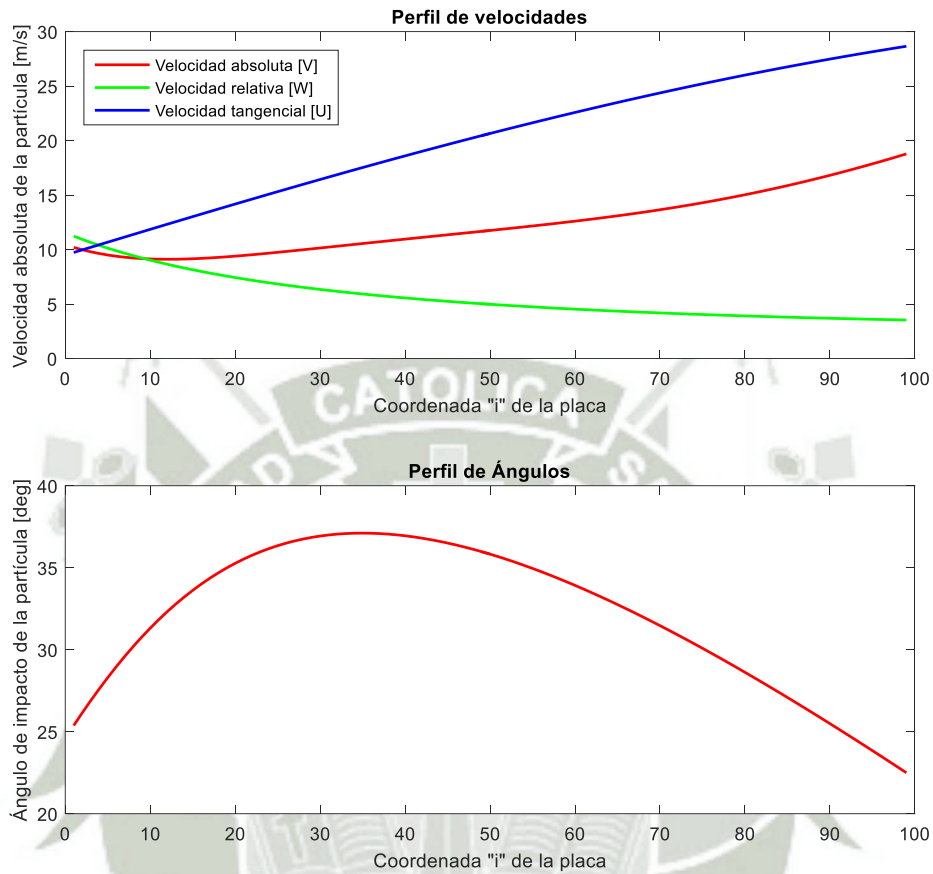
FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 60: Masa y espesor removido por álabe Cw=50% dp=50 micras.

FUENTE: Elaboración propia.

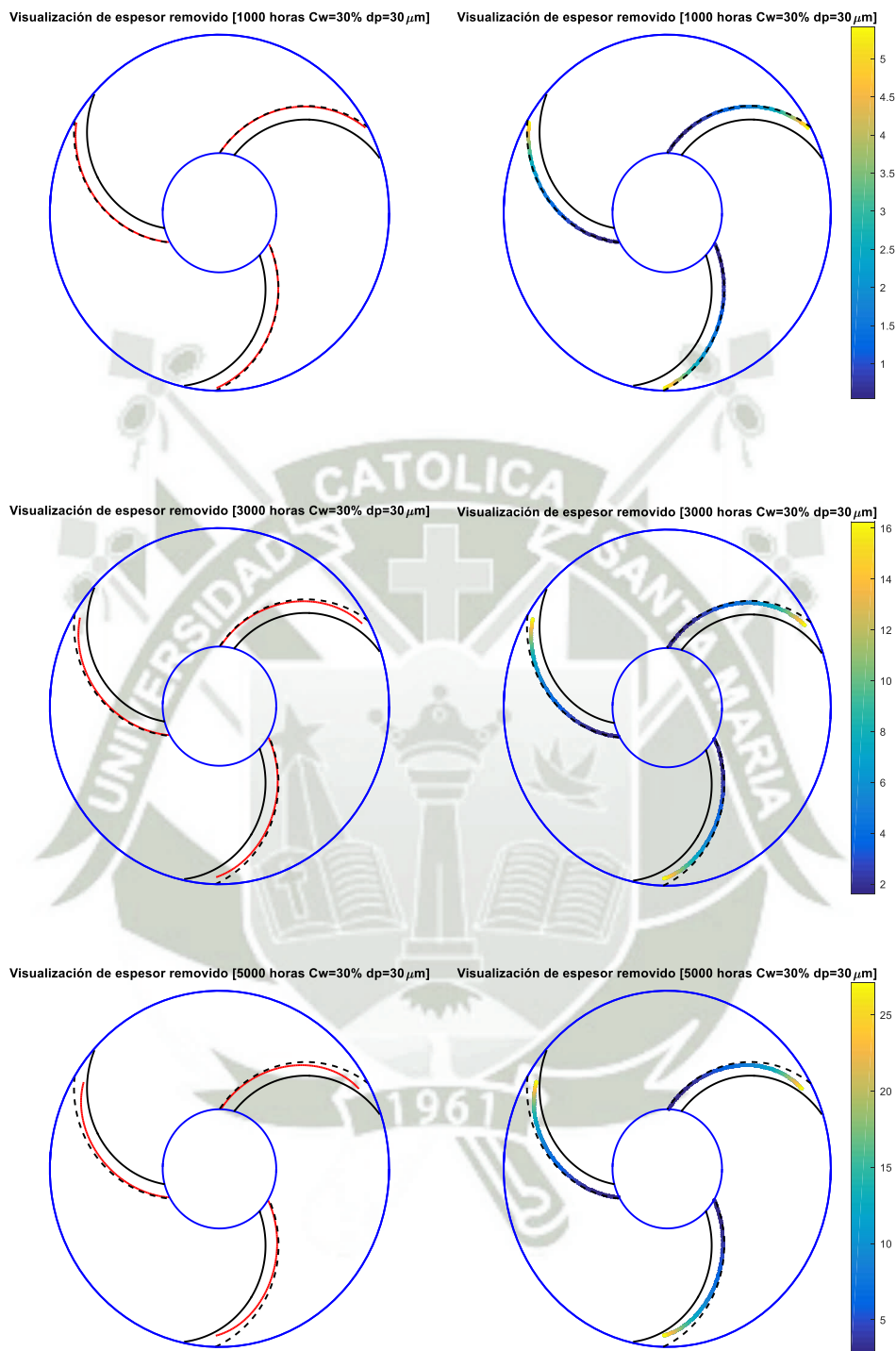
6.3.4 Perfil de velocidades y ángulos a lo largo del álabe



Gráfica 61: Perfil de velocidades y ángulos a lo largo del álabe.

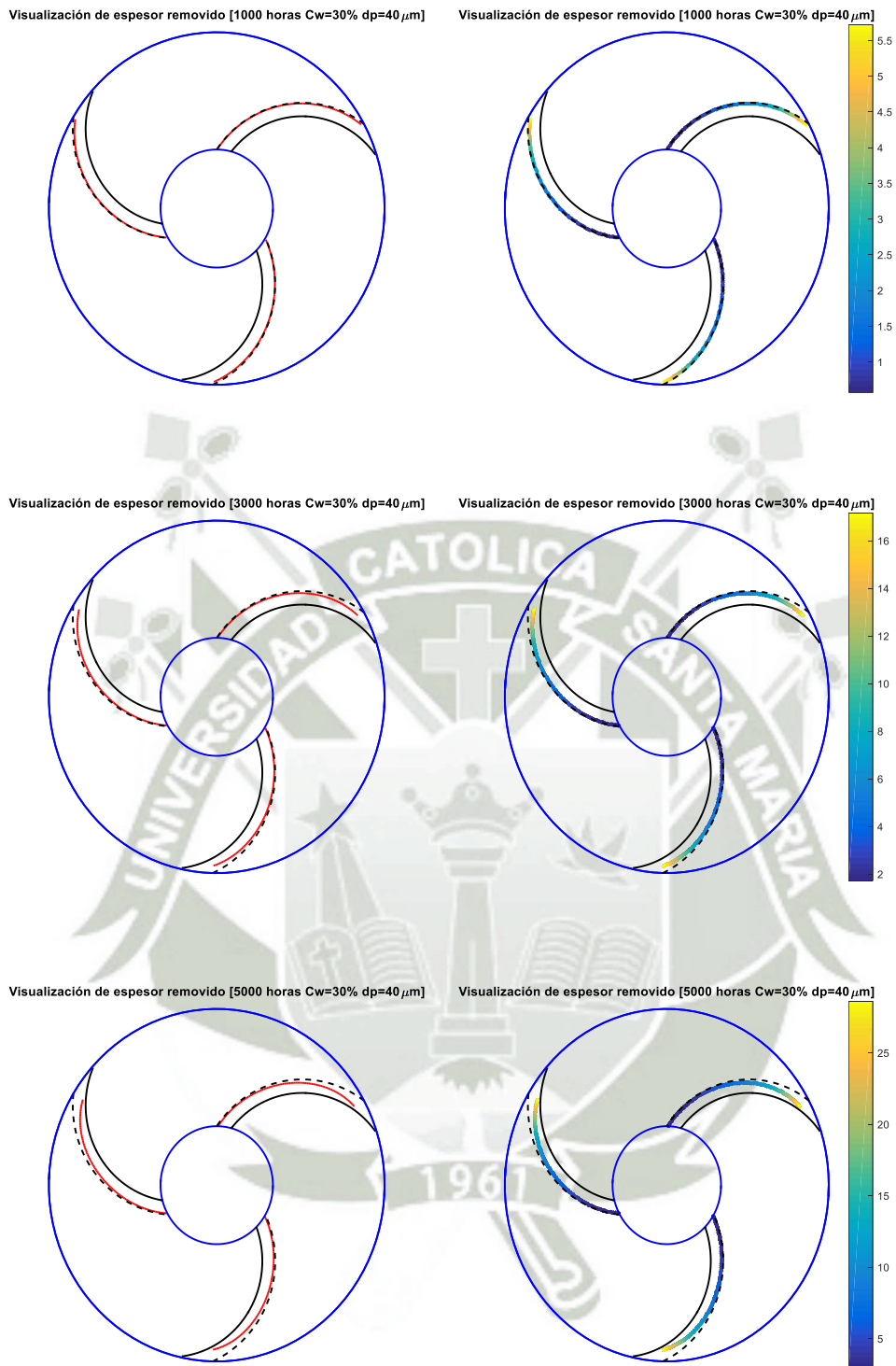
FUENTE: Elaboración propia.

