

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**



TESIS:

**“EVALUACIÓN DEL REVESTIMIENTO DE POLÍMEROS SOBRE
LOS ÁLABES DE AGITADORES DE ALTA INTENSIDAD PARA
LA REDUCCIÓN DE FALLAS”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
INGENIERÍA CON MENCIÓN EN GERENCIA E INGENIERÍA DE
MANTENIMIENTO**

**ELABORADO POR:
FERNANDO LENIN ZEGARRA CASTAÑEDA**

**ASESOR:
MG. JORGE ORTIZ PORRAS**

LIMA - PERÚ

2020

Dedicatoria

A mi hijo Haarim agradezco su cariño, su presencia, y su existencia para quien dedico este trabajo.

Agradecimiento

Este trabajo que ahora presento no es el resultado de un esfuerzo individual solamente, más aún provienen de importantes contribuciones que fui recogiendo durante mi trayectoria personal, profesional, académica que fueron el aliciente para elaborarlo.

Mi especial agradecimiento y reconocimiento con la Empresa **MINERAL FLUIDS ENGINEERING DESIGN & SERVICES S.A.C.** en la cual me desempeñé como Gerente general desde el año 2000 en el Perú, por apoyar el aporte a la industria minera metalúrgica del Perú, en solucionar y optimizar los diseños y procesos metalúrgicos, para el laboratorio metalúrgico **KPM CANADA** (Kingston Process Metallurgy INC) en Ontario Canadá, y a la compañía especialista en procesos auríferos **KEMIX PTY SUDAFRICA** quienes me apoyaron con el diseño de los álabes, polímeros y sus recomendaciones técnicas de las pruebas de laboratorio, a nuestros profesores de la universidad que contribuyeron con mi formación y enseñanza, **Magister Jorge Ortiz** profesor de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Ingeniería, **Ingeniero Edgardo Tabuchi** e **Ingeniero Manuel Caballero**, profesores asociados de la Escuela Académico Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Tabla de Contenidos

Agradecimiento	3
Tabla de Contenidos	4
Índice de Tablas	8
Índice de Figuras	9
Resumen	13
Abstract	14
Introducción	15
Capítulo I: Antecedentes Bibliográficos	17
Capítulo II: Descripción de la Realidad Problemática	24
2.1 Formulación del Problema	25
2.1.1 Problema General	25
2.1.2 Problemas Específicos	25
2.2 Justificación e Importancia de la Investigación	26
2.3 Objetivos, hipótesis variables e indicadores	27
2.3.1 Objetivo General	27
2.3.2 Objetivos Específicos	27
2.4 Hipótesis	27
2.4.1 Hipótesis General	27
2.4.2 Hipótesis Específicas	27
2.5 Variables e indicadores	28
2.5.1 Variable Independiente	28
2.5.2 Variable Dependiente	28
2.6. Metodología de Investigación	29

2.6.1 Tipo y Nivel de la Investigación.....	29
2.6.2 Periodo de Análisis	29
2.6.3 Fuentes de información e Instrumentos empleados	29
2.6.4 Técnicas de Recolección y Procesamiento de Datos	30
Capítulo III: Marco Teórico	31
3.1 Fundamentos Teóricos	31
3.1.1 Distribución de Weibull aplicado a la aproximación Estadística del Proceso de Falla	31
3.1.2 Procedimiento Experimental	32
3.1.3 Fundamentos Teóricos de la durabilidad del contacto caucho/metal con absorción de agua.....	39
3.1.4 Tipos de Desgaste en la Industria Minero Metalúrgica	44
3.1.5 Formas y Tamaño de partícula	48
3.1.6 Distribución del tamaño de partícula	49
3.1.7 Contaminante Fluido: Agua.....	49
3.1.8 Estabilidad del Desgaste:	51
3.2 Equipos de Laboratorio de Pruebas y Procedimiento	53
3.3 Cálculo de la Velocidad de Desgaste	64
3.5 Variables y Propiedades Mecánicas de los Polímeros afectados por la Corrosión y Abrasión.....	75
Capítulo IV: Marco Conceptual	77
4.1. Tipo de Desgaste.....	77
4.1.1. Desgaste por Erosión	77
4.1.2 Desgaste por Deformación	77
4.1.3 Desgaste por Abrasión	78

4.1.4 Desgaste por Corrosión	78
4.1.5 Degradación de Polímero	78
4.1.6 Desgaste por Molienda	78
4.2 Tipos de Caucho.....	79
4.2.1. Caucho Natural	79
4.2.2 Neopreno	79
4.2.3 Hypalon.....	79
4.2.4 Poliuretanos.....	79
4.2.5 Uretanos	79
4.3 Mantenimiento Proactivo	80
4.4 Recuperaciones de Plata y Manganeseo	80
Capítulo V: Metodología de la Investigación	81
5.1 Unidad de Análisis	81
5.1.1 Pruebas de confirmación de la abrasividad de los 5 polímeros antes de someterlos a la lixiviación (Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú).....	82
5.1.2 Pruebas de Confirmación de Corrosión de los 5 Polímeros antes de someterlos a la lixiviación (Laboratorio de Análisis Mineral de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos– Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geológica)	89
5.1.3. Pruebas de desgaste durante la lixiviación.....	95
Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones	116
6.1 Conclusiones	116
6.2 Recomendaciones.....	118

Bibliografía	120
Anexos	123
1.- Foto del durómetro Ultrasónico marca CE FC Standard Q/GMY 003- 2016	129
2.- Foto del medidor de espesor Modelo LX-A, C, D Type Digital marca CE FC USA	129
3.- Foto de Ejes y Placas de sujeción de los álabes después de la falla por erosión, abrasión y corrosión	130

Índice de Tablas

Tabla 1 Composición de los Especímenes y la Condición de la vulcanización. ...	32
Tabla 2 Dimensiones del Espécimen.....	33
Tabla 3 Composición del caucho vulcanizado estudiado	40
Tabla 4 Caucho versus Forro en Acero de un Molino cónico 8 Pies x 48.....	46
Tabla 5 Resultado de las pruebas preliminares empleando un chorro de pulpa de mineral sobre trece tipos diferentes de materiales	55
Tabla 6 Propiedades de los Forros Polímeros.....	56
Tabla 7 Factores de desgaste para diferentes materiales	66
Tabla 8 Resultados de las pruebas de abrasividad con los polímeros en estudio empleando el equipo de abrasión BAREISS.....	84
Tabla 9 Resultados de pruebas de corrosión con ácido sulfúrico a los 5 polímeros en estudio.....	93
Tabla 10 Características del Mineral Plata – Manganeso en estudio	97
Tabla 11 Codificación de Polímeros	99
Tabla 12 Resumen de Ecuaciones Lineales Weibull y sus parámetros obtenidos	111

Índice de Figuras

Figura 1 Diagrama del aparato empleado para medir el tiempo de vida (a) arrastre y (b) relajación del stress.	34
Figura 2 Ploteo típico de la distribución del tiempo de vida t_b versus probabilidad de supervivencia para pruebas de esfuerzo (caucho SP-NBR & SC-NBR)	34
Figura 3 Ploteo típico de la distribución del tiempo de Vida t_b versus probabilidad de supervivencia para pruebas de cizallamiento (Caucho SP-NBR)	35
Figura 4 Tiempo de Vida t_b vs Modulo de Weibull	36
Figura 5 Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de fractura de SP-NBR.....	37
Figura 6 Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de SC-NBR	37
Figura 7 Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de fractura de SC-NBR (falla a corto término)- (a) arrastre y (b) relajación de stress.....	38
Figura 8 Conexiones eléctricas entre una barra grande de zinc y piezas de acero denominados de acuerdo al tipo.	40
Figura 9 Experimental arrangement for type C test - piezas	41
Figura 10 Curvas de secado para el caucho natural (vulcanizado) después de la exposición al agua de mar a 23 °C para varios tiempos	42
Figura 11 Frecuencia de desgaste en las plantas industriales.....	52
Figura 12 Vista Esquemática del Aparato de Prueba con Pulpa.....	54
Figura 13 Variación de la profundidad de desgaste como función de la duración de la prueba.	57
Figura 14 Relación entre la velocidad de desgaste por volumen y profundidad del poliuretano y SUS403	57

Figura 15 Variación de velocidad de desgaste como función del ángulo de impacto a una velocidad = 23 ms^{-1}	58
Figura 16 Diámetro promedio (μ) vs velocidad de desgaste $\mu\text{m/h}$	59
Figura 17 Concentración c, % Peso vs Velocidad de Desgaste $\mu\text{m/h}$	60
Figura 18 <i>Número de partículas (1/seg) vs velocidad de desgaste $\mu\text{m/h}$</i>	61
Figura 19 Diámetro promedio de partícula (μm) vs velocidad de desgaste ($\mu\text{m}/10^5$).....	62
Figura 20 Número de partículas vs velocidad de desgaste ($\mu\text{m/h}$)	63
Figura 21 Vista seccional del desgaste de los forros laterales.....	67
Figura 22 Efecto del tamaño de la partícula sobre la velocidad de desgaste corregida para los forros laterales (CI – Pruebas de laboratorio; WI – Pruebas de Campo).	68
Figura 23 Comparación de las tendencias del desgaste los forros laterales del metal para los resultados de campo de STD Y HE	69
Figura 24 Comparación de las velocidades de desgaste laterales de caucho y metal para el diseño STD en campo.	70
Figura 25 Patrones de Desgaste con Impulsor STD (Standard)	71
Figura 26 Comparación de los patrones de desgaste para los forros laterales del impulsor HE.....	72
Figura 27 Patrones de desgaste en planta industrial para forros laterales en caucho.....	73
Figura 28 Equipo de Abrasión Bareiss.....	82
Figura 29 Prueba de Abrasividad con el Caucho Natural.....	83
Figura 30 Prueba de Abrasividad con la Silicona.....	83
Figura 31 Polímero vs % Pérdida de Peso.....	85

Figura 32 Polímero vs % Pérdida de Volumen cm^3	86
Figura 33 Polímero vs % Índice de Resistencia Abrasiva	86
Figura 34 Índice de Resistencia Abrasiva vs % Pérdida de Peso	87
Figura 35 Índice de Resistencia vs Pérdida de Volumen (mm^3).....	88
Figura 36 Ubicación de los Polímeros en la Luna de Reloj.....	89
Figura 37 Ubicación de los Polímeros dentro del Vaso Beaker de 800 mls	90
Figura 38 Prueba de corrosión de los polímeros en solución de ácido sulfúrico diluido al 10%.....	90
Figura 39 Muestra de polímeros después del ataque con ácido sulfúrico a temperatura de 70 °C.....	91
Figura 40 Balanza Mettler Toledo Modelo AE160.....	92
Figura 41 Pérdida de Peso por corrosión días versus % Pérdida de Peso.....	94
Figura 42 Variación de Durezas Shore A vs Ataque Acido	95
Figura 43 Prueba de Acondicionamiento a nivel de Laboratorio.....	96
Figura 44 Tanque agitador para las pruebas de erosión y abrasión	100
Figura 45 Fotos de los Impulsores Forrados en Neopreno	101
Figura 46 Fotos de los Impulsores Forrados en EPDM.....	101
Figura 47 Fotos de los Impulsores Forrados en Silicona	101
Figura 48 Fotos de los Impulsores Forrados en Hypalon.....	102
Figura 49 Fotos de los Impulsores Forrados en Caucho Natural	102
Figura 50 Prueba de Desgaste en Lixiviación en pulpa de mineral.....	103
Figura 51 Prueba de Desgaste en Lixiviación con pulpa de mineral.....	104
Figura 52 Espesor de los Álabes forrados en Polímeros vs Dureza Shore A ...	106
Figura 53 Hypalon – Función Weibull.....	108
Figura 54 Caucho Natural – Función Weibull.....	108

Figura 55 Silicona – Función Weibull	109
Figura 56 Neopreno – Función Weibull	109
Figura 57 EPDM – Función Weibull	110
Figura 58 Distribución de Weibull para cada polímero	111
Figura 59 Velocidad de desgaste del Neopreno	112
Figura 60 Velocidad de desgaste del EPDM.....	113
Figura 61 Velocidad de desgaste de la Silicona.....	113
Figura 62 Velocidad de desgaste de Hypalon.....	114
Figura 63 Velocidad de desgaste del Caucho Natural	114
Figura 64 Velocidad de desgaste de los 5 Polímeros	115

Resumen

El presente estudio se dedicará a la investigación de una nueva alternativa de revestimiento polímero sobre los álabes de un agitador de laboratorio para lo cual se medirá el desgaste del actual revestimiento neopreno y de otros polímeros como hypalon, caucho natural, EPDM y silicona.

El método de estudio empleado es el experimental por agitación llevado a cabo a nivel de laboratorio, empleando un vaso de vidrio tipo beaker, un agitador mecánico, pipeta para la adición de ácido sulfúrico y concentrado de mineral, campana extractora para los gases, medidor de PH.

Las pruebas de desgaste para la evaluación de las propiedades de los revestimientos polímeros, se efectuaron de acuerdo a la norma ASTM, para dar validez a los resultados obtenidos durante las pruebas.

Los parámetros evaluados debido al desgaste de los revestimientos por los fenómenos de corrosión, erosión y abrasión son la pérdida en peso de los impulsores y las propiedades medidas en cada caso son dureza Shore A, pérdida de volumen y velocidad de desgaste. Las pruebas se efectuaron durante un periodo de 14 días de agitación continua para cada caso empleando los álabes revestidos en los cinco polímeros en mención.

Se aplicará la fórmula de la distribución de Weibull para estudiar las tendencias del desgaste por pérdidas de peso de los cinco polímeros en el tiempo de agitación aplicado.

Los resultados finales muestran que el caucho natural tiene menor desgaste que los polímeros en estudio en las pruebas de corrosión ácida, abrasión y erosión.

Abstract

This technical study is committed to finding a new polymer lining on the mixer blades surface of a laboratory agitator so that various wear out measurements of tested polymers were obtained. The polymers under evaluation are neoprene, hypalon, natural rubber and silicon.

The experimental method is mixing at a laboratory scale, so the equipments used are a glass beaker, mechanical stirrer, pipet for sulfuric acid addition, slurry, gas extractor, stove, and Ph meter.

The wear test works were accomplished in compliance with the ASTM Standard that allowed to validate the intrinsic properties of the polymer linings under research.

The main parameter evaluated from polymer wear out due to corrosion, erosion and abrasion was the impeller mass loss, furthermore other properties such as hardness Shore A, volume loss and wear rate were measured too.

The wear test works were carried out by fourteen-day agitation. For this reason, five laboratory mixers lined in the different polymers under evaluation, were tested in agitated slurry.

The Weibull distribution formula was used to study the wear trend because of mass loss of the five polymers during the agitation duration.

The results conclude that natural rubber possesses lower wear than the other polymers tested and affected by acid corrosion, abrasion and erosion during the agitation time.

Introducción

El presente estudio se llevó a cabo con la finalidad de investigar las razones causa – efecto del deterioro prematuro de los revestimientos en neopreno de los impulsores en los agitadores con sello mecánico que llevarían a cabo la lixiviación de manganeso y plata en una pulpa ácida de la Empresa Minera del Centro, este proceso se efectúa en un reactor cerrado, debido al desgaste del neopreno se produciría la pérdida de uno o más álabes del impulsor ocasionando una disminución en la producción final de cristales de manganeso y plata, aumentando los costos de mantenimiento y reduciendo la efectividad del equipo, eficiencia del proceso, finalmente su incidencia en el costo total de la operación y ganancias estimadas.

El precio de este concentrado alimentado previo a ser lixiviado es de **142,479 US\$/año** y luego de ser procesado por lixiviación ácida y cristalización, se obtendrán cristales de manganeso-plata de alta pureza generando una ganancia para la empresa de **2'640,000 US/año**, por este motivo es necesario mantener los equipos operativos las 24 horas del día.

La descarga del concentrado alimentado procedente al molino de bolas alimentará al proceso de lixiviación que emplea 4 agitadores de sello mecánico operando en serie dentro de un reactor cerrado, los mismos que trabajan 24 horas continuas e ininterrumpidas para poder disolver las especies valiosas en un tiempo de residencia determinado de 8 horas.

Con la finalidad de reducir el desgaste prematuro de los revestimientos de polímeros por estar en contacto con el mineral, ácido y agua sobre los álabes de los impulsores se procede a efectuar pruebas a nivel de laboratorio empleando otras

alternativas de revestimientos polímeros tales como; **neopreno, hypalon, caucho natural, EPDM y silicona.**

Las primeras pruebas conducidas son dirigidas a estudiar y analizar la degradación del polímero por corrosión (polymer degradation) cuando los álabes revestidos por estos cinco polímeros son sumergidos dentro de una solución de ácido sulfúrico diluido, los cuales posteriormente serán colocados en un tanque agitador con pulpa de mineral que permite medir la abrasión-erosión producidas por el impacto de las partículas de mineral sobre los revestimientos en intervalos de tiempo de agitación.

El método de estudio empleado es el experimental llevado a cabo en laboratorio empleando un tanque fabricado en acero inoxidable 304, un agitador mecánico, pipeta para adición de ácido sulfúrico, una campana extractora de gases, PH metro.

Asimismo, evaluaremos el desgaste de los polímeros empleando **la distribución de Weibull** que permitirá efectuar el análisis del desgaste por corrosión y abrasión-erosión, la velocidad de desgaste, pérdida de volumen y pérdida de propiedades tales como dureza de cada polímero.

Capítulo I: Antecedentes Bibliográficos

Valigi, Logozzo & Rinchi (2015), estudiaron la optimización del rendimiento de un agitador para concreto con la finalidad de reducir el desgaste a nivel industrial, para lo cual se emplea un nuevo diseño de “álabes doblados” con ángulos de 0° a 50° (β_1 , β_2 , y β_3) en dirección de la pulpa para reducir el ángulo de impacto, el desgaste y la potencia del motor, los agitadores operaron a 3000 ciclos. Para este propósito se emplearon tanques de mezclado con dos agitadores planetarios de doble estrella para concreto con 6 álabes de fierro Ni-Hard (550 HB), la composición de pulpa empleada es 85.50 % de sólidos, el PH mayor que 12.5. La duración de la prueba se lleva a cabo hasta apreciar el desgaste en los álabes. Las pruebas indicaron que el álabe doblado con el ángulo más ancho β_3 resulta ser el menos desgastado a la erosión y abrasión debido a que tuvo una pérdida de longitud de 14.5%. El desgaste corrosivo es mayormente un fenómeno químico. La alcalinidad de la pasta crea una película de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ o Fe_2O_3 el cual protege los componentes de acero de la corrosión.

Xie, Jiang, Tufa, & Yick (2015), optimizaron el material de transporte de la pulpa de mineral evaluando los materiales comúnmente empleados en la industria, tales como acero comercial, aleaciones al cromo y elastómeros para reducir la erosión y abrasión de las partículas.

Las pruebas efectuadas para medir el desgaste empleando pulpa de silicio al 50% en peso y tamaño de partículas de 212- 300 μm fueron la de “**Erosión empleando un chorro de pulpa**”, y “**la prueba de erosión Coriolis**” utilizando la combinación de la aceleración centrífuga producidas por un rotor giratorio (5000 ciclos), ambas pruebas permiten que los sólidos impacten sobre una superficie de prueba. Una

tercera prueba fue emplear el método del **“Probador Miller”** para medir la abrasividad de la pulpa. Finalmente concluyen que para el transporte de pulpa el modo de desgaste más común causado por la pulpa es la erosión, el hierro fundido blanco en alto cromo, cubiertas de carburo de cromo y carburo de tungsteno son excelentes para resistir el desgaste y que los elastómeros tienen una excelente resistencia al desgaste abrasivo o erosivo a raíz de su excelente resiliencia para absorber la deformación plástica.

Tarodiya & Bhupendra (2016), evaluaron el desgaste en las bombas centrífugas de pulpa por los fenómenos de cavitación, corrosión, erosión y decapado, también estudiaron su efecto sobre el rendimiento hidráulico de la bomba por **“el método de desgaste por pintura”** el cual implica la medición de la reducción en el espesor de la pared, la pérdida de peso de los componentes individuales o de los pedazos de desgaste fijos dentro de la bomba. El **“método de desgaste de impacto y deslizamiento de partículas”** los autores emplearon el modelamiento de elementos finitos de una caja de bomba tri- dimensional para analizar el desgaste uniforme. **“Tarodiya & Bhupendra” (2016)** concluyen que el máximo desgaste ocurre en la sección del corte de agua, exceso de vibración y alta corriente del motor. Al incrementar el tamaño de partícula, el desgaste se ve afectado en el lado de presión del álabe y con el incremento de caudal, el desgaste es mayor a la salida de la bomba, el carburo de tungsteno cementado (K-703) mostró la menor reducción en rendimiento, exceso de vibración, alta corriente del motor y reducción en rendimiento. Las conclusiones finales durante la operación de campo actual, indica que el desgaste de los componentes afecta la hidráulica de la bomba y la velocidad de desgaste.

Camello, Reyes, Della, Ferraresso & Carvajal (2016), evaluaron la resistencia a la corrosión y abrasión de tres tipos de recubrimientos de polímeros depositados por pulverización de flama.

Estos polímeros fueron empleados como recubrimientos en muestras de acero al carbono de AISI 1020 para corrosión y para prueba de desgaste de erosión de pulpa; las adhesiones de estos polímeros fueron por precalentamiento a 230 °C. Las pruebas de erosión fueron llevadas a cabo en un probador de pulpa tipo plato a ángulos de impacto de 30° - 90°, el mineral empleado fue cuarzo con un diámetro promedio de 300 µm y 55 % en peso, la velocidad de impacto fue de 4.15 m/segundo, pérdida de peso en un tiempo total de 360 minutos.

De acuerdo al presente estudio el revestimiento de muestras de acero con polímeros **PEI, PEEK, y PA 12** (poliamida 12) empleando polvo de polímero difundido a temperatura, es una alternativa de revestimiento viable para evitar los desgastes erosivos a un impacto de 90° y protección por corrosión de los metales.

Mukhopadhyay (2016), investiga sobre el caucho EPDM (etileno propilen-dieno monómero) para las mayores aplicaciones de ingeniería, su mayor propiedad es su comportamiento sobresaliente en la resistencia al calor, ozono, y ambiente, es muy empleado en la fabricación de sellos. El autor efectúa una evaluación de la fricción y desgaste por deslizamiento en frente a los aceros bajo condición de trabajo seco. Logra diferentes durezas para el EPDM agregando diferentes partes por millón de carbón negro, las pruebas se efectuaron en un probador tribológico, a diferentes durezas de 55,70 y 85 A frente a una barra de acero inoxidable EN-8, los experimentos han sido efectuados con diferentes velocidades rotacionales y a una carga constante de 25 Newton por 9000 segundos. Los resultados obtenidos indican

la existencia de ondas formadas durante el deslizamiento para todas las muestras, con la disminución de las crestas de las ondas, la dureza aumenta, el polímero con una dureza de 85 A falla mayormente por la formación masiva de grietas sobre la superficie inclusive a bajos rpm, sin embargo, el desgaste disminuye al adicionar más carbón negro.

Chandrasekaran (2017), investigando define las diversas aplicaciones de los elastómeros como revestimientos en plantas industriales y transporte, dependiendo del tipo de solución (ácida o básica), vapor, pulpas de mineral ácido o neutro.

Las aplicaciones exactas de los elastómeros en el sector industrial reducirán los costos de fabricación de tanques, y equipos, evitarán la contaminación del medio ambiente y riesgos de accidentes.

El caucho natural y polysopreno son usados mayormente para aplicaciones como desgaste abrasivo, pero sin mayor tracción química, los cauchos chlorobutyl, bromobutyl y butyl son de alta resistencia al vapor, difusión de dióxido de azufre y ácido clorhídrico. Todos tienen una buena resistencia al desgaste. Para plantas de tratamiento de minerales y tratamiento de efluentes, los revestimientos de caucho han sido empleados para la protección del desgaste por la abrasión. Los tanques deben estar protegidos contra la corrosión/erosión, los forros de caucho han sido exitosamente empleados.

Namdeo, Tiwari & Manepatil (2017), estudiaron la mezcla de varios polímeros para mejorar las propiedades del polímero base, la finalidad fue reducir la tensión interfacial y las nano partículas para mejorar la dureza y la adhesión entre ellos. Se emplea el polímero termoplástico HDPE y se modifica sus propiedades tales como esfuerzo de tracción, dureza, módulo de flexión, y propiedades tribológicas al ser mezclado con el polímero EVA, y nano arcilla, el cual es sometido a prueba de

desgaste por alto esfuerzo de acuerdo a la norma ASTM D 6037, para lo cual la muestra es colocada y presionada en una rueda rotatoria (50 mm de diámetro y 12 mm de ancho) a diferentes cargas desde 5,10 y 15 Newton deslizándose una distancia de 12 metros a 50°, en donde se aprecia que la pérdida de volumen incrementa desde 5 a 10 N y luego disminuye a 10 N, mientras que la velocidad específica de desgaste incrementa rápidamente de 5 a 10 Newton, la misma que decrece de 10 a 15 Newton, la máxima pérdida de volumen ocurre a una carga de 10 Newton. Estos resultados hallados son consistentes mediante la evaluación estadística de los datos empleando el análisis de ANOVA.

Mobley (2017), menciona que los materiales de construcción de las partes en contacto con la pulpa están en el rango de bronce a acero inoxidable, los cuales son seleccionados de acuerdo a los requerimientos particulares de la aplicación, los impulsores son empleados para medios de aplicaciones de velocidad media a alta donde la viscosidad es relativamente baja, los álabes son empleados a baja velocidad, y alta viscosidad. Asimismo, Mobley (2017) indica que los modos de falla más comunes afectan la confiabilidad y rendimiento los cuales son causados por instalación inadecuada o variaciones en las propiedades de los productos. Si los álabes están colocados demasiado cerca al lado, esquina, o fondo del tanque, una zona de peso muerto será formada, el cual causa pérdidas en la eficiencia de la mezcla y daño prematuro del equipo. Si los álabes están colocados cerca del nivel del líquido, se forma un vórtice, lo cual causara pérdida de la eficiencia y un acelerado desgaste de los componentes. Con las variaciones de las propiedades físicas de la pulpa, tal como viscosidad, causarán pérdida de la eficiencia de mezclado y desgaste prematuro de los componentes del agitador.

Jean-Fulcrand, Masen, Bremmen & Wong (2017), estudian la aplicación tribológica de los polímeros de alto rendimiento tales como la polybenzimidazole (PBI), el cual puede reemplazar los componentes metálicos en algunas condiciones de alta temperatura donde la lubricación es imposible. Las pruebas para estudiar las propiedades tribológicas del polímero PBI se examinaron con un disco de PBI alrededor de una bola de acero calentado a 280 °C y sometido a altas cargas y velocidades a altas condiciones de deslizamiento. El coeficiente de fricción seca es relativamente bajo y decrece con el incremento de la carga aplicada. Asimismo, indica que la alta presión y temperatura en las zonas de contacto de ambas promueve la remoción y la subsecuente formación de una capa de transferencia muy delgada sobre la contracara del acero, también se forma hidróxido ferroso en esta zona de contacto con altas cargas, la cantidad de desgaste y el mecanismo de desgaste dominante del disco de PBI dependen de la carga, a bajas cargas de contacto y bajas temperaturas de contacto se forma una capa gruesa sobre la superficie del acero, y a altas cargas de contacto y altas temperaturas, en el contacto entre la bola-disco se forma una capa delgada de polímero debido a la constante remoción y regeneración del mismo.

Ludema & Ajayi (2019), indican que las variables necesarias para considerar en pruebas de desgaste resumidamente son la forma de contacto, vibración del sistema, el ciclo de trabajo y el tiempo. Ludema & Ajayi (2019) investigan sobre la medición de los coeficientes del desgaste, desgaste y la duración de la prueba incluye la distancia unitaria del deslizamiento/volumen de desgaste, pérdida de peso/unidad de tiempo, ancho del área de desgaste/distancia unitaria de deslizamiento. Los principios del desgaste del caucho se deben a dos mecanismos desgarramiento y fatiga, la falla o fractura ocurre a $\frac{1}{4}$ de ciclo de la ejecución de fatiga. La

fricción se establece ser una fricción en una zona local. También en el caucho, el desgaste es virtualmente por abrasión. La escala de tamaños de los fragmentos de desgaste está en rangos de micrones a milímetros.