6.3.5 Evolución del espesor removido en la cara del álabe



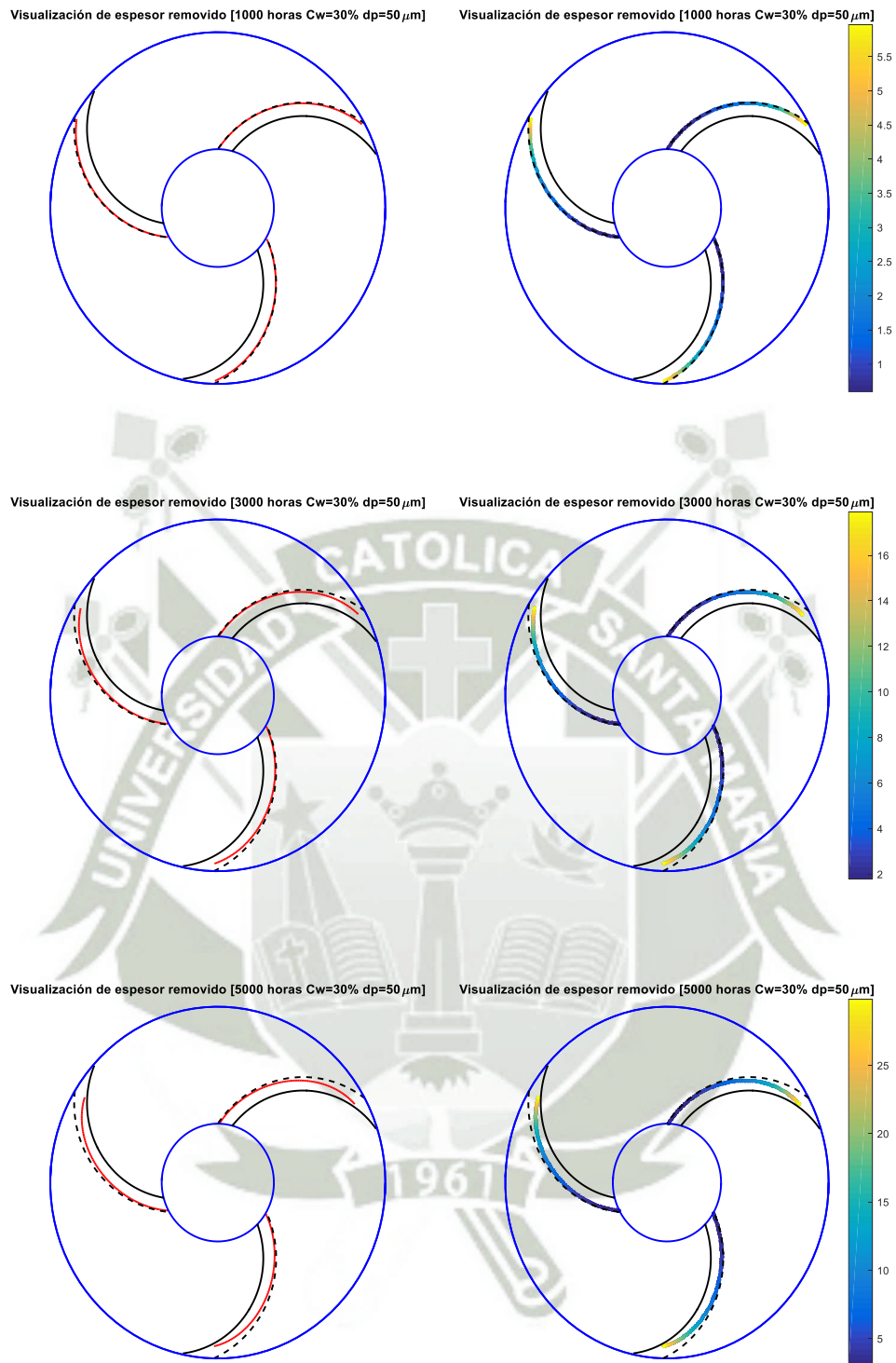
Gráfica 62: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $d_p=30$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



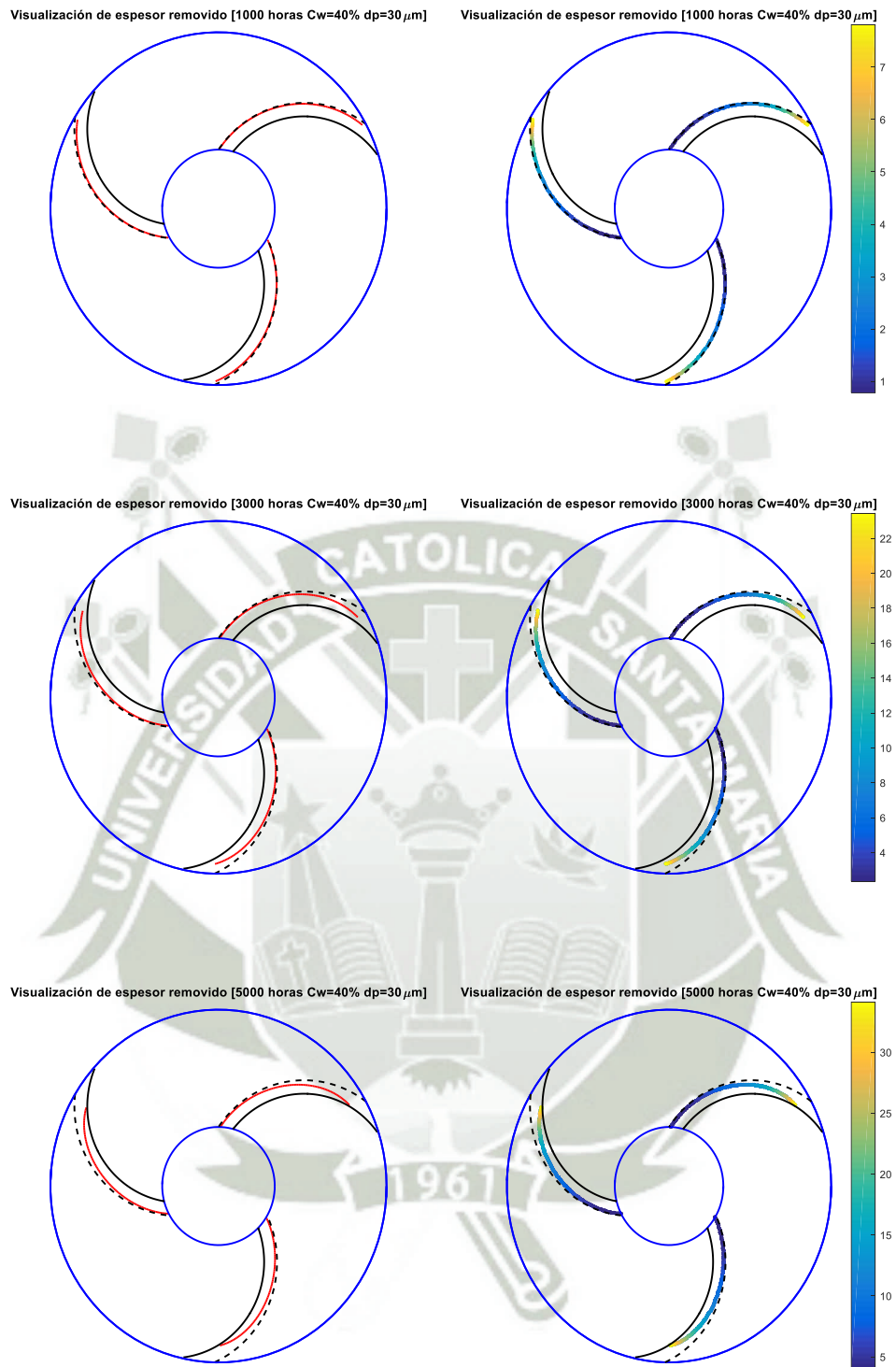
Gráfica 63: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $d_p=40$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 64: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=30\%$ $dp=50$ micras.

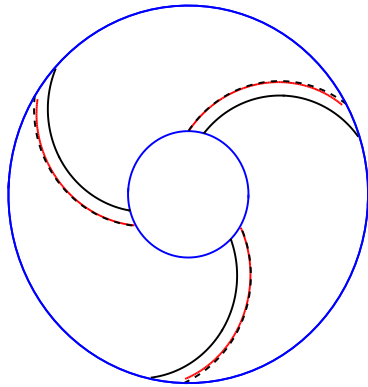
FUENTE: Elaboración propia.



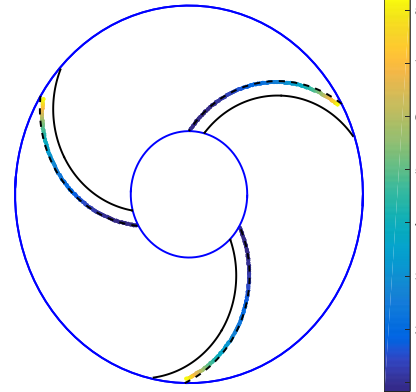
Gráfica 65: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=30$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.

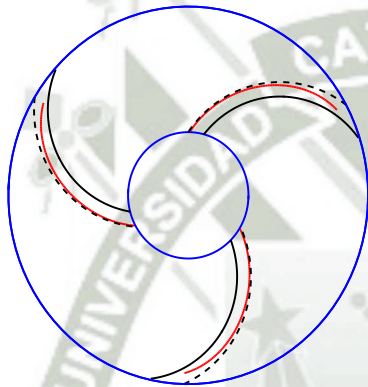
Visualización de espesor removido [1000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]



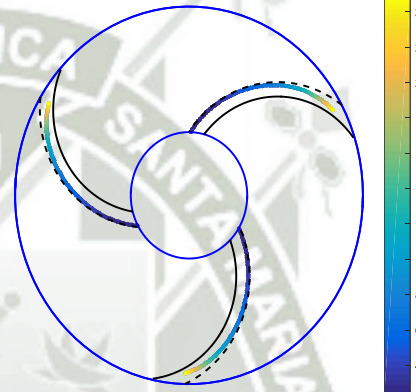
Visualización de espesor removido [1000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]



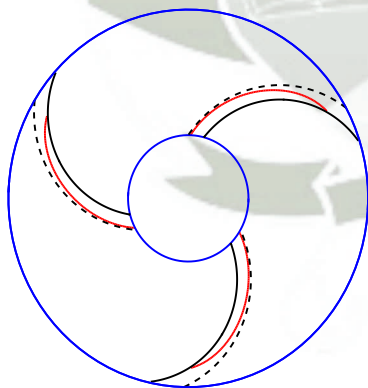
Visualización de espesor removido [3000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]



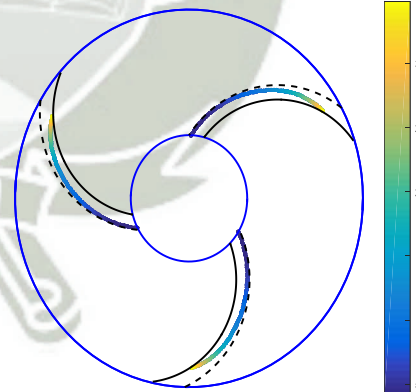
Visualización de espesor removido [3000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]