El mecanismo de desgarro ocurre por el deslizamiento sobre una superficie áspera.

El mecanismo de fatiga ocurre cuando el caucho se desliza sobre superficies onduladas sin protuberancias afiladas. Durante la falla por fatiga del caucho, es fracturado a intervalos regulares y la fractura se extiende bajo un ángulo de 15° desde la superficie en la dirección del deslizamiento.

Capítulo II: Descripción de la Realidad Problemática

Desde los años 2016 al 2017, la Empresa Minera del Centro tiene una producción de 130 ton/día, tiene una ley de manganeso que disminuye de 25 % a 5% debido al cambio de la mineralogía y la producción en general decrece en un 10% en 1 día.

Adicionalmente, uno de los equipos de agitación para este proceso de lixiviación ácida tiene continuas fallas en fuga de refrigerante de los sellos, vibraciones continuas del reductor de velocidad y motor, doblado del eje, desgaste prematuro de los revestimientos de neopreno de los álabes y del reactor, ataque ácido a los pernos de los álabes, consecuentemente un álabe se suelta del impulsor, ataque ácido en la base de sujeción de los álabes del eje, fuga de gases de reacción al medio ambiente (gases como ácido sulfhídrico y sulfúrico - problema ambiental).

Cada reactor cerrado posee 4 agitadores trabajando en serie, en el cual de fallar uno de ellos por los fenómenos explicados anteriormente produciría las siguientes fallas:

- 1) Posible asentamiento de la pulpa en el compartimento del reactor, en donde se ubica el agitador que ha fallado.
- 2) Debido a que los agitadores están insertados dentro del reactor cerrado y sometidos a una operación continua de 24 horas, se producirán gases de ácido sulfhídrico, anhídrido sulfuroso en los compartimentos dado a que no se puede sacar el agitador para efectuar el mantenimiento correctivo.
- 3) Si un agitador en operación falla debido a que uno o todos sus álabes se sueltan por abrasión, la única forma que siga operando en vacío será empleando el líquido refrigerante en el sello, lo cual sería imposible dado que se elevaría el

amperaje del agitador, por consiguiente, se pararía automáticamente el equipo, cada agitador recibe la pulpa descargada del agitador anterior.

4) La paralización de un agitador conllevaría a tener altos costos por mantenimiento, dado que tendría que pararse la planta, y esperar ocho horas a que todos los gases tóxicos de la reacción sean extraídos, asimismo, el mantenimiento correctivo sería de 3 horas aproximadamente tomando en cuenta el izaje del agitador, inspección, mantenimiento preventivo y correctivo no sólo de la unidad en cuestión, sino de los 4 agitadores.

Debido a las fallas por el elevado desgaste de los revestimientos en neopreno y por consiguiente los álabes, los costos por reposición de estas partes llegan a ser 77,100 US\$ por año, teniendo en cuenta que un agitador cuesta alrededor de 130,000 US\$ lo cual implica un 60% de su precio, elevándose así los costos de mantenimiento y reduciéndose la efectividad de los agitadores.

2.1 Formulación del Problema

2.1.1 Problema General

¿De qué manera la evaluación del revestimiento de polímeros sobre los álabes contribuirá con la reducción de fallas de los agitadores?

2.1.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo influye el tipo de polímero en la reducción del desgaste en los álabes?
- ¿En qué medida el tipo de polímero empleado optimizará el tiempo de vida útil del agitador de alta intensidad?
- ¿Qué efecto tendrá el empleo de un álabe con revestimiento más resistente al desgaste con respecto a los costos?

2.2 Justificación e Importancia de la Investigación

- El estudio del desgaste prematuro de los álabes de los agitadores de alta intensidad operando en los reactores de lixiviación de plata-manganeso es necesario ser estudiado para beneficiar a la **Compañía Minera del Centro del Perú**, en tal forma de reducir los costos operativos (OPEX) debido al impacto sobre la producción de los cristales de manganeso y plata al final del proceso productivo, dado que una paralización de uno o más de los agitadores reducirán el tiempo de lixiviación, por consiguiente menor producción de cristales de manganeso, ocasionando pérdidas económicas considerables en la producción diaria.
- La reducción de costos de repuestos por la investigación del desgaste de las partes de un agitador en contacto con una pulpa de mineral muy abrasiva y corrosiva debido al ácido sulfúrico diluido al 10%, adicionalmente un mineral de ganga compuesto de yeso (sulfato de calcio) el cual al reaccionar con el ácido forma incrustaciones que deterioran más los revestimientos de los álabes.
- El presente estudio permitirá analizar el comportamiento de los 5 polímeros afectados bajo los fenómenos de corrosión (ácido), abrasión y abrasión-corrosión (tribología por la pulpa ácida).
- El presente trabajo permitirá encontrar el tipo de revestimiento más adecuado en los álabes para ser empleado en la lixiviación ácida del mineral plata-manganeso.
- La presente evaluación permitirá efectuar un análisis más exacto del desgaste por el empleo del modelo estadístico de Weibull y función acumulativa.
- Obtener un producto o cristales de manganeso y plata de mejor calidad (ley) y menos contaminantes que permita ser vendidos al mercado internacional a un buen precio.

- Mejorar el nivel profesional del personal de mantenimiento con el conocimiento de nuevos tipos de revestimientos sobre todo en las partes del agitador en contacto con la pulpa ácida.

2.3 Objetivos, hipótesis variables e indicadores

2.3.1 Objetivo General

- Evaluar el revestimiento de polímeros sobre los álabes de los agitadores de alta intensidad para reducir las fallas por abrasión-corrosión producidos por el contacto con la pulpa ácida durante la agitación.

2.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar el tipo de polímero que permitirá un menor desgaste en los álabes a nivel de laboratorio.
- Optimizar el tiempo de vida útil del agitador de alta intensidad.
- Determinar el efecto que tendrá el empleo de un álabe con revestimiento más resistente al desgaste con respecto a los costos.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

- La evaluación del revestimiento de polímeros sobre los álabes de los agitadores de alta intensidad permitirá reducir las fallas por desgaste.

2.4.2 Hipótesis Específicas

- La identificación del tipo de polímero de menor desgaste en estudio permitirá conocer la durabilidad de los álabes.
- Se optimizará el tiempo de vida útil del agitador de alta intensidad.

- Se va determinar el efecto que tendrá el empleo de un álabe con revestimiento más resistente al desgaste con respecto a los costos.

2.5 Variables e indicadores

2.5.1 Variable Independiente

- Evaluación en pruebas de laboratorio de los revestimientos de polímeros sobre los álabes de los agitadores de alta intensidad.

Indicadores de la gestión de variable independiente

- Velocidad de desgaste de los polímeros (erosión, abrasión, y corrosión).
- Probabilidad de falla por la pérdida de las propiedades los polímeros debido a la alta acidez de la pulpa.
- Análisis de fallas (**Weibull**) para definir el mejor polímero que resista la degradación durante la agitación.

2.5.2 Variable Dependiente

- Reducción de las fallas de los agitadores de alta intensidad en la planta de lixiviación de manganeso – plata.

Indicadores de la gestión variable dependiente

- Mejorar la rentabilidad y productividad de la empresa.
- Reducir los costos de mantenimiento.
- Mejorar el nivel técnico del personal de mantenimiento.

2.6. Metodología de Investigación

Agitador de alta intensidad de la planta de lixiviación de manganeso – plata,
Empresa Minera del Centro del Perú.

2.6.1 Tipo y Nivel de la Investigación

Tipo de investigación:

Experimental

Nivel de investigación:

Análisis y explicativo.

2.6.2 Periodo de Análisis

- Año 2019-2020.

2.6.3 Fuentes de información e Instrumentos empleados

Fuente de Información Primaria:

- Tesis.
- Órdenes de trabajo.
- Reporte de producción y mantenimiento.
- Registro de incidencia.
- Control de inventario de repuestos.
- Manuales de mantenimiento y operación.

Fuente de Información Secundaria:

- Órdenes de trabajo.
- Artículos indexados y publicaciones técnicas.
- Reportes de mantenimiento de fallas.
- Registro de Incidencia.
- Control de inventario de repuestos.
- Reportes de pruebas preliminares de laboratorio.

2.6.4 Técnicas de Recolección y Procesamiento de Datos

- Estadística de las partes desgastadas durante la operación y parada de la planta.
- Inspección y reportes obtenidos durante parada de mantenimiento.
- Pruebas de laboratorio.

Capítulo III: Marco Teórico

3.1 Fundamentos Teóricos

3.1.1 Distribución de Weibull aplicado a la aproximación Estadística del Proceso de Falla

FUKUMORI & KURAUCHI (1984), investigan la fatiga estática de los cauchos vulcanizados, determinando la función de distribución del tiempo de vida y la observación de la superficie de fractura que aparecieron durante el desgaste. Asimismo, indican que hay muchas imperfecciones preexistentes distribuidas al azar en el caucho vulcanizado, las cuales, sin importar el número de imperfecciones, el polímero caerá en un estado crítico y producirá una grieta, la cual se propagará instantáneamente a través de todo el cuerpo causando una falla del sólido por el esfuerzo sobre su volumen más débil. Proponen la siguiente ecuación experimentalmente probada para vulcanizados:

$$\mathbf{f(t)} = \mu \mathbf{o} \times \exp(-\mu \mathbf{o} t) \quad (1)$$

t = tiempo $\mu \mathbf{o}$ = constante $\mathbf{f(t)}$ = función densidad de probabilidad del tiempo de vida

Para vulcanizados de carbón reforzado, la función de la densidad de la probabilidad del tiempo de vida, $f(t)$ se expresa de la siguiente manera:

$$\mathbf{f(t)} = \frac{1}{\Gamma(v)} \times \mu \mathbf{o}^v \times t^{v-1} \times \exp(-\mu \mathbf{o} t) \quad (2)$$

v = número de grietas t = tiempo $\Gamma(v)$ = Función lambda

La distribución estadística del tiempo de vida se puede obtener como la distribución del valor más pequeño de la distribución inicial $f_0(t)$ que es la distribución gamma en

los lugares en donde $n > 1$, entonces la probabilidad de supervivencia $R(t)$ se obtiene como sigue:

$$R(t) = e^{-\eta \int f_0(t) dt} \quad (3)$$

η son los sitios múltiples en los cuales las fallas pueden ocurrir.

Asimismo, indican que la función de la probabilidad de densidad, $f(t)$ es obtenida como sigue:

$$f(t) = \frac{1}{\beta} e^{-\left(\frac{t}{\beta}\right)} \quad (4)$$

β es constante.

3.1.2 Procedimiento Experimental

Materiales

Los materiales empleados para la prueba son acrilonitrilo – caucho butadieno vulcanizado (NBR) y vulcanizado de carbón reforzado NBR. La composición de los especímenes y las condiciones de vulcanización se muestran en la **Tabla 1**. Los especímenes se colocan en unos anillos de prueba y son empujados fuera de la lámina moldeada a compresión de 1 ó 2 mm de espesor. Las dimensiones de estos son mostradas en la **Tabla 2**.

Tabla 1

Composición de los Especímenes y la Condición de la vulcanización.

Simbolo	SP-NBR	SC-NBR
NBR (AN=33%)	100 phr	100 phr
ZnO	5	5
St. acid	1	1
Carbon (SRF)	-	40
S	1.5	1.5
Acelerador	1	1

Fuente: Fukumori & Kurauchi (1984)

Tabla 2*Dimensiones del Espécimen*

	Diametro (mm)		Volumen (mm ³)
	Exterior	Interior	
SP-NBR	22.0	19.0	169.3
SC-NBR	20.0	18.6	35.0

Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Medida del tiempo de Vida, t_B

Los experimentos de fatiga estatica fueron llevados a cabo a 23° C . La **Figura 2** muestra los diagramas esquemáticos de la medida del tiempo de vida t_B . En la **Figura 1**, en un experimento de deslizamiento, una carga constante o esfuerzo constante, σ_e , fue aplicado a un espécimen con el uso de una carga muerta. Un espécimen fue mantenido a un ratio de estiramiento constante, λ . La medida del tiempo de vida, t_B , fue efectuada en 20 especímenes bajo condiciones de prueba cada uno.

Observacion de las superficies de la fractura

Las superficies de la fractura de los especímenes fueron observados con un microscopio electrónico de escaneo (SEM).

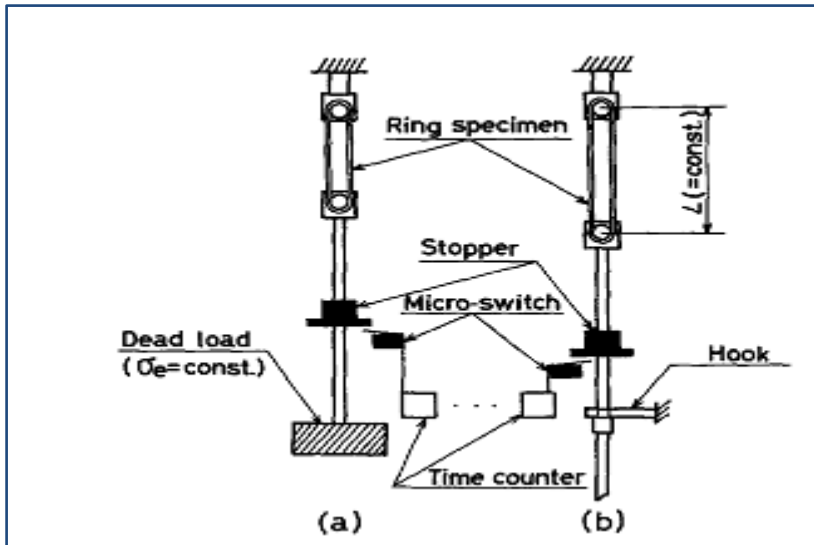
Resultados – Ploteo de la Distribución de Weibull del tiempo de vida, t_B

La ecuación de Distribución de Weibull que expresa la distribución del tiempo de vida para caucho vulcanizado es la siguiente :

$$\ln \left[\frac{-\ln(N+1)}{N+1-i} \right] = m \ln t_i - m \ln \beta \quad (5)$$

Figura 1

Diagrama del aparato empleado para medir el tiempo de vida (a) arrastre y (b) relajación del stress.

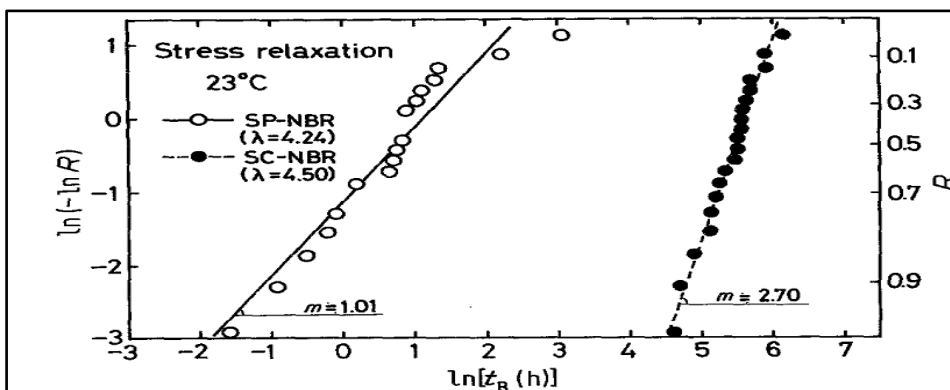


Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Para los cauchos naturales SP -NBR y SC NBR (especificaciones en la **Tabla 2**) efectuando las pruebas se obtuvo el siguiente gráfico (Tiempo de vida útil versus probabilidad de supervivencia) de la Figura 2 como sigue :

Figura 2

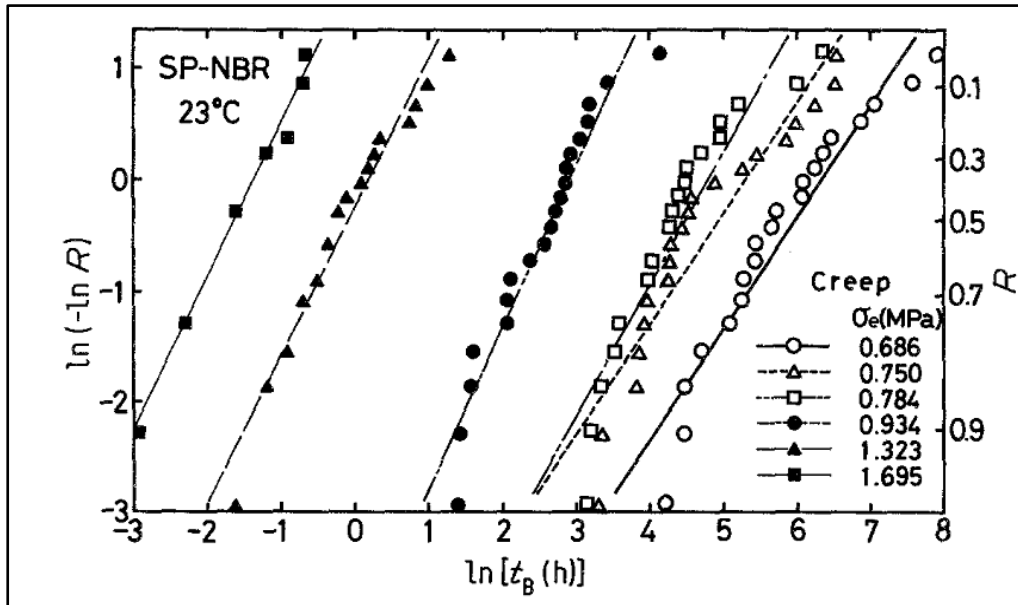
Ploteo típico de la distribución del tiempo de vida t_B versus probabilidad de supervivencia para pruebas de esfuerzo (caucho SP-NBR & SC-NBR)



Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Figura 3

Ploteo típico de la distribución del tiempo de Vida t_B versus probabilidad de supervivencia para pruebas de cizallamiento (Caucho SP-NBR)



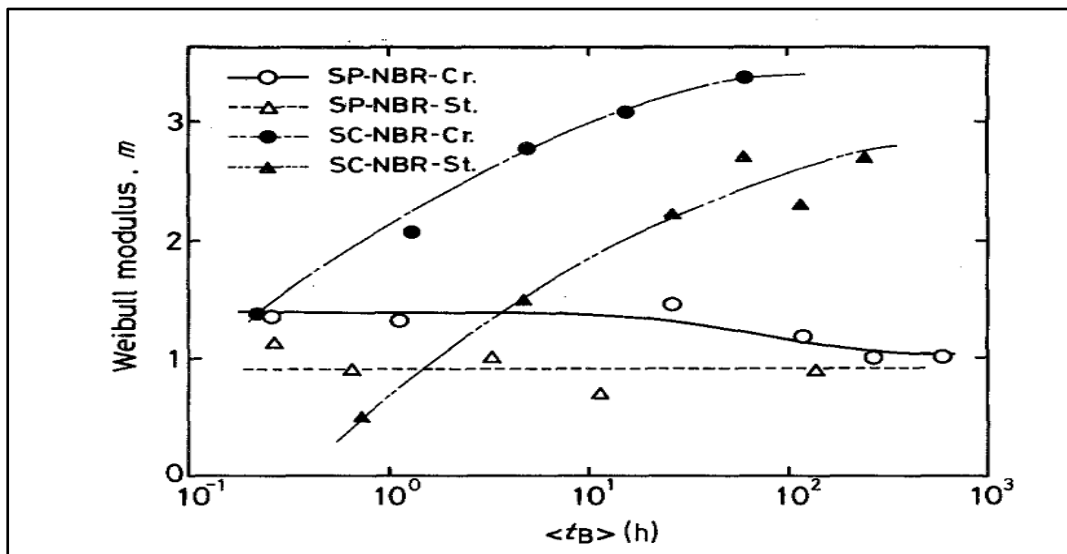
Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

De la **Figura 2 & 3**, se deduce que la probabilidad de falla se mantiene constante en cualquier tiempo.

En la siguiente **Figura 4**, concluye que para el tiempo de Vida (t_B) $> 10^2$ horas que ambos procesos de desgaste por cizallamiento y esfuerzo se comportan similarmente en el comportamiento de falla.

Figura 4

Tiempo de Vida t_B vs Modulo de Weibull



Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Superficie de Fractura

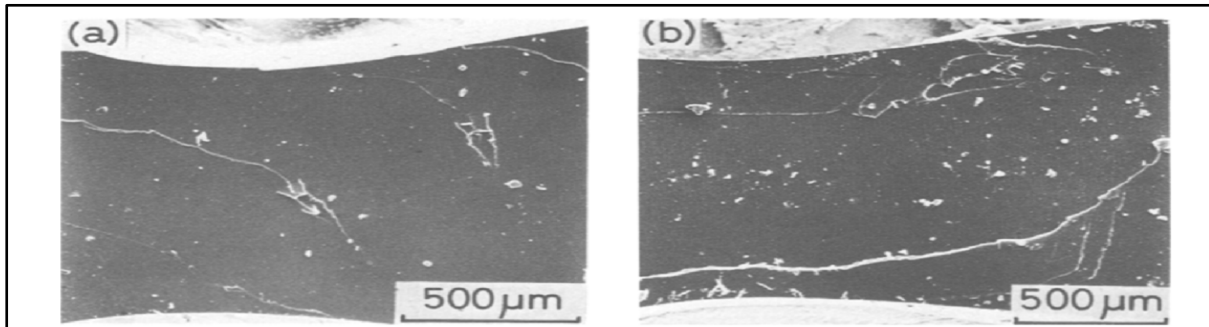
Para la **Figura 5 a** (experimento de desgaste por deslizamiento) y **Figura 5b** (experimento de desgaste por esfuerzo) muestran las características de la fractura por fragilidad. La fractura por fragilidad atraviesa la matriz y deja algunos patrones de hendidura, donde hay algunas heterogeneidades en el material.

En las superficies de fracturas suaves, cualquier comienzo de trazas evidentes pueden ser difícilmente reconocidos, por lo tanto puede propagarse inestablemente a lo largo de la parte frontal. En el vulcanizado puro, una grieta crítica puede propagarse inestablemente y el comportamiento de la falla puede ser al azar.

Figura 5

Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de fractura de SP-NBR

(a) Por arrastre y (b) relajación del stress



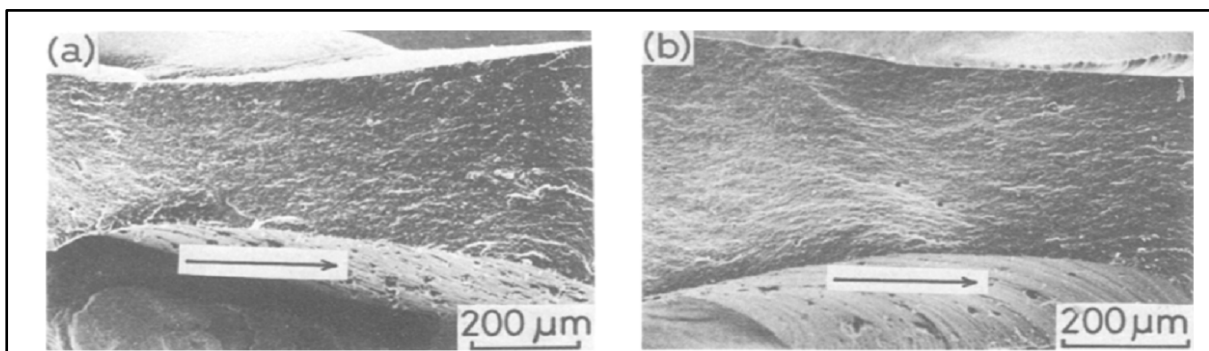
Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

En las **Figuras 6 y 7** muestras las superficies fracturadas de **SC-NBR** por deslizamiento y esfuerzo. Estas características de las superficies de fractura evidentemente difiere de aquellos del **SP-NBR**. La presencia de las partículas negras de carbón producen grietas estables o interrumpe la propagación de la grieta inestable.

Figura 6

Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de SC-NBR

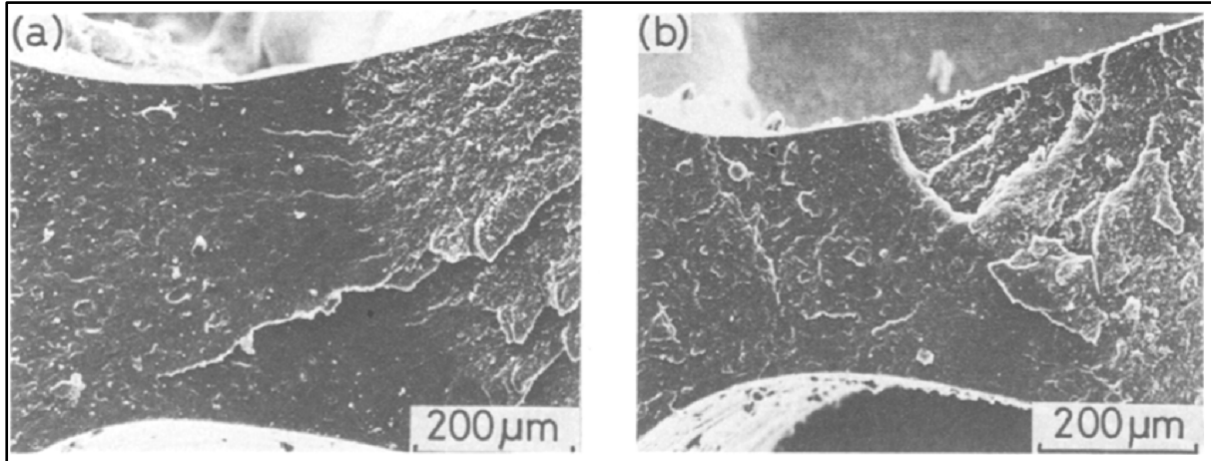
(a) Por arrastre y (b) relajación del stress



Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Figura 7

Microfotografía de escaneo electrónico de las superficies de fractura de SC-NBR (falla a corto término)- (a) arrastre y (b) relajación de stress.



Fuente: Fukumori & Karauchi (1984)

Se concluye de la **Figura 7 a** (falla por deslizamiento) que la falla es de corto término, o a niveles altos de esfuerzo, las partículas de carbón negro pueden ser incapaces de interrumpir la propagación de la grieta inestable, en contraste con la falla a largo término.

Discusión

Dependencia del tiempo de vida medio (t_B) sobre el esfuerzo verdadero aplicado σ_t .

Su ecuación es como sigue :

$$\mu(t) = VC(t)[\sigma_t(t)]^\eta \quad (6)$$

$\mu(t)$ = velocidad de la falla.

η = Constante dependiente del material.

V = volumen del espécimen sometido a esfuerzo.

$C(t)$ = función representa la dependencia de la longitud de la grieta.

Efecto de la viscoelasticidad sobre la distribución del tiempo de vida útil, t_B

El comportamiento mecánico del caucho vulcanizado en los procesos de deslizamiento y el esfuerzo se aproximan de acuerdo a las siguientes fórmulas :

$$\Lambda = \lambda^0 t^{Kc} \quad \text{falla por deslizamiento} \quad (7)$$

$$\sigma_e(t) = \sigma_0 t^{-Kc} \quad \text{falla por esfuerzo} \quad (8)$$

Conclusiones

1. En un caucho puro vulcanizado ocurre la propagación rápida de una grieta, en el cual una grieta o microgrieta ocurre a un tamaño crítico.
2. En un caucho vulcanizado reforzado con carbón, el comportamiento de la falla depende del esfuerzo. En este caso, las multigrietas juegan un rol muy importante.