Visualización de espesor removido [5000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]

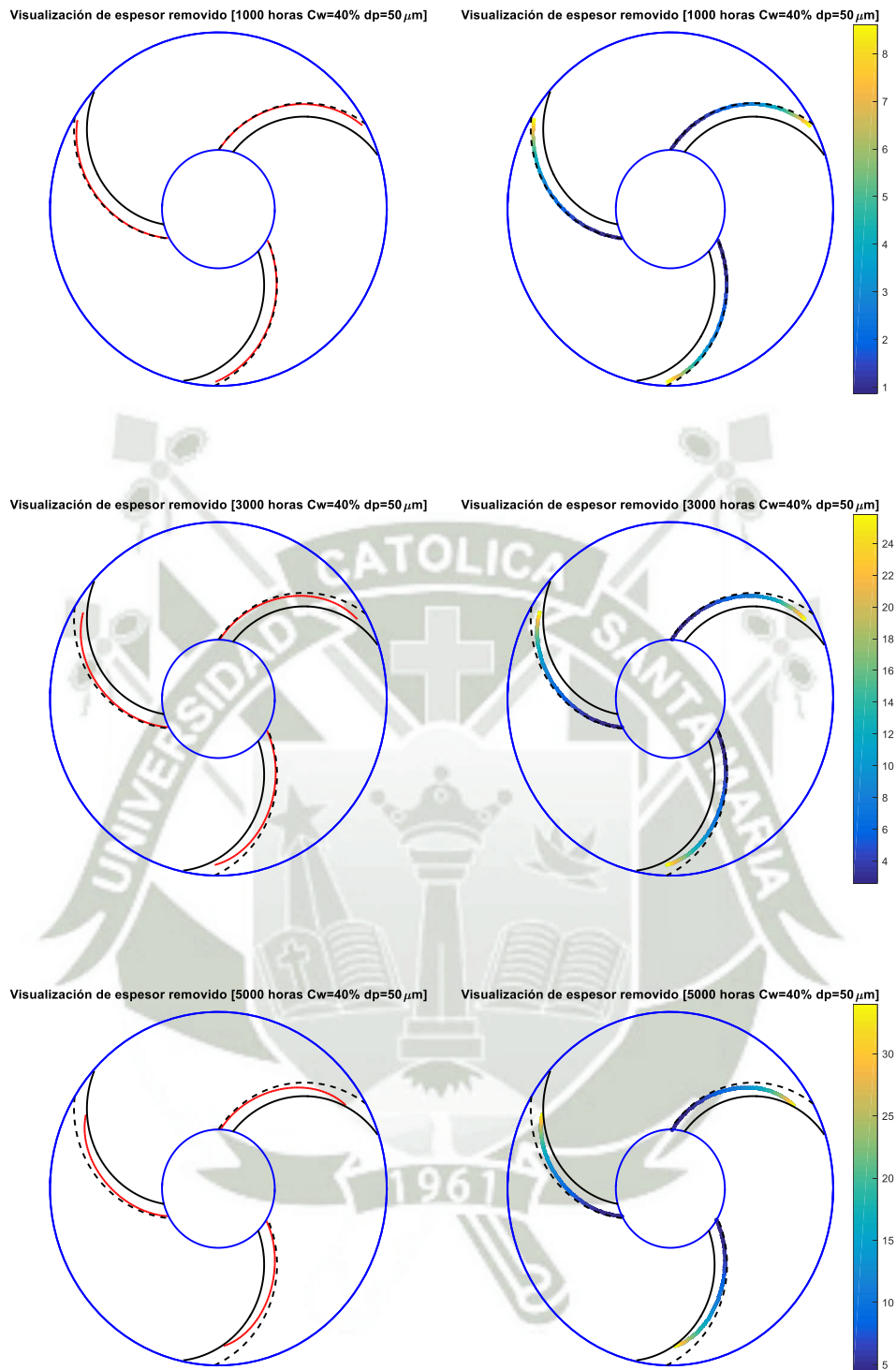


Visualización de espesor removido [5000 horas $C_w=40\%$ $d_p=40\ \mu\text{m}$]



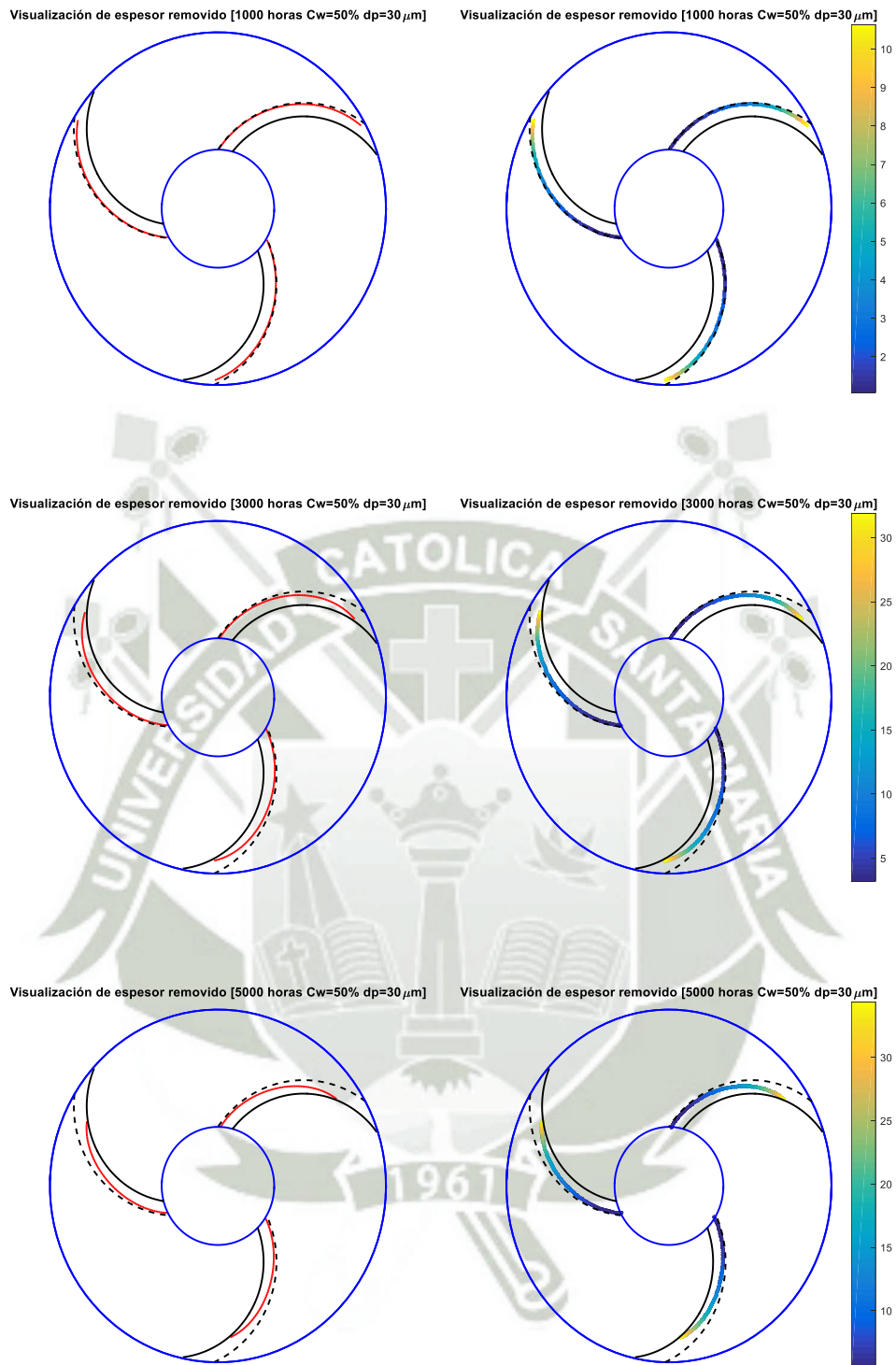
Gráfica 66: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=40$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



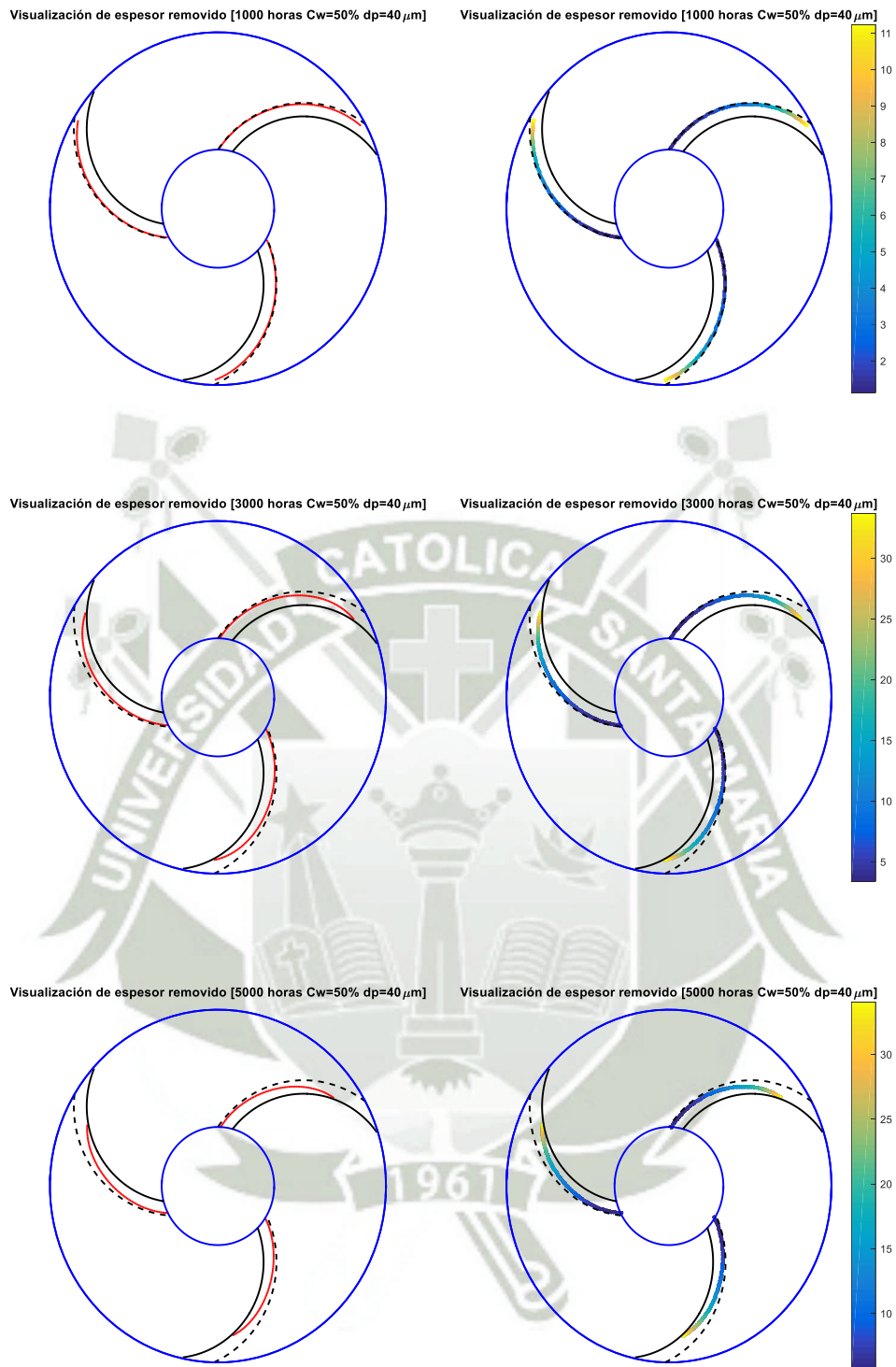
Gráfica 67: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=40\%$ $d_p=50$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