3.1.3 Fundamentos Teóricos de la durabilidad del contacto caucho/metal con absorción de agua

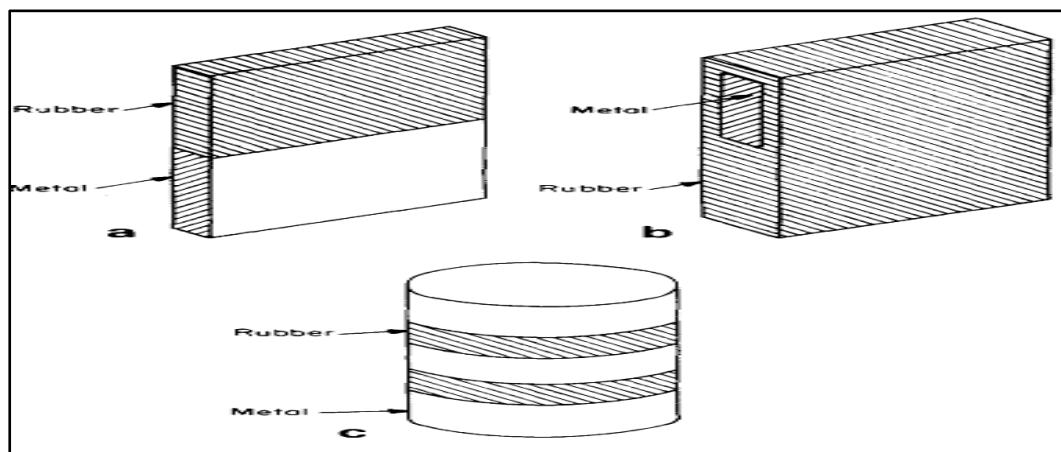
Stevenson (1984), indica que un estudio de la durabilidad del contacto entre caucho/metal se describe empleando caucho natural, policloropreno y acrilonitrilo revistiendo una superficie de acero al carbono o titanio. Los resultados presentan el efecto de la adsorción del agua por el caucho en el módulo elástico, velocidad de crecimiento de la falla por fatiga, energía y áreas de fallas interfaciales de tres diferentes diseños de piezas para prueba en laboratorio. Se descubrió que, aunque en las condiciones inertes electroquímicas los enlaces caucho/metal probaron alta durabilidad, los revestimientos de caucho fueron encontrados de alta efectividad general, ningún efecto seriamente adverso sobre el caucho mismo.

Se efectuaron pruebas de corrosión dentro de un tanque conteniendo agua de mar, colocando especímenes de forma cilíndrica, cambiando las condiciones

electroquímicas introduciendo conexiones eléctricas entre una barra grande de zinc y piezas de acero denominados del tipo C como se muestra en la siguiente Figura 8:

Figura 8

Conexiones eléctricas entre una barra grande de zinc y piezas de acero denominados de acuerdo al tipo.



Fuente: Stevenson (1984)

Asimismo, los polímeros probados son como sigue:

Tabla 3

Composición del caucho vulcanizado estudiado

Vulcanizado	Composición (expresados como partes por cien de caucho por peso)
A	Caucho natural SMR-CV60; óxido de zinc,5; ácido estearico,2; carbón negro SRF,45; aceite de proceso Fina 2059,5; antioxidante Flectol H,3; cera antiozonante mejorado a prueba del sol, azufre,2.5; acelerador CBS, 0.7
B	Caucho natural deproteínizado, 100; cualquier otro tal como vulcanizado A
C	Neopreno WRT,80, neopreno GRT,20; magnesio, 4; Neozono A, 2; Akroflex CD,3; ácido esteárico, 0.5; Negro SAF, 20; oleato butyl, 8; óxido de zinc, 5; Thiuram M, 07; NA-22 (thiourea etileno),0.7
D	Neopreno WRT, 100; difenilamina octilato, 4; antiozonante Wingstay 100, 1; ácido estearico, 0.5; plomo rojo kenmix (dispersión del 90% del plomo rojo), 20; talco laminar (vapores Mistron), 40; carbón negro N660, 20; polietileno AC 617A (polietileno de bajo peso molecular), 2; aceite aromático Sundex 795, 8; TMTMS, 2; azufre, 1.
E	Hycar 1042, 100; carbón negro ISAF 60; aceite DOP, 10; MBT, 0.7; antioxidante Santoflex 13, 2; cera antiozonante mejorado a prueba del sol, 1; óxido de zinc, 5; ácido estearico,1.

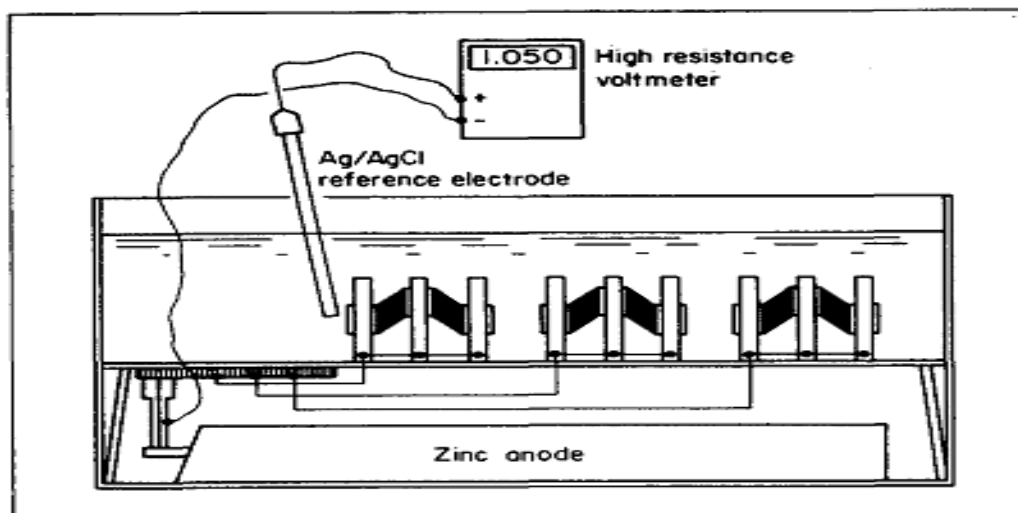
Fuente: Stevenson (1984)

Las piezas de prueba tipo **C** fueron los más adecuados para controlar las alteraciones en las condiciones electroquímicas que los tipos A y B. Las condiciones

electroquímicas fueron cambiadas introduciendo conexiones eléctricas entre una larga barra de zinc y las piezas de acero del tipo **C**, como se muestra en la siguiente Figura 9:

Figura 9

Experimental arrangement for type C test - pieces



Fuente: Stevenson (1984)

Todas las conexiones eléctricas y las superficies externas de las partes de sostenimiento de las piezas de prueba fueron cubiertas en material de aislamiento de polímero.

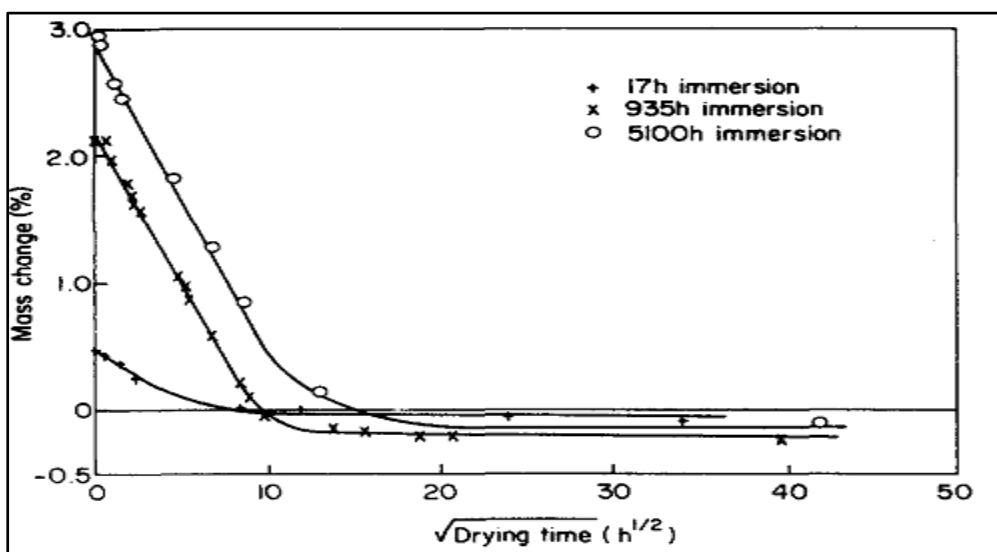
Igualmente, todas las piezas de prueba fueron expuestas a agua de mar sintética, preparadas de acuerdo con las especificaciones estándar ASTM para agua de mar sintético a las tres temperaturas; 3 °C, 23 °C, y 40-45° C. Las piezas de prueba fueron extraídas del medio de prueba corrosivo y sometido a torsión en una máquina de prueba para causar falla.

La masa de las piezas de prueba fue medida en intervalos para determinar cualquier incremento debido a la absorción de agua por el caucho. Además, a intervalos de tiempo, las piezas de prueba fueron extraídas del tanque y se les permitió secar a

atmósfera en el laboratorio, la reducción en el peso fue medido en el tiempo t . El secado ocurre mucho más rápidamente que la absorción del agua, y una curva de secado típica se muestra en la siguiente Figura 10:

Figura 10

Curvas de secado para el caucho natural (vulcanizado) después de la exposición al agua de mar a 23 °C para varios tiempos



Fuente: Stevenson (1984)

La diferencia entre el peso final seco y el inicial da el peso de cualesquiera gradientes de pérdida "lixiviado" en el agua de mar. Este proceso de lixiviación ocurre a diferentes velocidades para diferentes compuestos y aparecen mayormente debido a la pérdida de antioxidantes del caucho.

El conocimiento de la velocidad de lixiviación permitió el aumento de la masa medida en el agua de mar para luego ser corregido y permita proveer los valores verdaderos de la absorción del agua, el cual se muestra en la Figura 10.

Efecto de la absorción del agua sobre el módulo del caucho

El Dr. Stevenson indica que las piezas de prueba de caucho natural sumergidas en agua de mar a 3°C, 23°C y 40°C no mostraron cambio significativo en el módulo de tensión/deformación después de 803 días de exposición al baño sumergido, sólo se muestra un incremento en el módulo elástico de 45% después de una exposición de 824 días. Este incremento se debe al envejecimiento del caucho a temperatura media, el agua en el tanque contiene 9 mg/lit de oxígeno y fue constantemente recirculado, pero no existe oxidación alguna.

El policloropreno curado con óxido de plomo, muestra un incremento en el módulo de 65% después de 735 días de exposición. Además, muestra un módulo mucho más grande que el policloropreno curado con Mg O / Zn O, el cual incrementa su módulo en 26%, ambos módulos aumentan de acuerdo al efecto térmico.

El Dr. Stevenson concluye que la durabilidad del revestimiento del caucho sobre el metal dependerá del medio electroquímico, el agua de mar no causa deterioro de cualesquiera de los cauchos investigados, se observa una falla leve por corrosión del acero debido alguna actividad local electroquímica (35% para el policloropreno), con una actividad fuertemente electroquímica creada al conectar los cátodos de carbón a un ánodo de sacrificio (con el agua de mar como electrolito) una falla relativamente rápida ocurrió, sin importar el tipo de caucho empleado y sin corrosión del acero, este proceso se llevó a cabo a temperatura moderada, la deformación en la capa de caucho no tuvo efecto significativo.

3.1.4 Tipos de Desgaste en la Industria Minero Metalúrgica

DAVIDSON (1992), indica que el desgaste es la razón primaria para las fallas de equipos como por ejemplo para bombas, que su respectiva reducción es el enfoque de la mayoría de las investigaciones en hidráulica y materiales relacionados al diseño de las bombas. Por ejemplo, las cargas radiales y de empuje sobre el impulsor pueden cambiar significativamente las partes en contacto con la pulpa debido al desgaste de ellas. Este tema debe ser considerado durante el diseño del eje, selección de rodamientos y diseño del sello primario.

Hay tres tipos fundamentales de interacción la cual da lugar al desgaste de bombas de pulpa:

DESGASTE POR DEFORMACIÓN debido al impacto de partículas a alto ángulo de contacto. El desgaste ocurre cuando los esfuerzos de impacto exceden el punto de elasticidad y producen su deformación. La penetración del material elastómero ocurre cuando la energía de la partícula es suficiente para rasgar permanentemente la superficie.

DESGASTE POR EROSIÓN ocurre cuando las partículas sólidas impactan el borde de la superficie direccionados con un ángulo bajo y tienden a deslizarse a través de la superficie. Si se excede el esfuerzo cortante del material, entonces el corte o una hendidura puede ocurrir. Si las partículas son redondas se formarán zonas acanaladas desplazando el material dúctil al borde de la ranura.

DESGASTE POR MOLIENDA se encuentran cuando las partículas sólidas llegan a estar atrapadas entre la superficie que se mueve adyacente una a otra. Las fuerzas de mordida sobre la partícula generan esfuerzos de corte y compresión, los cuales causan fallas por fragilidad o ductilidad. Adicionalmente, la fragmentación de la

partícula causará desgaste erosivo debido a la fricción que ocurre a muy bajo ángulo de contacto.

Asimismo, indica que la velocidad de desgaste depende de tres factores que se interrelacionan íntimamente, los cuales son:

- Características de la pulpa incluye las propiedades de las partículas tales como dureza, forma, tamaño y densidad y sus propiedades reológicas. La naturaleza del ángulo de contacto (ángulo y velocidad de contacto) está influenciado por la selección de la bomba y diseño hidráulico.
- Indica que los desgastes varían de un punto a otro en una bomba, las fallas de los componentes generalmente ocurren primero en zonas donde el desgaste por corte ocurre.

TAGGART (1954), encontró que el desgaste por impacto de mineral en los forros de los molinos, el caucho tipo goma puro es superior a cualquier composición vulcanizada, esta aplicación se probó con alimentos finos de mineral, velocidades de cascada, pequeñas bolas o cascajos, y pulpas densas.

Desgaste por Impacto (Erosión) Un resumen de una prueba en la Compañía CONSOLIDATED MIN. & SMELTING CO. –USA se muestra en la siguiente Tabla 4:

Tabla 4*Caucho versus Forro en Acero de un Molino cónico 8 Pies x 48*

	Forro de Molino	Forro de Caucho	
Velocidad del Molino	18.1	18.1	20.4
Toneladas Nuevas de Alimento por hora	98.2	96.0	99.4
Potencia Consumida (HP)	123.2	98.7	117.30
% Sólidos	76.1	77.8	76.8
% - malla 200 en el alimento	36.8	36.8	35.2
Toneladas – malla 200 producidas por hora	7.0	6.1	6.5
Toneladas – malla 200 producidas por hp-hora	0.058	0.062	0.065

Fuente: Arthur Taggart, (1954)

El consumo de potencia del molino indica un bajo valor con respecto a los forros de caucho y se ve una caída de producción en la fracción – malla 200 lo cual es proporcional a la caída de la potencia. Los forros afectan a la potencia, pero ningún dato comparativo sobre el desgaste es disponible, pero los indicativos muestran que el tiempo de duración del caucho, asumiendo que el forro no colapsa no es suficientemente grande que el desgaste por acero como para compensar la gran diferencia en precio. En un periodo de 20 años de trabajo se demuestra que el empleo de acero es superior que el de caucho.

La selección del forro se basa en la clase del medio de molienda, acción de la carga de bolas deseada, tamaño del alimento y producto, dureza y tenacidad del mineral, eficiencia y capacidad de molienda, disponibilidad de materiales y costos.

E.C FITCH (1992), indica que los procesos de desgaste dependen de la presencia de partículas de materia en el fluido, los cuales influenciarán en un desgaste por partícula.

Dos mecanismos específicos que pueden degradar la superficie húmeda de un compuesto y producir este tipo de desgaste son los siguientes:

- Abrasión por tres cuerpos – partículas presionadas entre dos superficies deslizantes.
- Erosión por impacto de partícula – alta velocidad, partículas que ingresan al fluido dirigidos a una superficie específica.

Un grupo de partículas pueden crear interferencia mecánica que ocasionan falla por movimiento. Las partículas o fibras atrapadas en los bordes de los fluxómetros, o en orificios de control, producen un bloqueo por estos contaminantes.

Tres tipos de obstrucciones ocurren como siguen:

- Atascamiento estático o tipo puente.
- Bloqueo dinámico.
- Bloqueo cortante (cizallante).

Cuando ciertos tipos de sustancias (como por ejemplo cobre, y acero) son ingresados en el fluido, estas sustancias frecuentemente sirven como catalizadores e incrementan la velocidad de deterioro de ambos; el fluido y la superficie de contacto. Tal actividad resulta en la formación de productos de reacción sólida, depósitos y ácidos los cuales pueden causar que los elementos del sistema se obstruyan, formen moho y corrosión.

3.1.5 Formas y Tamaño de partícula

Las partículas inorgánicas son básicamente irregulares en la forma, pero normalmente poseen características que reflejan su origen, modo de generación y exposición antes que ocurra la interacción. El técnico puede determinar el tamaño de una partícula midiendo el tamaño que mejor describe la distribución de tamaños de partículas. Para una partícula esférica, el diámetro es ese único tamaño, mientras que otras partículas de forma regular tienen dimensiones igualmente apropiadas. Desafortunadamente, partículas naturales raramente poseen formas regulares, especialmente esferas.

El término tamaño de partícula tiene significado para partículas regularmente formadas, pero es básicamente insignificante para partículas de forma irregular. Afortunadamente, cuando un técnico dimensiona un número estadísticamente significativo de partículas en exactamente la misma manera, el parámetro particular de medida o diámetro empleado llega a ser menos importante. Por lo tanto, el diámetro de una partícula de tamaño irregular es una dimensión arbitraria o dimensiones definidas en algunas maneras preferidas que ganan valor sólo cuando se aplican a un gran número de partículas en orientación al azar. Tales diámetros se denominan "Diámetros Estadísticos".

Para propósitos pragmáticos, el diámetro más grande de partícula (la longitud máxima total de partícula) universalmente representa la dimensión estándar para las partículas de tamaño irregulares. El diámetro más grande no es sólo la dimensión más conveniente para la clasificación de partículas, pero esta dimensión es además empleada en varias especificaciones y estándares para describir los niveles de

limpieza. La mayoría de ingenieros están de acuerdo en emplear el diámetro más grande para una dimensión estándar que muestra la apreciación objetiva para la verdadera naturaleza dimensional de partículas inorgánicas que requieren poca interpretación.

3.1.6 Distribución del tamaño de partícula

La estabilidad por contaminación por partículas reside en la distribución del tamaño de partículas que ingresan al fluido del sistema. La distribución del tamaño de partícula relaciona la concentración de las partículas al tamaño de partícula para un rango completo de tamaños. Los técnicos generalmente miden la población crítica de tamaños de partículas para determinar la severidad de la contaminación de partículas.

Para los procesos de molienda que ocurren con carga circulante causan este sesgado cuando los procesos reducen constantemente el tamaño de las partículas más grandes. La distribución de tamaño resultante es una distribución normal logarítmica conocida como **Distribución Rosin-Rammler**.

Para estabilizar la contaminación y actividades de control, los técnicos emplean la distribución de tamaño de partícula acumulativo.

3.1.7 Contaminante Fluido: Agua

Los fluidos en los minerales base pueden ser tan destructivos a la operación y a la vida de un sistema mecánico tipo fluido tanto como las partículas contaminantes. Desafortunadamente, el agua, a raíz de su afinidad natural a la mayoría de líquidos,

está siempre presente en los fluidos de sistema. El agua puede estar presente en su forma libre, disuelta en el fluido o en una forma de combinación tal como los siguientes:

- Emulsificador – gotas finas
- Suspendida – gotas de ingreso
- Precipitado – glóbulos.

El agua frecuentemente tiene un efecto devastador sobre el fluido y aditivos. El agua en la presencia del calor y oxígeno reacciona con casi todo presente:

- Inhibidores de oxidación para formar precipitados y ácidos.
- Inhibidores de óxidos para crear depósitos sobre las superficies internas.
- Cadenas moleculares largas (optimizadores de viscosidad) para formar una película polimérica.
- Aditivos anti -desgaste para formar sulfuro de hidrógeno y ácido sulfúrico.
- Hidrocarburos de cadenas largas que causan la solubilización del agua para formar geles los cuales bloquean los filtros, orificios, y espacios de luz.

Los efectos más comunes del agua sobre el sistema mecánico en el fluido producen corrosión y oxido. Dado a que el vapor de agua es significativamente elevado, su presencia puede causar daños por cavitación. El agua se vaporiza en regiones de baja presión y cuando las burbujas de agua colapsan cerca de la superficie, ocurre falla por fatiga. Las burbujas de cavitación implosionan cuando pasan por los sistemas de control tales como válvulas produciendo cortes tipo gusano en los orificios.

3.1.8 Estabilidad del Desgaste:

El desgaste de las superficies críticas dentro de los sistemas de mantenimiento resulta en las fallas tipo degradación. Primero, el desplazamiento no deseado o remoción del material superficial toma lugar por algún mecanismo de desgaste mecánico- mecánico, químico, eléctrico o por radiación. Tales resultados del desgaste de las condiciones de sobrecarga de la superficie. Las condiciones de sobrecarga que se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Superficie a superficie.**
- **Fluido a superficie.**
- **Tipo de desgaste de medio a superficie.**

Se identifica los siguientes modos de desgaste; abrasión, adhesión, fatiga superficial, deslaminado, corrosión por fricción, erosión, cavitación, hidrógeno inducido, electrocinética, y radiación.

Un modo de desgaste dado rara vez ocurre sin otro menos modo dominante que están involucrados. La frecuencia con la cual varios modos de desgaste ocurren en las situaciones industriales depende del equipo, medio y ciclo de trabajo. Sin embargo, un promedio de las muchas investigaciones muestra las siguientes frecuencias:

Abrasión.....	36%
Fatiga Superficial.....	15%
Adhesión.....	11%
Corrosión.....	9%
Corrosión por fricción.....	6%

Figura 11

Frecuencia de desgaste en las plantas industriales



Fuente: Arthur Taggart, (1954)

En el mantenimiento proactivo, el operador debe reconocer los factores que sobrecargan las superficies de los materiales de los componentes y que aceleran el proceso de desgaste. Adicionalmente, el operador debe conocer qué opciones son disponibles para reducir la velocidad de desgaste a un nivel que es medible con el tiempo de servicio deseado de la máquina. Por ejemplo, los técnicos pueden reducir o eliminar la abrasión por tres cuerpos disminuyendo el nivel de contaminación, reduciendo la carga de los rodamientos, y/o incrementando la viscosidad del aceite. El técnico puede minimizar o eliminar el desgaste por adhesión y la abrasión por dos cuerpos reduciendo la carga de los rodamientos, incrementando la velocidad, y/o empleando un fluido tipo anti desgaste. Similares elecciones u opciones pueden minimizar el desgaste de todos los 11 diferentes modos de desgaste. Estas técnicas son críticas en el mantenimiento proactivo porque la degradación del rendimiento sigue procesos de excesivos materiales de desgaste (degradación de material) y prevención de desgaste el cual es un paso delante de la falla incipiente y dos pasos delante de una falla inminente.

3.2 Equipos de Laboratorio de Pruebas y Procedimiento

Iwai & Nambu (1997), en sus estudios indican lo siguiente:

La Figura 12 muestra una vista esquemática del aparato de prueba. El cual consiste de varios elementos: un porta muestras, una boquilla para bombear el líquido de prueba, un tanque y un agitador para mezclar partículas sólidas en un líquido, un enfriador para mantener la temperatura deseada del líquido, una bomba para circular el líquido de prueba y una válvula para controlar el flujo del líquido. El espécimen fue un plato de 20 mm de largo, 30 mm de ancho y 5 mm de espesor. El espécimen recubierto fue adjunto a una banda de soporte de acero. El espesor del revestimiento fue aproximadamente de 2.5 mm. El espécimen fue adjuntado al soporte y fue colocada a 20 mm arriba de la salida de la boquilla.

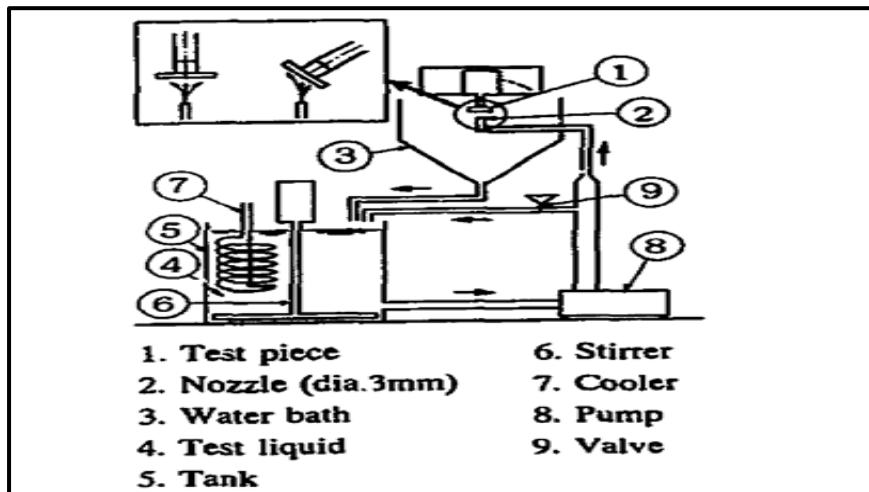
El diámetro de la boquilla fue de 3 mm y la velocidad del flujo se varía ajustando la válvula. La velocidad del jet de pulpa se mide como sigue: El volumen de muestreo (1.5 litros) de flujo fue colectado de la boquilla dentro de un vaso beaker graduado, el volumen fue dividido por el tiempo de muestreo y el área de la salida de la boquilla para obtener la velocidad.

La máxima velocidad del chorro a la salida de la boquilla fue 25 m/s. El ángulo de contacto del chorro con respecto a la superficie de prueba varió de 10° a 90° inclinando la porta muestras. El líquido de prueba fue agua potable conteniendo arena sílice de varios tamaños. El valor de la longitud medio, máximo y mínimo (denominado diámetro medio) varía de 42 a 415 micrones y la ratio de la sílice arena angular fue 1.4. La densidad y la dureza de la arena de sílice fue 2.7 gr/mm³ y HV = 750-1280 HV (Dureza Vicker). La concentración de arena sílice por peso fue medido muestreando el chorro de pulpa a la salida de la boquilla en cada prueba. La concentración pudiera ser ajustada de 0.1 a 75 en peso. La temperatura del líquido se mantuvo entre 25 y 30°C. La pérdida de peso y los perfiles de la superficie

dañada fueron medidas en grupos de intervalos empleando balanzas de precisión (sensibilidad 0.01 mg).

Figura 12

Vista Esquemática del Aparato de Prueba con Pulpa



Fuente: Iwai & Nambu (1997)

Materiales de Prueba

Trece materiales de prueba fueron empleados en estudios preliminares en el aparato de prueba a chorro de pulpa para impacto. Los materiales de prueba empleados fueron forros de alto polímero y materiales de cubierta, un acero martensítico (SUS403 13 Cr) como metal de referencia, un hierro fundido de alto cromo, y una aleación fundida de acero inoxidable dúplex como una representación de metal duro.

Los resultados de la prueba se resumen en la Tabla 5:

Tabla 5

Resultado de las pruebas preliminares empleando un chorro de pulpa de mineral sobre trece tipos diferentes de materiales

Pieza probada	Dureza			Pérdida de peso			
	HV (1.96N)	SHORE A	SHORE D	Pérdida de masa (mg)		Profundidad de desgaste máximo (μm)	
				2h	5h	2h	5h
A SUS403	213	-	-	13.3	-	45	-
B Poliuretano (suave)	-	83	-	0	0	0	0
C Poliuretano (duro)	-	-	75	10	-	180	-
D Cubierta de Poliuretano	-	90	-	0	0 ⁰	13	33
E Cubierta de Poliuretano	-	-	67	71.7	-	933	-
F Elastómero fluido	-	85	-	0	0	0	0
G Al ₂ O ₃ + resina	-	-	-	60.9	-	725	-
H Caucho	-	62	-	0	0	0	0
I WC	-	-	-	1.66	3.88	5	10
J Fierro fundido al cromo I	-	-	-	1.77	4.43	7	15
K Fierro fundido al cromo II	-	-	-	0.60	1.50	1	3
L Dúplex SUS I	-	-	-	4.23	10.6	24	50
M Dúplex SUS II	-	-	-	14.10	-	10	-

Condiciones de la prueba: 15 m/seg., ángulo de contacto: 90°, diámetro de Partícula de sílice 42 micrones, concentración de arena en peso 3.7 %.