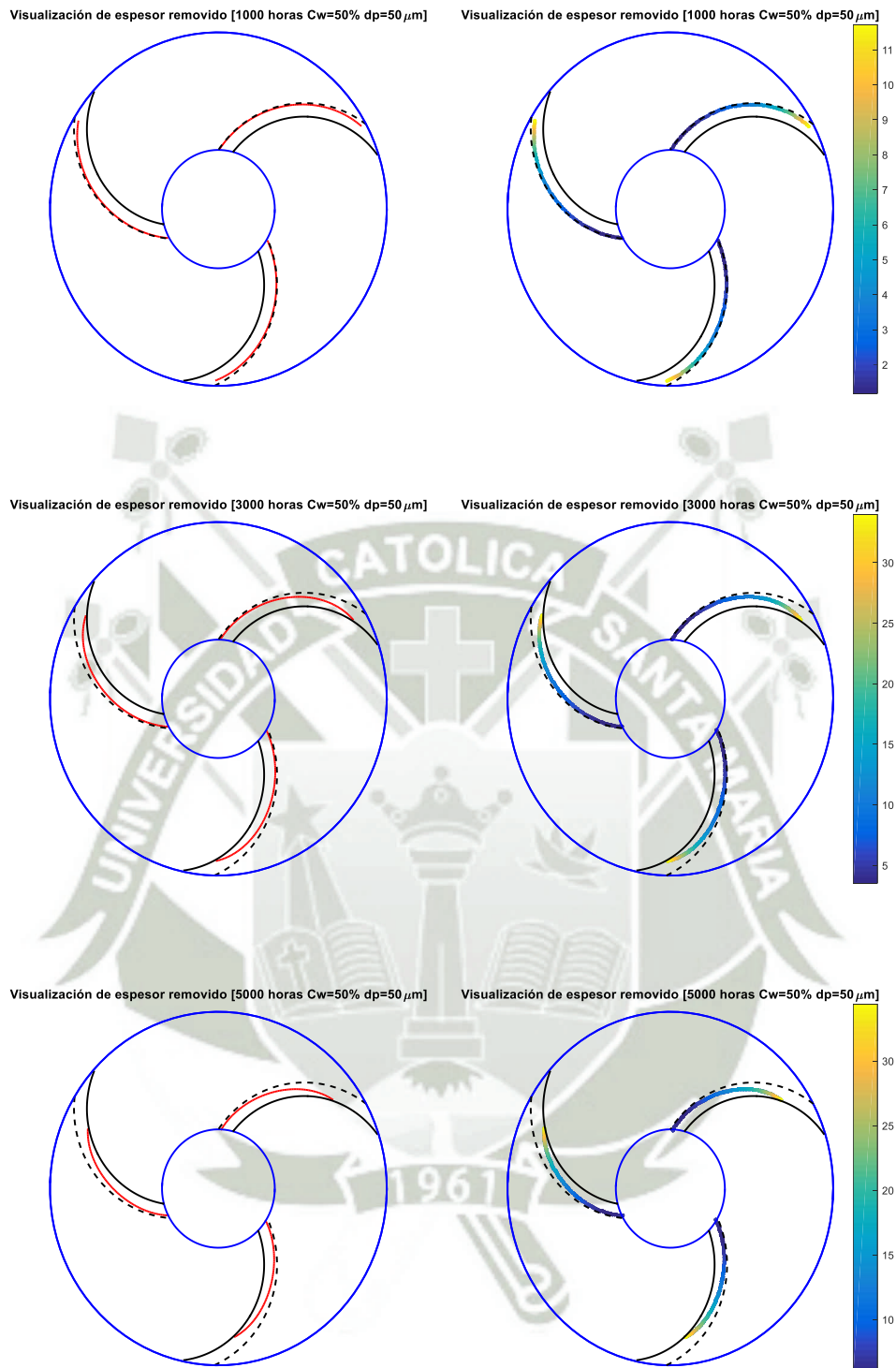
Gráfica 68: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=30$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 69: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=40$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.



Gráfica 70: Evolución del espesor removido en la cara del álabe $C_w=50\%$ $d_p=50$ micras.

FUENTE: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

- Los tiempos medios entre fallas (MTBF) que se han encontrado con el modelo propuesto son: para concentración de sólidos en peso de 30% los valores son de 5168, 4893 y 4690 horas para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente; para concentración de sólidos en peso de 40% los valores son de 3583, 3393 y 3252 horas para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente y para concentración de sólidos en peso de 50% los valores son de 2633, 2493 y 2390 horas para diámetro de partículas de 30, 40 y 50 micras respectivamente. Los valores obtenidos se ajustan con bastante validez a los valores obtenidos con el modelo de referencia Gulich para diámetros de partículas de 40 micras, solo variando para todas sus concentraciones en peso un 7.34% en exceso, para diámetros de 40 y 50 micras los valores varían en 14.97 y 28.60% en defecto y exceso respectivamente
- Se encontró que el extremo final del álabe es el punto donde existe mayor tasa de erosión como se puede apreciar en las Gráficas 43 a 60 debido a la mayor cantidad de componente de velocidad tangencial en la velocidad absoluta de impacto de partículas y la mayor cantidad de ángulo de ataque (visto en la Gráfica 61).
- El modelo propuesto es flexible, ya que los datos de entrada aceptan el ingreso de diferentes tamaños de impulsor, número de álabes, material del impulsor, caudal, velocidad angular, diámetro de partículas, etc. La única consideración que se tiene que tener es que se deben usar los materiales

presentados en el modelo de Oka (sílice, carburo de silicio y pellets de vidrio) y que se debe usar software Matlab versión 2015 o más actual.

RECOMENDACIONES

- Es necesario verificar los resultados a través de estadística de equipos de bombeo que trabajen en campo o a través de pruebas en laboratorio mediante un módulo de bombeo de slurry.
- Se pueden hacer múltiples análisis a partir de la programación en Matlab como por ejemplo diferentes aceros para el material del impulsor, dimensiones del impulsor y caudales.
- A partir del análisis de las Gráficas 62 a 70, para futuros trabajos es posible conocer la influencia del desgaste de los álabes e impulsor en variaciones de caudal y altura de la bomba, ya que se observa una disminución importante del radio externo del álabe.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artículos científicos

1. *A STUDY OF EROSION PHENOMENA*. **Bitter, J.G.A. 1962**. 169-190, s.l. : WEAR, 1962.
2. *A UNIVERSAL WEAR LAW FOR ABRASION*. **Matthew T. Siniawski, Stephen J. Harris, Qian Wang. 2006**. s.l. : Wear, 2006.
3. *EROSION OF SURFACES BY SOLID PARTICLES*. **Finnie, Iain. 1960**. 87-103, s.l. : WEAR, 1960.
4. *MODIFIED MODEL FOR EROSION, SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EROSION BY LIQUID AND SOLID IMPACT*. **Hashish, M. 1988**. 461-480, s.l. : Cambridge, 1988.
5. *PRACTICAL ESTIMATION OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT PART 1: EFFECTS OF IMPACT PARAMETERS ON A PREDICTIVE EQUATION*. **Y.I. Oka, K. Okamura, T. Yoshida. 2005**. 95-101, s.l. : WEAR, 2005.
6. *PRACTICAL ESTIMATION OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT PART 2: MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS DIRECTLY ASSOCIATED WITH EROSION DAMAGE*. **Y.I. Oka, T. Yoshida. 2005**. 102-109, s.l. : WEAR, 2005.
7. *PREDICTION OF SLURRY PUMP COMPONENT WEAR AND COST*. **A. Sellgren, G. Addie, R. Visintainer y K. Pagalthivarthi. 2005**. s.l. : Annual Dredging Seminar,, 2005.

8. *PREDICTION OF UNEVEN WEAR IN A SLURRY PIPELINE ON THE BASIS OF MEASUREMENTS IN A POT TESTER.* **R. Gupta, S.N. Singh, V. Seshadri. 1995.**
169-178, s.l. : Wear 184, 1995.
9. PUMP FUNDAMENTALS.
<http://www.pumpsandsystems.com/topics/pumps/centrifugal-pumps/centrifugal-pump-efficiency-specific-speed>. [Online] [Cited:]
10. *STUDY OF THE PARAMETRIC DEPENDENCE OF EROSION WEAR FOR THE PARALLEL FLOW OF SOLID-LIQUID MIXTURES.* **B.K. Gandhi, S.N. Singh, V. Seshadri. 1999.**
275-282, s.l. : Tribol, 1999.
11. *THE IMPACT ANGLE DEPENDANCE OF EROSION DAMAGE CAUSED BY SOLID PARTICLE IMPACT.* **Y.I. Oka, H. Olmogi, T. Hosokawa, M. Matsumura. 2005.**
573-579, s.l. : WEAR, 2005.
12. *Towards a unified classification of wear.* **Varanberg, M. 2013.** s.l. : Technion, 2013.

Libros

1. **Abulnaga, Baha. 2002.** *SLURRY SYSTEMS HANDBOOK.* s.l. : Mc Graw Hill, 2002.
2. **Gulich, Friederich. 2008.** *CENTRIFUGAL PUMPS.* New York : Springer, 2008.
3. **White, Frank. 2008.** *MECÁNICA DE FLUIDOS.* s.l. : Mc Graw Hill, 2008.
4. **Wildredo, Jara. 1998.** *MÁQUINAS HIDRAULICAS.* s.l. : INIFIM, 1998.

ANEXOS

Código de placa.m

```
% Entrada: densidad agua [kg/m3]
rhoa=1000;
% Entrada: densidad arena [kg/m3]
rhog=2600;
% Entrada: Concentración en peso
Cw=0.5;
% Entrada: caudal [m3/hr]
Qm=600;
% Cálculo del peso específico solido
Sg=rhog/rhoa;
% Cálculo del peso específico mezcla
Sm=Sg/((Sg-Cw*(Sg-1)));
% Entrada: diámetro de partícula
dp=30;
% Cálculo de concentración en volumen
Cv=(Cw*Sm)/Sg;
% Cálculo de flujo másico de solidos
fmg=Cv*rhog*Qm;
% Entrada: área [mm2]
A=100*200;
% Cálculo de velocidad [m/s]
V=(Qm/A)*(1e6/3600);
% Entrada: densidad [kg/m3]
rhom=7890;
% Entrada: dureza Vickers (Gpa)
Hv=6.835;
% Entrada: espesor placa [mm]
esp=20;

% datos del erosión
% Constantes del modelo de Oka
% Factor de forma del abrasivo
okaK=65;
% Constantes de penetración
okak1=-0.12;
okak2=2.3*((Hv^(0.038)));
okak3=0.19;
% Velocidad experimental
vin=104;
% Diámetro de la partícula experimental
dpin=326;
% Constantes del abrasivo
okan1=0.71*((Hv^(0.14)));
okan2=2.4*((Hv^(-0.94)));

% plot
% tiempo vs espesor
```

```
ii=100;
a=5;
xe=linspace(0,ii,ii);
% ángulo
ang=linspace(15,55,a)*(pi/180);

% cálculo de factores de Oka
oka90=okaK*(2*(Hv).^okak1)*(V/vin).^okak2)*((dp/dpin).^okak3)
;
okange=zeros(a);
okaERe=zeros(a);
e=zeros(a);

for i=1:a
    okange(i)=((sin(ang(i))).^okan1)*((1+Hv*(1-
sin(ang(i))).^okan2);
    okaERe(i)=okange(i)*oka90*fmg;
    % espesor
    e(i)=(okaERe(i)/A);
end

% plot
% Tasa
alpha=linspace(0,pi/2,ii);

% Cálculo de factores de Oka
okang=((sin(alpha).^okan1)*((1+Hv*(1-sin(alpha))).^okan2);
okaERout=okang*oka90;

figure(1);
plot(alpha*(180/pi),okaERout,'g')
title('Tasa de erosión del modelo de Oka')
xlabel('Ángulo de ataque [deg]')
ylabel('Tasa de Erosión volumétrica por unidad de masa de
erosivo [mm3/kg]')
hold on

% plot
% tiempo vs angulo
angt=linspace(pi/12,pi/2,100);

okanget=((sin(angt).^okan1)*((1+Hv*(1-sin(angt))).^okan2);
okaERet=okanget*oka90*fmg*(1/A);

% Cálculo de espesor degradado
tr=esp./okaERet;
trt=esp./e;

figure(2);
plot(angt*(180/pi),tr,'b')
title('Tiempo de desgaste completo de la placa plana')
xlabel('Ángulo de ataque [deg]')
```

```
ylabel('Tiempo de desgaste [hr]')
hold on

% plot
% degradación
for i=1:a
    okange(i)=(((sin(ang(i))).^okan1))*(1+Hv*(1-
sin(ang(i))).^okan2);
    okaERE(i)=okange(i)*oka90*fmg;
    % tasa de espesor removido
    e(i)=(okaERE(i)/A);
    figure(3)
    esp_re=esp-e(i)*xe;
    for k=1:ii
        if esp_re(k)<0
            esp_re(k)=NaN;
        end
    end
    plot(xe,esp_re,'LineWidth',1)
    hold on
end

axis([0 inf 0 inf])
title('Degradación del espesor de la placa plana')
xlabel('Tiempo de desgaste [hr]')
ylabel('Espesor de la placa [mm]')
hold on

legend('\alpha=15°','\alpha=25°','\alpha=35°','\alpha=45°','\alpha=55°');
hold on
```

Código de geo.m

```
function [gmesh,mesh,amesh,mcen,mesha]=geo(geo_d,ii)

% Entrada:
% geo_d:   Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% gmesh   Matriz de datos de centroides placas iniciales
% mesh    Matriz de coordenadas de puntos de placas iniciales
% amesh:  Matriz de datos de la altura del álabe
% mcen    Matriz de coordenadas de centros de impulsor
% mesha   Matriz de coordenadas de las placas de todos los
álabes

digits(8);
% Inicialización de matrices
SAO=geo_d(1);
SBO=geo_d(2);
Abeta1=geo_d(3)*(pi/180);
Abeta2=geo_d(4)*(pi/180);
Z=geo_d(5);
angcir=linspace(0,2*pi,ii);

mcen=zeros(ii,4);
for i=1:ii
    % Circunferencia exterior
    mcen(i,1)=SAO*cos(angcir(i));
    mcen(i,2)=SAO*sin(angcir(i));

    %Circunferencia interior
    mcen(i,3)=SBO*cos(angcir(i));
    mcen(i,4)=SBO*sin(angcir(i));
end

syms SAaa SAOBA SSAB Stheta

eq1=SSAB==SAO*(sin(pi/2-SAaa)/sin(SAOBA));
eq2=SAO/SBO==sin(SAOBA)/sin(Stheta);
eq3=2*SAOBA-SAaa==Abeta1+Abeta2+(pi/2);
eq4=SAOBA+Stheta-SAaa==pi/2;

[~,AOBA,SAB,~]=vpasolve([eq1,eq2,eq3,eq4],[SAaa,SAOBA,SSAB,Stheta],
[0 pi/2;pi/2 pi;0 Inf;0 pi/4]);

AOBA=double(AOBA);
SAB=double(SAB);
APBA=AOBA-Abeta1;
ABPA=pi-2*APBA;
APAB=APBA;
```

```

APBD=pi/2+APBA-AOBA;
SBP=SAB*sin(APAB)/sin(ABPA);

% espesor de los álabes
anga=atan(geo_d(6)*tan(APBD)/(SBP-geo_d(6)))-0.025;

% Cálculo de coordenadas de putnos de los alabes
ang2=linspace((pi-(APBD+ABPA)),(pi-APBD),ii);
ang2k=linspace((pi-(APBD+ABPA+4*anga)),(pi-(APBD+anga)),ii);
centmeshx=SBP*cos(APBD);
centmeshy=(-SBP*sin(APBD))+SBO;
x2=SBP*cos(ang2);
y2=SBP*sin(ang2);

centax=zeros(Z);
centay=zeros(Z);
xa=zeros(Z,ii);
ya=zeros(Z,ii);
mesha=zeros(Z,ii,2);

for k=1:2
    for i=1:Z
        for j=1:ii
            centax(i)=SBP*cos(-APBD+2*pi*(i-1)/Z)+SBO*cos(2*pi*((i-1)/Z)+pi/2);
            centay(i)=SBP*sin(-APBD+2*pi*(i-1)/Z)+SBO*sin(2*pi*(i-1)/Z+pi/2);
            if k==1
                xa(i,j)=SBP*cos(ang2(j)+2*pi*(i-1)/Z);
                ya(i,j)=SBP*sin(ang2(j)+2*pi*(i-1)/Z);
            else
                xa(i,j)=(SBP-geo_d(6))*cos(ang2k(j)+2*pi*(i-1)/Z);
                ya(i,j)=(SBP-geo_d(6))*sin(ang2k(j)+2*pi*(i-1)/Z);
            end
            mesha(i,j,k,1)=xa(i,j)+centax(i);
            mesha(i,j,k,2)=ya(i,j)+centay(i);
        end
    end
end

% Geometria de la i-ésima placa
mesh=zeros(ii,2);

for i=1:ii
    % coordenada X del punto "p"
    mesh(i,1)=x2(i)+centmeshx;
    % coordenada Y del punto "p"
    mesh(i,2)=y2(i)+centmeshy;
end
mesh=flipud(mesh);

```

```
% Vector Distancia al centro de la i-ésima placa
for i=1:ii
    mesh(i,3)=(((mesh(i,1).^2)+(mesh(i,2).^2))^(1/2));
    mesh(i,4)=abs(atan(mesh(i,1)/mesh(i,2)));
end

% Ángulo relativo del punto "p"
for i=1:ii
    mesh(i,5)=ang2(i);
end
mesh(1,6)=ABPA;

% Centro de la i-ésima placa
angmeshABPA=linspace(0,ABPA,ii);
angmesh=zeros(1,ii-1);

for i=1:(ii-1)
    angmesh(i)=(angmeshABPA(i)+angmeshABPA(i+1))/2;
end

gmesh=zeros(ii-1,5);
for i=1:(ii-1)
    % coordenada X del centroide de la i-ésima placa
    gmesh(i,1)=(mesh(i,1)+mesh(i+1,1))/2;
    % coordenada Y del centroide de la i-ésima placa
    gmesh(i,2)=(mesh(i,2)+mesh(i+1,2))/2;
    % ángulo normal al álabe
    gmesh(i,3)=pi-(mesh(i,4)+mesh(i+1,4))/2;
    % ángulo tangente al álabe
    gmesh(i,4)=pi/2-APBD-angmesh(i);
    % radio al centro
    gmesh(i,5)=(((gmesh(i,1).^2)+(gmesh(i,2).^2))^(1/2));
end

% longitud de la i-ésima placa [mm]
amesh(1)=SBP*((2*(1-cos(ABPA/ii)))^(1/2));

% Ancho de la i-ésima placa [mm]
amesh(2)=geo_d(7)/round(geo_d(7)/amesh(1));

% altura triangulo
amesh(3)=SBP*sin(pi/2-(ABPA/(2*ii)));

% numero de elementos
amesh(4)=round(geo_d(7)/amesh(1));

end
```

Código de velocidad.m

```

function V=velocidad(inst_d,slu_d,gmesh,geo_d,ii)
% Entrada:
% inst_d:   Matriz de datos de la instalación
% slud_d:   Matriz de datos del slurry
% gmesh:    Matriz de coordenadas de las placas
% geo_d:    Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% V:        Matriz de velocidades y ángulos

% velocidad angular
w=inst_d(1)*(pi/30);

% Inicialización de matrices
Utan=zeros(ii-1,4);
Wrel=zeros(ii-1,3);
V=zeros(ii-1,5);

for i=1:ii-1
    % Cálculo de velocidad tangencial al álabe para cada i-
    %ésima placa [m/s]
    Utan(i,1)=w*gmesh(i,5)/1000;

    Utan(i,2)=Utan(i,1)*cos(gmesh(i,3)-gmesh(i,4));
    Utan(i,3)=Utan(i,1)*sin(gmesh(i,3)-gmesh(i,4));
    Utan(i,4)=(gmesh(i,3)-gmesh(i,4))*(180/pi);

    % Cálculo de velocidad relativa i-ésima placa [m/s]
    Wrel(i,1)=(slu_d(4)/3600)/(((2*pi*gmesh(i,5))/geo_d(5)-
    geo_d(6))*geo_d(7)*1e-6);

    Wrel(i,2)=Wrel(i,1);
    Wrel(i,3)=0;

    % Cálculo de velocidad absoluta de y ángulo de impacto
    para cada i-ésima placa
    % suma de componentes horizontales y verticales de cada i-
    %ésima placa
    V(i,3)=-Utan(i,2)+Wrel(i,2);
    V(i,4)=-Utan(i,3)+Wrel(i,3);

    % Ángulo de impacto [rad]
    V(i,2)=atan(V(i,4)/V(i,3));
    V(i,2)=abs(V(i,2));
    % Velocidad absoluta de impacto [m/s]

    V(i,1)=(((V(i,3).^2)+V(i,4).^2)+2*V(i,3)*V(i,4)*cos(V(i,2)))
    ).^(1/2);