Fuente: Iwai & Nambu (1997)

Las condiciones para estas pruebas fueron como sigue: el líquido de prueba fue agua potable conteniendo 3.7% en peso de arena sílice con un diámetro promedio de partícula de 42 micrones, la velocidad del chorro de la pulpa fue 15 m/s y el ángulo de contacto de la partícula con la superficie fue de 90°. La duración de la prueba fue 2 horas, se extendió a 5 horas cuando la velocidad de desgaste fue pequeña. Algunos de los materiales de los revestimientos elastómeros tales como los materiales B, F y H fueron muy efectivos en resistir el desgaste. Estos fueron por lo tanto seleccionados para pruebas adicionales. Sus propiedades de material se enumeran en la Tabla 6.

Tabla 6*Propiedades de los Forros Polímeros*

Material	Detalle	Densidad (g cm ⁻³)	Dureza Shore A	Resistencia a Tracción (MPa)	Resistencia al desgarro (N cm ⁻¹)	Elongación (%)
B	Polyuretano Mezcla de dos líquidos	0.57	83	10	160	400
F	Elastomero fluido Mezcla de dos líquidos	0.95	85	14	600	550
H	Caucho Caucho sintético suave	1.11	62	16	780	400

Fuente: Iwai & Nambu (1997)

El elastómero fluido y poliuretano fueron obtenidos por mezcla de dos líquidos, y el caucho fue un caucho suave sintético. Estos materiales son empleados en la práctica para reparar forros desgastados.

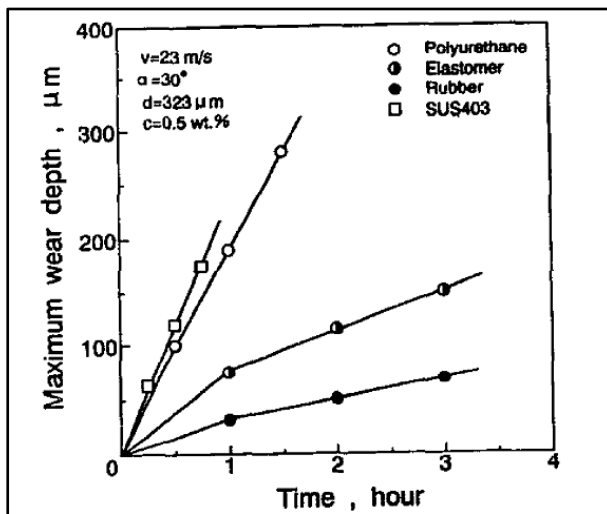
Resultados Experimentales

Pruebas adicionales de impacto empleando un chorro de pulpa fueron realizadas sobre tres materiales de revestimiento seleccionados, junto con el acero inoxidable martensítico (SUS403) como material de referencia, con un rango de material de chorro de 8-25 m/seg, ángulo de impacto de 10°-90°, el diámetro promedio de la arena de sílice es de 42-415 micrones, y concentración de arena por peso de 0.1 - 7 %.

La Figura 13 muestra la variación de la profundidad de desgaste máximo de cada material con la duración de la prueba. La profundidad del desgaste incrementa linealmente con la duración de la prueba en el periodo inicial de la prueba.

Figura 13

Variación de la profundidad de desgaste como función de la duración de la prueba.

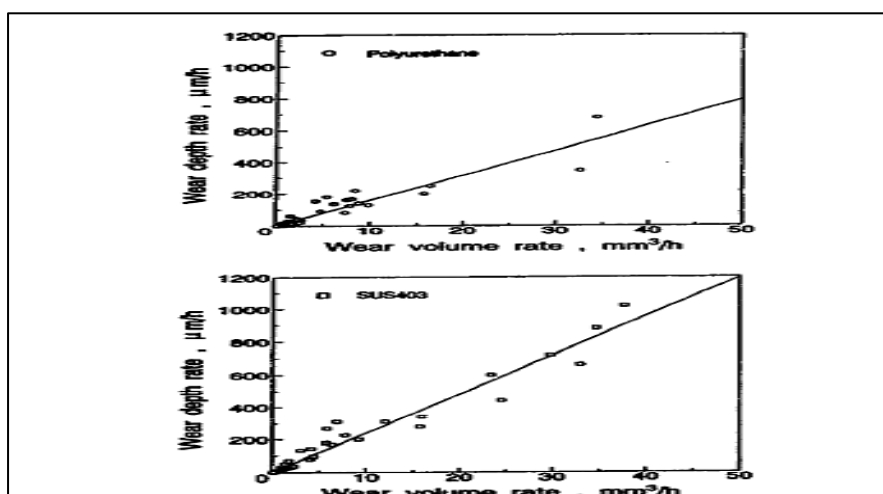


Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 14 muestra la relación entre la velocidad de desgaste por volumen y por profundidad para el poliuretano y el SUS403, ambos muestran relaciones lineales con coeficientes de correlación de 0.93 y 0.97 respectivamente.

Figura 14

Relación entre la velocidad de desgaste por volumen y profundidad del poliuretano y SUS403



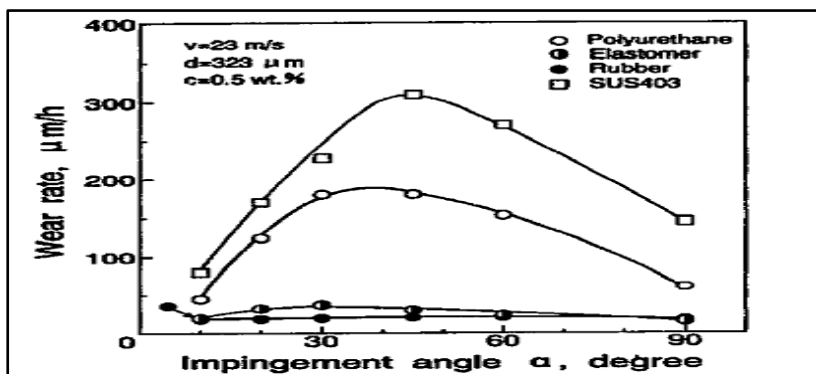
Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La **Figura 15** muestra variaciones en la velocidad de desgaste como función del ángulo de contacto a velocidad de 23 m/s, diámetro de partícula = 323 micrones y $c = 0.5\%$ en peso. La velocidad de desgaste del elastómero fluido y caucho fue de 1/10 de la velocidad del desgaste del poliuretano y SUS403. La velocidad de desgaste de SUS403 incrementa a un valor pico de alrededor de $\alpha = 45^\circ$ y decrece con el incremento adicional en el ángulo de contacto. El poliuretano y el elastómero fluido mostraron tendencias similares, pero el ángulo al cual la velocidad de desgaste llega a ser máximo fue aproximadamente 30° . La velocidad de desgaste del caucho fue casi el mismo sin importar el ángulo de contacto. Asimismo, las velocidades de desgaste de los materiales probados son comparadas a un ángulo de contacto de 30° .

La velocidad de desgaste del elastómero fluido y el caucho fueron insignificantes para el tamaño de partícula de 91 micrones a la velocidad máxima del chorro en este aparato. La velocidad crítica disminuye con el incremento del tamaño de partícula. Sin embargo, el factor de velocidad es independiente del tamaño de partícula y toma valores entre 1 y 3.

Figura 15

Variación de velocidad de desgaste como función del ángulo de impacto a una velocidad = 23 ms^{-1}

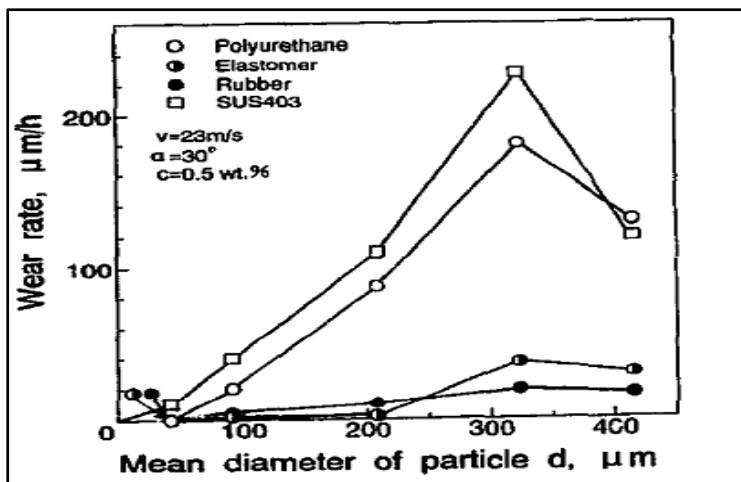


Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 16 muestra la relación entre la velocidad de desgaste y tamaño de partícula a una concentración de partícula de 0.5% en peso, los materiales elastómeros no sufren mucho desgaste con respecto a sus valores dados. Este tamaño de partícula esta designado al tamaño crítico de 208.91 y 42 micrones para el elastómero fluido, caucho y poliuretano.

Figura 16

Diámetro promedio (μ) vs velocidad de desgaste $\mu\text{m/h}$

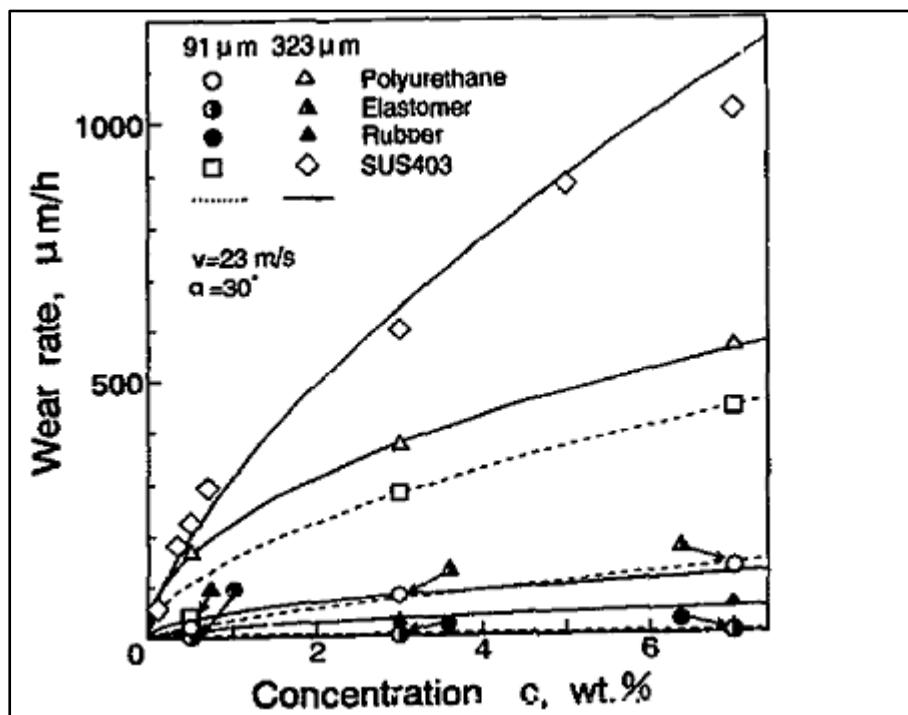


Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 17 muestra la relación entre la velocidad de desgaste y la concentración de arena sílice para tamaños de partícula de 91 y 323 micrones. La velocidad de desgaste es proporcional a la concentración de arena a alguna potencia.

Figura 17

Concentración c , % Peso vs Velocidad de Desgaste $\mu\text{m/h}$



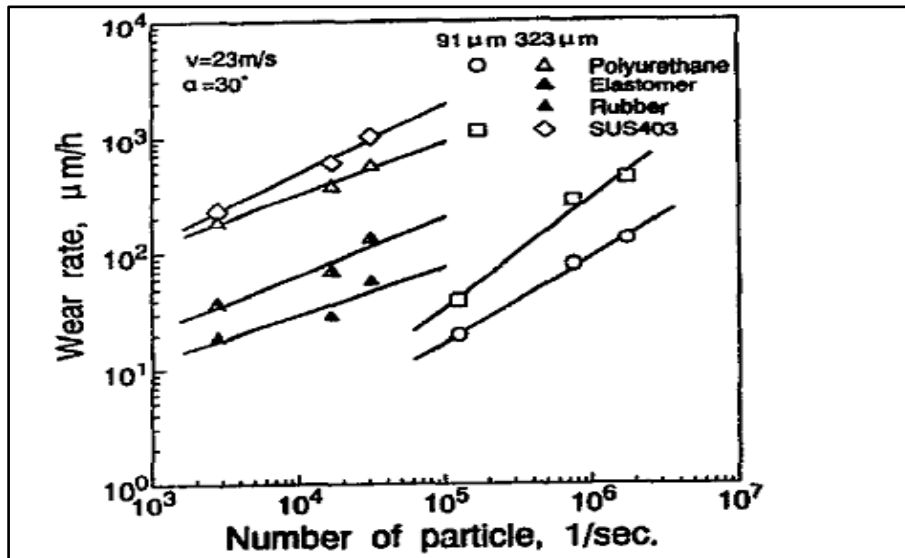
Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 18 muestra la relación entre la velocidad de desgaste y el número de partículas impactando durante una unidad de tiempo (segundos). Cuando las velocidades de desgaste son comparadas a la misma velocidad de impacto de partículas, la velocidad de desgaste llega a ser más grande para los tamaños de partículas más grandes. De esta figura, la velocidad de desgaste debido a los impactos de un número de partículas dados (10^5) pueden ser comparados. Para el poliuretano, el elastómero fluido, el caucho y el SUS403, respectivamente, la velocidad de desgaste es proporcional al diámetro medio de partículas a la potencia de aproximadamente 3. Esto puede indicar que el daño por desgaste es afectado por la (masa) X (velocidad), lo cual es la energía cinética de cada partícula. De

estos resultados, se concluye que el desgaste de la pulpa incrementa en la unidad de tiempo con un incremento en ambos el tamaño y número de partículas.