```

```
% Cálculo de velocidad absoluta y ángulo de salida [m/s]
% suma de componentes horizontales y verticales de cada i-
ésima placa

% Velocidad relativa [m/s]
V(i,5)=Wrel(i,1);
% Velocidad tangencial [m/s]
V(i,6)=Utan(i,1);

end

end
```



Código de erosion.m

```
function [volR_tas,mati_d]=erosion(matg_d,slu_d,V,amesh,ii)

% Entrada:
% matg_d: Matriz de datos de las partículas sólidas
% slud_d: Matriz de datos del slurry
% V: Matriz de velocidades y ángulos
% amesh: Matriz de datos de la altura del álabe

% Salida
% volR_tas Matriz de tasa de volúmen removido en cada placa
% mati_d: Matriz de datos del material del impulsor

% Datos del material del impulsor: Acero alto cromo
% densidad [kg/m3]
rho=7890;
% dureza Vickers (Gpa)
Hv=600*0.009807;
mati_d=[rho,Hv];

% datos erosión
% Modelo de Oka
% Factor de forma del abrasivo
okaK=65;
% Constantes de penetración
okak1=-0.12;
okak2=2.3*((mati_d(2)^(0.038)));
okak3=0.19;
% Velocidad experimental [m/s]
vin=104;
% Diámetro de la partícula experimental [micras]
dpin=326;
% Constantes del abrasivo
okan1=0.71*((mati_d(2)^(0.14)));
okan2=2.4*((mati_d(2)^(-0.94)));

% Inicialización de matrices
okang=zeros(ii-1,1);
oka90=zeros(ii-1,1);
volR_tas=zeros(ii-1,1);
fmg=zeros(ii-1,1);

% Resolución del modelo de Oka
for i=1:ii-1
    % Cálculo de erosión normal y función de impacto de Oka

    oka90(i,1)=okaK*(2*(mati_d(2)).^okak1)*((V(i,1)/vin).^okak2)*((
    matg_d(3)/dpin).^okak3);
    okang(i,1)=(((sin(V(i,2))).^okan1))*((1+mati_d(2)*(1-
    sin(V(i,2))).^okan2);
    % Cálculo de tasa de erosión a través del tiempo
```

```
fmg(i,1)=V(i,1)*amesh(1)*amesh(2)*1e-  
6*slu_d(3)*matg_d(1)*(3600/(amesh(4)*ii));  
volR_tas(i,1)=okang(i,1)*oka90(i,1)*fmg(i,1);  
end  
  
end
```



Código de perdm.m

```
function
[esp_tasMAX,esp_tasa,mptot,mas_tasa,esp_tot,mesher,MTBF]=perdm
as(amesh,mati_d,geo_d,volR_tas,mesh,tens,ii)

% Entrada:
% amesh:      Matriz de datos de la altura del álabe
% mati_d:     Matriz de datos del material del impulsor
% geo_d:      Matriz de datos de la geometría del impulsor
% volR_tas    Matriz de tasa de volúmen removido en cada
placa
% mesh       Matriz de coordenadas de puntos iniciales de
placas
% tens       Matriz de tiempos de ensayo

% Salida
% esp_tasMAX Máxima tasa de remoción de espesor
% mptot      Masa total removida
% mas_tasa   Matriz de tasa de remoción de masa
% esp_tot    Matriz de espesor removido en cada placa
% mesher     Matriz de coordenadas de placas erosionadas
% MTBF       Tiempo medio entre fallos

digits(8);
% Inicialización de matrices
mas_tasa=zeros(ii-1,length(tens));
esp_tasa=zeros(ii-1,1);
esp_tot=zeros(ii-1,length(tens));
mas_tot=zeros(1,length(tens));
mesher=zeros(ii-1,4,length(tens));
xer=zeros(ii-1,2,length(tens));
yer=zeros(ii-1,2,length(tens));
c=zeros(1,ii-1);

for jj=1:length(tens)

    for i=2:ii;
        % Cálculo de masa perdida en la i-ésima placa [kg]
        mas_tasa(i-1,jj)=volR_tas(i-1)*mati_d(1)*1e-
9*tens(jj)*amesh(4);
        % Cálculo de masa perdida total
        mas_tot(1,jj)=mas_tot(1,jj)+mas_tasa(i-1,jj);
    end

    % Cálculo de tasa de espesor removido en la i-ésima placa
[mm]
    for i=1:ii-1
        a=amesh(1)*amesh(2)/(2*amesh(3));
        b=amesh(1)*amesh(2);
        co=-volR_tas(i);
        esp_tasa(i,1)=(-b+((b^2)-4*a*co)^(1/2))/(2*a);
    end
end
```

```
    esp_tot(i,jj)=esp_tasa(i,1)*tens(jj);  
end  
  
% Máxima tasa de remoción de espesor  
esp_tasMAX=max(esp_tasa(:,1));  
  
% Cálculo de MTBF  
MTBF=0.8*geo_d(6)/esp_tasMAX;  
  
% Generado de mallado de erosión en el álabe  
tetha=mesh(1,6)/ii;  
phi=mesh(:,5);  
  
for i=2:ii-1  
    if esp_tot(i,jj)<geo_d(6)  
        c(i)=esp_tot(i,jj)/cos(tetha/2);  
    else  
        c(i)=NaN;  
    end  
    % punto inferior  
    xer(i,1)=mesh(i,1)+c(i)*cos(phi(i)+tetha/2);  
    yer(i,1)=mesh(i,2)-c(i)*sin(phi(i)+tetha/2);  
end  
  
for i=2:ii  
    % punto superior  
    xer(i-1,2)=mesh(i-1,1)+c(i-1)*cos(phi(i-1));  
    yer(i-1,2)=mesh(i-1,2)-c(i-1)*sin(phi(i-1));  
end  
  
for i=1:ii-1;  
    mesher(i,1,jj)=xer(i,1);  
    mesher(i,2,jj)=yer(i,1);  
    mesher(i,3,jj)=xer(i,2);  
    mesher(i,4,jj)=yer(i,2);  
end  
end  
mesher(1, :, :)=NaN;  
mptot=mas_tot;  
end
```

Código de gulich.m

```
function MTBFgul=gulich(inst_d,mati_d,matg_d,V,geo_d)
% Entrada:
% inst_d:   Matriz de datos de la instalación
% gmesh    Matriz de datos de centroides placas iniciales
% mati_d:   Matriz de datos del material del impulsor
% matg_d:   Matriz de datos de las partículas sólidas
% V:        Matriz de velocidades y ángulos
% geo_d:    Matriz de datos de la geometría del impulsor

% Salida
% MTBFgul   Tiempo medio entre fallos según Gulich

% Ingreso de variables del modelo
fform=40;
hmat=mati_d(2)/0.009807;
fmat=0.54*(700/hmat)-0.22;
fkg=matg_d(3)*1e-3;
fkf=0.8;
fhs=0.5;
cs=inst_d(3)*1000/(1-inst_d(3));
cseq=inst_d(3)*1000/(1-inst_d(3))*(hmat/1150);

% Cálculo de velocidad de la mezcla
w=V(1,5)*cos(geo_d(4)*pi/180);

gulEout=(fform*fmat*fkg*fkf*fhs/(1+cs/matg_d(1)))*cseq*((w/10)
^3);
MTBFgul=(0.8*geo_d(6)/gulEout)*8640;

end
```

Código de plotER.m

```
function
plotER(V,volR_tas,mas_tasa,esp_tasa,esp_tot,mcen,mesha,mesher,
geo_d,matg_d,tens,inst_d,ii)

% Entrada:
% V:      Matriz de velocidades y ángulos
% volR_tas Matriz de tasa de volúmen removido en cada placa
% mas_tasa Matriz de tasa de remoción de masa
% esp_tot Matriz de espesor removido en cada placa
% mcen    Matriz de coordenadas de centros de impulsor
% mesha   Matriz de coordenadas de las placas de todos los
álabes
% mesher  Matriz de coordenadas de placas erosionadas
% geo_d:  Matriz de datos de la geometría del impulsor
% tens    Matriz de tiempos de ensayo
% inst_d: Matriz de datos de la instalación

% Salida
% Gráficas

% Inicialización de colores y ancho de líneas
lnwg=1.5;

Geometría impulsor antes de erosión
fig1=figure(1);
set(fig1, 'Position', [0 0 500 500]);
plot(mcen(:,1),mcen(:,2), 'b', 'LineWidth', lnwg);
axis off
title('Geometría inicial del Impulsor')
xlim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
ylim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
hold on
plot(mcen(:,3),mcen(:,4), 'b', 'LineWidth', lnwg);
hold on
for k=1:2
    for i=1:geo_d(5)

plot(mesha(i,:,k,1),mesha(i,:,k,2), 'k', 'LineWidth', lnwg)
        hold on
    end
end

% Gráfica de perfil de velocidades absolutas y ángulos de
impacto
fig2=figure(2);
set(fig2, 'Position', [0 0 800 700]);
subplot(2,1,1);
plot(V(:,1), 'r', 'LineWidth', lnwg);
hold on
plot(V(:,5), 'g', 'LineWidth', lnwg);
```

```

hold on
plot(V(:,6), 'b', 'LineWidth', lnwg);
hold on
legend('Velocidad absoluta [V]', 'Velocidad relativa
[W]', 'Velocidad tangencial [U]', 'Location', 'northwest');
title('Perfil de velocidades')
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Velocidad absoluta de la partícula [m/s]')
hold on

vtemp=V(:,2)*(180/pi);
subplot(2,1,2);
plot(vtemp, 'r', 'LineWidth', lnwg);
title('Perfil de Ángulos')
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Ángulo de impacto de la partícula [deg]')
hold on

% Gráfica de tasa de erosión volumétrica y tasa de espesor
fig3=figure(3);
set(fig3, 'Position', [0 0 800 900]);
subplot(2,1,1);
plot(volR_tas, 'r', 'LineWidth', lnwg);
title(['Tasa de Erosión Volumétrica [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']'])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Tasa de erosión volumétrica para cada placa i
[mm3/hr]')
hold on

subplot(2,1,2);
plot(esp_tasa, 'b', 'LineWidth', lnwg);
title(['Cantidad de espesor removido del álabe [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']'])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Tasa de espesor removido para cada placa i [mm/hr]')
hold on

% Gráfica de masa y espesor en elemento i
fig4=figure(4);
set(fig4, 'Position', [0 0 800 900]);
subplot(2,1,1);
plot(mas_tasa, 'LineWidth', lnwg);
legend('1000 horas', '3000 horas', '5000 horas');
title(['Cantidad de masa removida [Cw=' num2str(inst_d(3)*100)
'% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']'])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Masa perdida del elemento i [kg]')
hold on

subplot(2,1,2);
plot(esp_tot, 'LineWidth', lnwg);
legend('1000 horas', '3000 horas', '5000 horas');

```

```

title(['Cantidad de espesor removido del álabe [Cw='
num2str(inst_d(3)*100) '% dp=' num2str(matg_d(3)) '\mum']'])
xlabel('Coordenada "i" de la placa')
ylabel('Espesor removido del elemento i [mm]')
hold on

% Visualización de álabe erosionado

for jj=1:length(tens)

    % Por perfil
    fig6=figure(5+(jj-1)*2);
    set(fig6, 'Position', [0 0 500 500]);
    xt=zeros(ii-1,2,geo_d(5));
    yt=zeros(ii-1,2,geo_d(5));
    for j=1:geo_d(5)
        for i=1:ii-1
            xt(i,1,j)=mesher(i,1,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))-
mesher(i,2,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            xt(i,2,j)=mesher(i,3,jj)*cos(2*pi*(j-1)/geo_d(5))-
mesher(i,4,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            yt(i,1,j)=mesher(i,2,jj)*cos(2*pi*(j-
1)/geo_d(5))+mesher(i,1,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
            yt(i,2,j)=mesher(i,4,jj)*cos(2*pi*(j-
1)/geo_d(5))+mesher(i,3,jj)*sin(2*pi*(j-1)/geo_d(5));
        end
        for i=2:ii-2
            plot([xt(i,1,j) xt(i+1,2,j)], [yt(i,1,j)
yt(i+1,2,j)], 'r', 'LineWidth', lnwg);
            hold on
        end
    end

    plot(mcen(:,1),mcen(:,2), 'b', 'LineWidth', lnwg);
    xlim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
    ylim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
    hold on
    plot(mcen(:,3),mcen(:,4), 'b', 'LineWidth', lnwg);
    hold on

    for i=1:geo_d(5)
        plot(mesha(i, :, 1, 1), mesha(i, :, 1, 2), '--
k', 'LineWidth', lnwg)
        hold on
    end
    for i=1:geo_d(5)

plot(mesha(i, :, 2, 1), mesha(i, :, 2, 2), 'k', 'LineWidth', lnwg)
        hold on
    end

axis off

```

```

    title(['Visualización de espesor removido ['
num2str(tens(jj)) ' horas Cw=' num2str(inst_d(3)*100) '% dp='
num2str(matg_d(3)) '\mum]'])
    xlabel('Coordenada "x"')
    ylabel('Coordenada "y"')
    plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);

% Por puntos
fig7=figure(6+(jj-1)*2);
set(fig7, 'Position', [500 0 550 500]);
c=zeros(1,ii-1);

pointsize=10;
for k=1:jj
    for j=1:geo_d(5)
        for i=1:ii-1;
            c(i)=esp_tot(i,k);
        end
        scatter(xt(:,1,j),yt(:,2,j),pointsize,c,'filled');
        hold on
        scatter(xt(:,2,j),yt(:,2,j),pointsize,c,'filled');
        hold on
        colorbar;

set(gca,'CLim',[min(esp_tot(:,k)),max(esp_tot(:,k))])
    end
end

axis off
title(['Visualización de espesor removido ['
num2str(tens(jj)) ' horas Cw=' num2str(inst_d(3)*100) '% dp='
num2str(matg_d(3)) '\mum]'])
    xlabel('Coordenada "x"')
    ylabel('Coordenada "y"')
    plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);
% xlim([min(mesh(:,1))-20 max(mesha(1,(:,1,1))+50])
% ylim([min(mesha(1,(:,2,2))-20 max(mesh(:,2))+20])
    plot(mcen(:,1),mcen(:,2),'b','LineWidth',lnwg);
    xlim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
    ylim([- (mcen(ii,1)+20) mcen(ii,1)+20])
    hold on
    plot(mcen(:,3),mcen(:,4),'b','LineWidth',lnwg);
    hold on

    for i=1:geo_d(5)
        plot(mesha(i,(:,1,1)),mesha(i,(:,1,2)),'--
k','LineWidth',lnwg)
        hold on
    end
    for i=1:geo_d(5)

plot(mesha(i,(:,2,1)),mesha(i,(:,2,2)),'k','LineWidth',lnwg)
        hold on

```

end

end

end



Código de principal.m

```
function [esp_tasMAX,MTBF,MTBFgul]=principal(Cw,dp)
% Entrada:
% Cw:           Matriz de concentraciones en peso
% Z:           Matriz de número de álabes

% Salida
% esp_tasMAX   Máxima tasa de remoción de espesor
% mptot       Masa total removida
% MTBF        Tiempo medio entre fallos
% MTBFgul     Tiempo medio entre fallos según Gulich

%
% Datos de la instalación
%
% 1: velocidad angular [RPM]
N=600;
% 2: Caudal de la mezcla [m3/hr]
Qm=2000;
% 3: concentración en masa
% ingreso como variable independiente
% matriz de datos
inst_d=[N,Qm,Cw];

% Geometría del impulsor
% 1: radio externo impeller [mm]
rei=457;
% 2: radio interno impeller [mm]
rii=153;
% 3: angulo ataque del álabe entrada [deg]
Abeta1=55;
% 4: angulo ataque del álabe salida [deg]
Abeta2=25;
% 5: numero de álabes
Z=3;
% 6: espesor alabe [mm]
ale=35;
% 7: altura alabe [mm]
alh=171;
% matriz salida de datos
geo_d=[rei,rii,Abeta1,Abeta2,Z,ale,alh];

%
% datos de las partículas
%
% densidad agua [kg/m3]
rhoa=1000;
% 1: densidad arena [kg/m3]
rhog=2600;
% 2: gravedad específica arena [adim]
Sg=rhog/rhoa;
```

```
% 3: diámetro de partícula [um]
% ingreso como variable independiente

% matriz de salida de datos
matg_d=[rhog,Sg,dp];

% datos del slurry
% 1: gravedad específica mezcla [adim]
Sm=Sg/((Sg-inst_d(3)*(Sg-1)));
% 3: concentración por volumen [adim]
Cv=inst_d(3)*Sm/Sg;
% 2: flujo másico sólidos[kg/hr]
fmg=Cv*rhog*Qm;
% matriz de salida de datos
slu_d=[Sm,fmg,Cv,Qm];

%
% Otros
%
% Numero de iteraciones
ii=100;
% Matriz de tiempo de ensayo [horas]
tens=[1000 3000 5000];

% Outputs
[gmesh,mesh,amesh,mcen,mesha]=geo(geo_d,ii);
V=velocidad(inst_d,slu_d,gmesh,geo_d,ii);
[volR_tas,mati_d]=erosion(matg_d,slu_d,V,amesh,ii);
[esp_tasMAX,esp_tasa,mptot,mas_tasa,esp_tot,mesher,MTBF]=perdm
as(amesh,mati_d,geo_d,volR_tas,mesh,tens,ii);
MTBFgul=gulich(inst_d,mati_d,matg_d,V,geo_d);
%
plotER(V,volR_tas,mas_tasa,esp_tasa,esp_tot,mcen,mesha,mesher,
geo_d,matg_d,tens,inst_d,ii);
end
```

Código de completo.m

```
% Incialiación de matriz de concentraciones en peso
Cw=linspace(0.2,0.6,21);
% Incialiación de matriz dediámetro de partículas
dp=[30,40,50];
% Inicialización de matrices
MTBF=zeros(length(Cw),3);
MTBFgul=zeros(length(Cw),3);
esp_tasMAX=zeros(length(Cw),3);
mptot=zeros(length(Cw),3,3);

for i=1:length(Cw)
    for j=1:3

[esp_tasMAX(i,j),MTBF(i,j),MTBFgul(i,j)]=principal(Cw(i),dp(j)
);
        end
    end

% Gráficas de MTBF

MTBFout(1,:,1)=MTBF(6,:);
MTBFout(2,:,1)=MTBF(11,:);
MTBFout(3,:,1)=MTBF(16,:);
MTBFout(1,:,2)=MTBFgul(6,:);
MTBFout(2,:,2)=MTBFgul(11,:);
MTBFout(3,:,2)=MTBFgul(16,:);
MTBFout(1,:,3)=MTBFout(1,:,1)./MTBFout(1,:,2);
MTBFout(2,:,3)=MTBFout(2,:,1)./MTBFout(2,:,2);
MTBFout(3,:,3)=MTBFout(3,:,1)./MTBFout(3,:,2);
MTBFout(1,:,4)=MTBFout(1,:,1)./MTBFout(1,:,2)-1;
MTBFout(2,:,4)=MTBFout(2,:,1)./MTBFout(2,:,2)-1;
MTBFout(3,:,4)=MTBFout(3,:,1)./MTBFout(3,:,2)-1;

% Inicialización de colores y ancho de líneas
morado=[128 0 128]./255;
naranja=[255 165 0]./255;
verde=[0 128 0]./255;
mrksize=8;
lnwg=1.5;
for kk=1:2
    ecart=max(max(MTBFout(:,: ,kk)))+500;
end
% Validación de resultados
fig1=figure(1);
ay1=gca;
ay1.YAxis.Exponent = 0;
ay1.YAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
ax1=gca;
ax1.XAxis.Exponent = 0;
ax1.XAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
```

```

set(fig1, 'Position', [0 0 800 800])

plot([0 ecart],[0 ecart],'k','LineWidth',lnwg)
hold on
scatter(MTBFout(1,:,2),MTBFout(1,:,1),72,morado,'s','filled')
axis([0 ecart 0 ecart])
hold on
scatter(MTBFout(2,:,2),MTBFout(2,:,1),72,naranja,'d','filled')
hold on
scatter(MTBFout(3,:,2),MTBFout(3,:,1),72,verde,'filled')
hold on

plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,1,3)*ecart],'--
r','LineWidth',lnwg)
hold on
plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,2,3)*ecart],'--
g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot([0 ecart],[0 MTBFout(1,3,3)*ecart],'--
b','LineWidth',lnwg)
hold on
[h,~]=legend('MTBFprop/MTBFgul=1','Cw=30%','Cw=40%','Cw=50%',
dp=30\mum','dp=40\mum','dp=50\mum','Location','southeast');
title('Variación de resultados del modelo propuesto vs modelo
de Gulich')
xlabel('MTBF Gulich [hr]')
ylabel('MTBF propuesto [hr]')

% Comparación de resultados
fig2=figure(2);
% Continuo
plot(Cw*100,MTBF(:,1),'r')
axis([-inf inf 0 inf])

ay2 = gca;
ay2.YAxis.Exponent = 0;
ay2.YAxis.TickLabelFormat = '%6.0f';
set(fig2, 'Position', [800 0 800 800])

hold on
plot(Cw*100,MTBF(:,2),'g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBF(:,3),'b','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBFgul(:,1),'--r','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBFgul(:,2),'--g','LineWidth',lnwg)
hold on
plot(Cw*100,MTBFgul(:,3),'--b','LineWidth',lnwg)
hold on
legend('Propuesto dp=30 \mum','Propuesto dp=40\mum','Propuesto
dp=50\mum','Gulich dp=30\mum','Gulich dp=40\mum','Gulich
dp=50\mum')

```

```
title('Comparación de resultados del modelo propuesto vs  
modelo de Gulich')  
xlabel('Concentración en peso [%]')  
ylabel('Tiempo medio entre falas [hr]')  
  
% Puntos propuesto  
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace  
Color','r')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','r')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,1),'ro','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','r')  
hold on  
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace  
Color','g')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','g')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,2),'go','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','g')  
hold on  
plot(Cw(6)*100,MTBF(6,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFace  
Color','b')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBF(11,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','b')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBF(16,3),'bo','MarkerSize',mrksize,'MarkerFa  
ceColor','b')  
hold on  
  
% Puntos Gulich  
plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'MarkerF  
aceColor','r')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'Marke  
rFaceColor','r')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,1),'rd','MarkerSize',mrksize,'Marke  
rFaceColor','r')  
hold on  
plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'MarkerF  
aceColor','g')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'Marke  
rFaceColor','g')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,2),'gd','MarkerSize',mrksize,'Marke  
rFaceColor','g')  
hold on
```

```
plot(Cw(6)*100,MTBFgul(6,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')  
hold on  
plot(Cw(11)*100,MTBFgul(11,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')  
hold on  
plot(Cw(16)*100,MTBFgul(16,3),'bd','MarkerSize',mrksize,'MarkerFaceColor','b')  
hold on
```

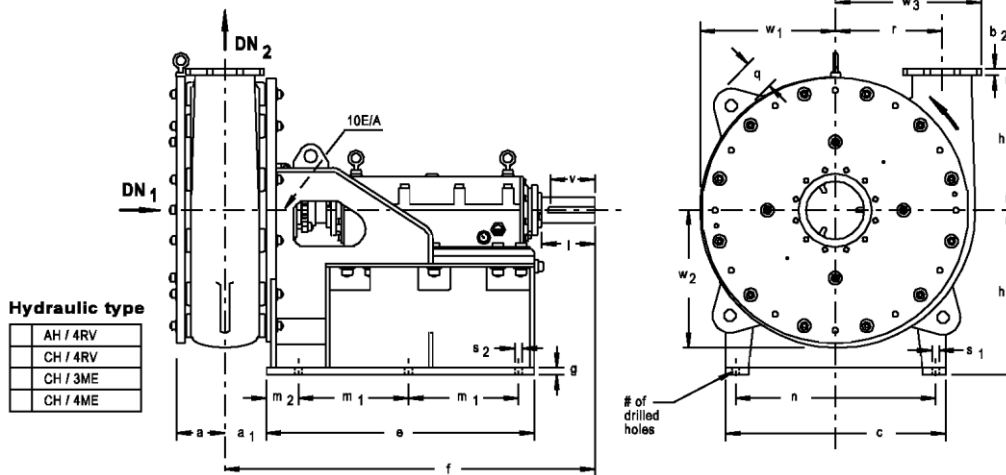


Dimensiones de la bomba



Dimension Table **LSA S**

Slurry Pump



Hydraulic type

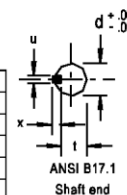
AH / 4RV
CH / 4RV
CH / 3ME
CH / 4ME

Pump Dimensions

Dimensions in mm

Pump and Shaft size	Pump										W ₁	W ₂	W ₃	q
	DN ₁	DN ₂	a	a ₁	b ₂	f	h ₁	h ₂	r	(ref.)				
2 x 3-21	2	76	51	140	97	19	1180	406	381	292	371	371	368	89
3 x 4-21	2	102	76	140	97	25	1180	406	381	292	378	378	387	89
4 x 6-21	2	152	102	176	125	27	1219	406	438	292	381	381	406	89
4 x 6-25	3	152	102	146	130	29	1437	540	451	356	451	451	470	117
6 x 8-25	3	203	152	175	159	29	1467	540	483	362	467	475	502	135
8 x 10-25	3	254	203	200	184	32	1491	540	584	416	546	554	587	135
8 x 10-32	3	254	203	213	202	32	1511	540	622	467	594	603	638	135
	4	254	203	213	181	32	1619	724	622	467	594	603	638	135
	5	254	203	213	181	32	1702	724	622	467	594	603	638	135
10 x 12-32	4	305	254	238	206	33	1645	724	718	467	610	646	670	135
	5	305	254	238	206	33	1727	724	718	467	610	646	670	135
	5	305	254	238	210	35	1661	724	705	533	666	689	737	133
10 x 12-36	4	305	254	238	210	35	1734	724	705	533	666	689	737	133
	5	305	254	238	210	35	1734	724	705	533	666	689	737	133
	5	305	254	238	210	35	1734	724	705	533	666	689	737	133
12 x 14-36	4	356	305	264	235	35	1676	724	781	533	727	740	775	133
	5	356	305	264	235	35	1759	724	781	533	727	740	775	133
	5	356	305	264	235	35	1759	724	781	533	727	740	775	133
16 x 16-39	4	406	406	270	235	51	1676	724	1038	641	838	884	940	133
	5	406	406	270	235	51	1759	724	1038	641	838	884	940	133
	6	406	406	270	311	51	2178	1016	1038	641	927	927	940	133
	7	406	406	270	311	51	2178	1016	1038	641	927	927	940	133
16 x 18-44	6	457	406	278	305	51	2181	1016	1067	708	975	975	1006	133
	7	457	406	278	305	51	2181	1016	1067	708	975	975	1006	133
18 x 18-44	6	457	457	329	356	51	2232	1016	1054	678	910	946	995	165
	7	457	457	329	356	51	2232	1016	1054	678	910	946	995	165
	7	457	457	329	356	51	2232	1016	1054	678	910	946	995	165
20 x 20-48	6	508	508	352	354	64	2224	1016	1226	791	1108	1108	1178	165
	7	508	508	352	354	64	2224	1016	1226	791	1108	1108	1178	165
	9	508	508	352	406	64	2415	1130	1226	791	1108	1108	1178	165
20 x 24-48	9	610	508	392	406	64	2413	1130	1226	791	974	1041	1178	165
22 x 24-54	9	610	559	446	556	67	2557	1130	1270	800	1012	1058	1219	165
26 x 28-58	9	711	680	421	458	51	2467	1130	1168	1016	1240	1300	1451	165

Shaft size	Pedestal									Shaft end					
	c	e	g	m ₁	m ₂	n	s ₁	s ₂	#	d	l	t	u	v	x
2	483	856	32	298	169	438	26	26	6	74.60	183	63.83	19.05	168	19.05
3	762	1013	32	438	92	673	32	32	6	100.01	244	85.66	25.40	229	25.40
4	965	1175	32	483	141	876	32	32	6	112.71	222	98.55	25.40	216	25.40
5	965	1175	32	483	141	876	32	32	6	138.11	248	120.38	31.75	213	31.75
6	1054	1480	32	254	152	953	32	32	12	163.50	348	142.90	38.10	311	38.10
7	1054	1480	32	254	152	953	32	32	12	163.50	333	142.90	38.10	311	38.10
9	1295	1514	32	210	144	1194	38	38	14	163.50	279	146.08	31.75	248	31.75



7367D

2369.3100/A8-14 G2

Connection flanges

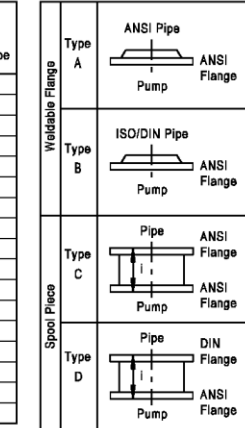
Pump size	DN ₁		DN ₂	
	D.N.	Type	D.N.	Type
2x3-21	76		51 ⁺	
3x4-21	102		76	
4x6-21	152 ⁺		102	
4x6-25	152 ⁺		102	
6x8-25	203 ⁺		152 ⁺	
8x10-25	254		203 ⁺	
8x10-32	254		203 ⁺	
10x12-32	305		254	
10x12-36	305		254	
12x14-36	356		305	
16x16-39	406		406	
16x18-44	457		406	
18x18-44	457		457	
20x20-48	508		508	
20x24-48	610		508	
20x22-54	559		508	
26x28-58	711		660	

- 1) All pump flanges are interchangeable with ANSI B16.5, 150 psi (10 bar)
- 2) Adapter B or D required
- + Indicates pump flanges interchangeable with DIN 2533-16 or DIN 2532-10

Flange dimensions

D.N.	ANSI	DIN
51 ⁺	B16.5 ¹⁾	2533-16
76	B16.5 ¹⁾	2533-16 ²⁾
102	B16.5 ¹⁾	2533-16 ²⁾
152 ⁺	B16.5 ¹⁾	2533-16
203 ⁺	B16.5 ¹⁾	2532-10
254	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
305	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
356	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
406	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
457	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
508	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
559	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
610	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
660	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾
711	B16.5 ¹⁾	2532-10 ²⁾

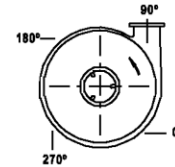
Adapter types



For permissible forces and moments at pump nozzles, see section 4.3.5 in Maintenance Manual

Discharge Positions

0°	180°
15°	195°
18°	198°
22.5°	202.5°
30°	210°
36°	216°
45°	225°
54°	234°
60°	240°
67.5°	247.5°
72°	252°
75°	255°
90°	270°
105°	285°
108°	288°
112.5°	292.5°
120°	300°
126°	306°
135°	315°
144°	324°
150°	330°
157.5°	337.5°
162°	342°
165°	345°



For other discharge positions see 7.8 LSA S Pump Information Table located in the Maintenance Manual

Connections in inches (US)

Connections	Shaft size		Designation
	6, 7	9	
10E/A	G 1 1/2 NPT	G 1 1/4 NPT	Sealing liquid inlet / outlet

Connections in inches (US)

Connections	Shaft size			Designation
	2	3	4, 5	
10E/A	G 1/2 NPT	G 3/4 NPT	G 1 NPT	Sealing liquid inlet / outlet



Drawing No.				Purchaser No.
Scale				Customer No.
	Date	Name	Rev.	
	Type	Size		Order No.
	<p>LSA S</p>			Serial No.
<p>Dimension Table</p>				Should always be stated in correspondence
<p>GIW INDUSTRIES, INC. 5000 Wrightsboro Road Grovetown, Georgia 30813-9750 USA ☎ : 01 (706) 863-1011 Fax: 01 (706) 860-5897</p>				