Figura 18

Número de partículas (1/seg) vs velocidad de desgaste $\mu\text{m}/\text{h}$

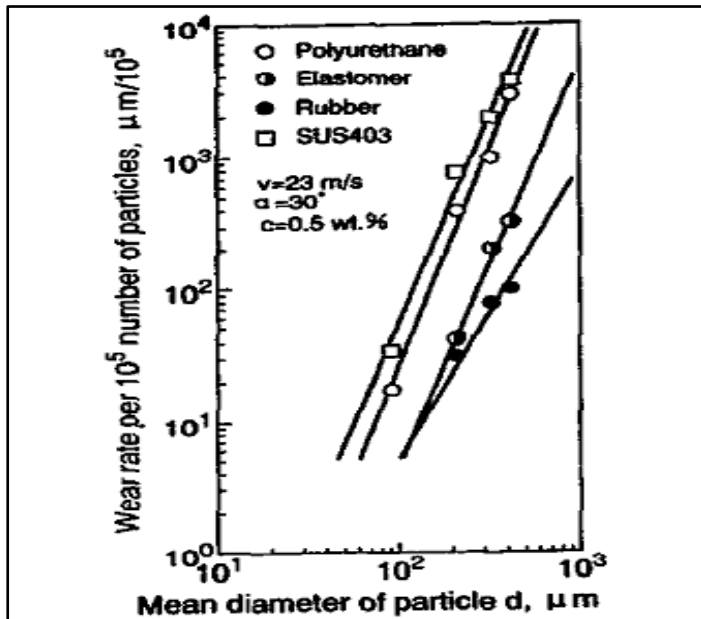


Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 19 muestra la relación entre la velocidad de desgaste y el número de partículas impactando durante una unidad de tiempo (segundos). Cuando las velocidades de desgaste son comparadas a la misma velocidad de impacto de partículas, la velocidad de desgaste llega a ser más grande para los tamaños de partículas más grandes.

Figura 19

Diámetro promedio de partícula (μm) vs velocidad de desgaste ($\mu\text{m}/10^5$)

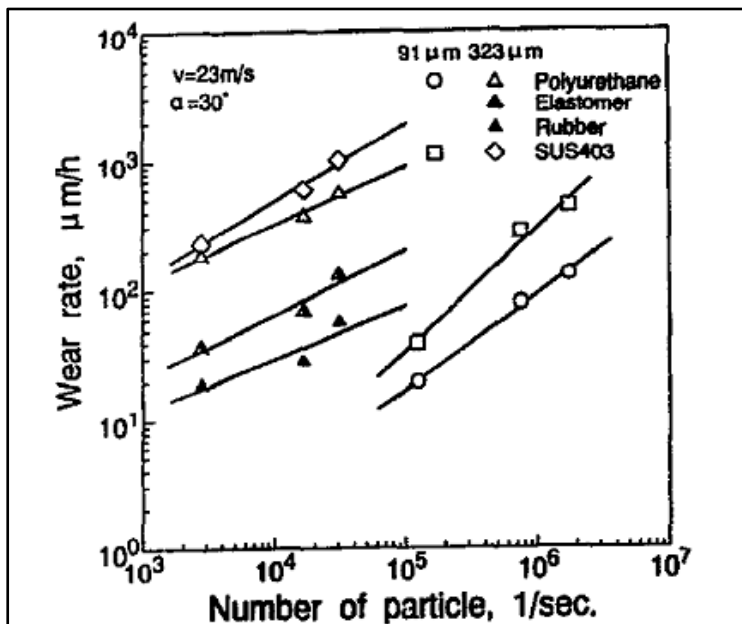


Fuente: Iwai & Nambu (1997)

La Figura 20 muestra la variación de la profundidad de desgaste máximo de cada material con la duración de la prueba. La profundidad del desgaste incrementa linealmente con la duración de la prueba en el periodo inicial de la prueba. La pendiente de la parte lineal de la curva de desgaste fue calculada por el método de mínimos cuadrados, y está definido como la velocidad de desgaste (micrones-metro/hora) en este estudio. Las velocidades de desgaste del volumen fueron determinados midiendo la masa del espécimen antes y después de la prueba. El poliuretano y el SUS403 muestran relaciones lineales con coeficientes de correlación de 0.93 y 0.97 respectivamente. Las velocidades de la profundidad de desgaste son empleados en las discusiones del comportamiento de desgaste por la pulpa en esta sección.

Figura 20

Número de partículas vs velocidad de desgaste ($\mu\text{m}/\text{h}$)



Fuente: Iwai & Nambu (1997)

Estudios adicionales indican que la relación entre la velocidad de desgaste y el tamaño de partícula con una concentración de 0.5 % en peso. Los materiales elastómeros no se desgastan a tamaños de partículas menores que los valores iniciales, aunque la velocidad de desgaste del SUS403 se pudo medir. Este tamaño de partícula es llamado el tamaño de partícula crítica y está en un rango entre 208.91 y 42 micrones para el elastómero fluido, caucho y poliuretano. Cuando el tamaño de partícula llega a ser más grande que el tamaño crítico, la velocidad de desgaste incrementa, pero luego fue menor con el tamaño de 415 micrones.

El Número de Partículas que golpean la superficie durante una unidad de tiempo puede ser estimado en la siguiente manera:

$$= \frac{(\text{Área de la salida de la boquilla}) \times (\text{velocidad del chorro}) \times (\text{concentración})}{(\pi/6) \times (\text{diámetro de partícula})^3 \times (\text{densidad de partícula})}$$

También la relación entre la velocidad de desgaste y el número de partículas impactando durante una unidad de tiempo (segundos). Cuando las velocidades de desgaste son comparadas a la misma velocidad de impacto de partículas, la velocidad de desgaste llega a ser más grande para los tamaños de partículas más grandes. De esta figura, la velocidad de desgaste debido a los impactos de un número de partículas dados (10^5) puede ser comparado. Los resultados para cada material se muestran en la Figura 19; ellos se grafican como líneas rectas en una escala logarítmica, a partir de que sus exponentes son 3.3, 3.1, 2.7 y 3.1 para el poliuretano, el elastómero fluido, el caucho y el SUS403, respectivamente, la velocidad de desgaste es proporcional al diámetro medio de partículas a la potencia de aproximadamente 3. Esto puede indicar que el daño por desgaste es afectado por la (masa) \times (velocidad), lo cual es la energía cinética de cada partícula. De estos resultados, se concluye que el desgaste de la pulpa incrementa en la unidad de tiempo con un incremento en ambos el tamaño y número de partículas.

3.3 Cálculo de la Velocidad de Desgaste

WALKER (2001), menciona que el desgaste experimentado tomando en cuenta los tamaños de las bombas, materiales, geometrías y condiciones de la pulpa fueron que sus valores se consideran correctos en cada lectura a una base común. Basado en los resultados de las pruebas de laboratorio, cada dato obtenido del punto de desgaste fue corregido a una concentración común denominada por $C_v = 0.3$ (se asume que esta concentración de sólidos por volumen tiene una relación lineal entre la concentración y la velocidad de desgaste hasta un valor máximo de $C_v = 0.3$) y la velocidad periférica del impulsor constante e igual a $V_i = 25$ m/s (asumiendo una relación lineal entre la velocidad y la velocidad de desgaste del impulsor). Además,

basados en las pruebas de desgaste comparativo de Walker y Bodkin y adicionalmente el dato del fabricante, el efecto de los diferentes materiales sobre las velocidades de desgaste fue corregidas empleando el Factor de Vida de Desgaste (WLF).

Este valor posibilita que los resultados tengan que ser reducidos en 3 grupos de datos como sigue:

- (1) Los resultados en el metal a prueba se corrigieron a un valor comparable de fierro blanco al cromo con 27% (A05);
- (2) Los resultados en el elastómero se corrigieron a un desgaste comparable al caucho natural suave (R26) y;
- (3) Los resultados de las pruebas de laboratorio original que usaron el fierro gris fundido (G47).

La velocidad de desgaste corregido (WR_{corr}) fue calculado de acuerdo a la fórmula en la siguiente Ecuación (9):

$$WR_{corr} = \frac{C1 \times V1 \times WR_{act}}{0.3 \times 25} \quad (9)$$

Una corta descripción de los materiales y su WLF se incluyen en la Tabla 7.

Tabla 7

Factores de desgaste para diferentes materiales

Datos	Códigos de materiales	Descripción de materiales	Factor de la vida de desgaste
WI-campo	A05	Cromo endurecido al 27%, fierro blanco al 2.8% al carbono a AS2027- 650 HBW	1.0
WI-campo	A12	Fierro blanco fundido hipereutético al 30% de cromo-650 HBW	1.4
WI-campo	A211	Fierro blanco hipereutético endurecido al 30% de cromo-700 HBW	1.7
Ru-campo	R26	Caucho natural sin relleno – 43 shore (A)	1.0
Ru-campo	R33	Caucho natural sin relleno – 44 shore (A)	1.5
Ru-campo	S42	Neopreno policloropreno - 50 shore (A)	0.4
CI-lab	G47	Fierro fundido gris con tratamiento térmico – 110 HBW	1.0

Fuente: Craig I. Walker, "Slurry pump side-liner wear: comparison of some laboratory and fields results", página 83.

Todas las comparaciones fueron hechas empleando un tamaño de partícula de d85 denominado "Tamaño de partícula de desgaste equivalente" basado en la recomendación de Roco. El "Tamaño de partícula de desgaste equivalente" es el tamaño de partícula que solamente es representado en la pulpa de mineral como si todas las partículas tuvieran el mismo tamaño, podría causar una cantidad equivalente de desgaste erosivo cuando las partículas que están ampliamente distribuidas están presentes. Los sólidos fueron todos minerales de sílice con gravedad específicas de 2600 a 3000 Kg/m³. No se midió la dureza de la partícula parcialmente a raíz de los diferentes constituyentes minerales presentes y la inhabilidad para determinar un valor representativo para cada mineral.

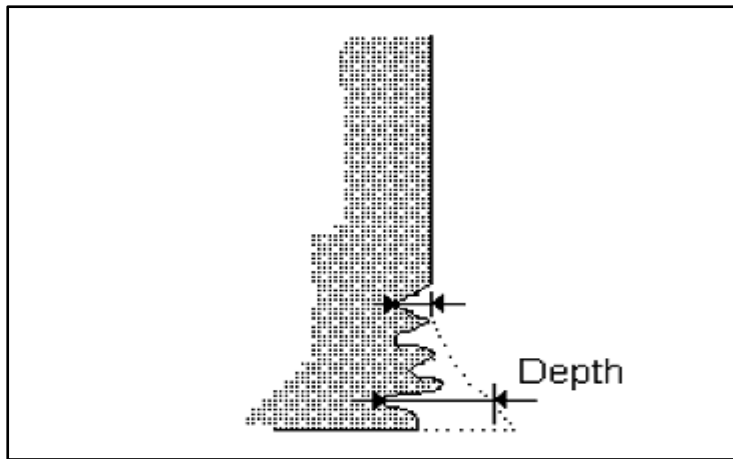
Para probar y mejorar la interpretación de los resultados, una línea de tendencia se colocó para cada grupo de datos (usando la correlación del momento del producto de Pearson directo), encontrado en el trabajo previo la velocidad de desgaste HE estuvo más afectado por las partículas más grandes que STD. La velocidad de

desgaste del laboratorio con el material de hierro fundido fue más alta por un factor de 6 en comparación con la velocidad de desgaste de la bomba fabricado en material de hierro blanco endurecido al cromo para ambos diseños STD y HE.

La Figura 21 muestra los resultados de desgaste de los forros laterales de la bomba en operación para los impulsores de metal STD y HE comparados a los resultados de laboratorio.

Figura 21

Vista seccional del desgaste de los forros laterales



Fuente: Walker, (2001)

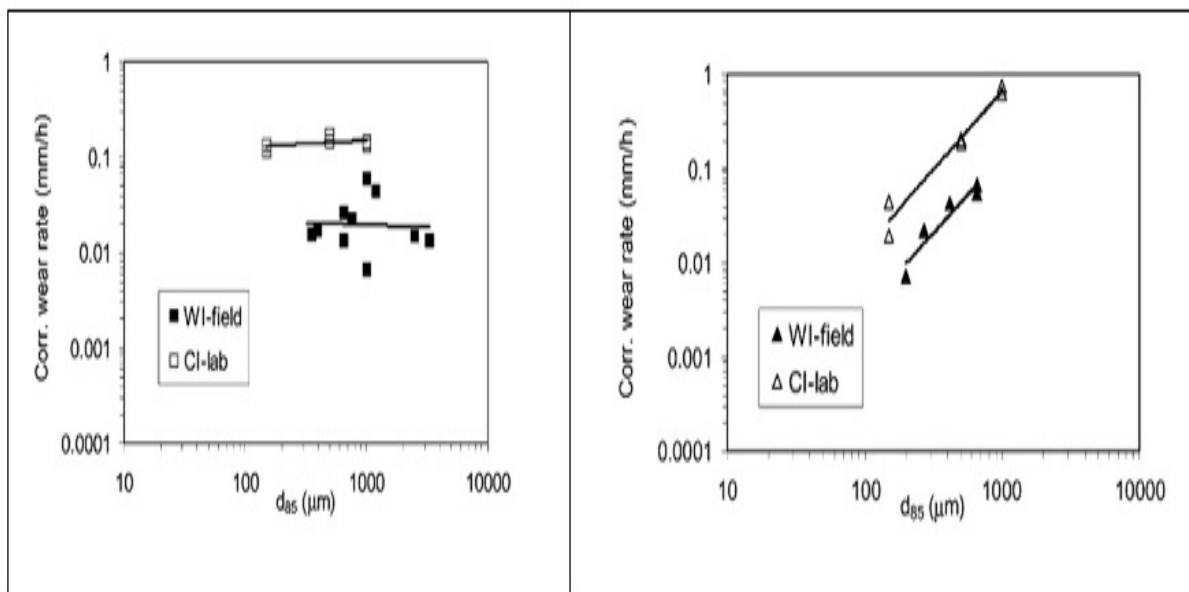
La Figura 22a muestra la velocidad de desgaste de los forros laterales con el impulsor STD y como se puede observar, la línea de tendencia es la misma que para los resultados obtenidos en operación continua.

La Figura 22b muestra los resultados HE. Otra vez la pendiente de los resultados en operación continua y de laboratorio son similares. Como se encontró en el trabajo previo la velocidad de desgaste de los forros fue afectado más por las partículas más grandes que el STD. Las velocidades de desgaste de laboratorio con el

material de hierro fundido fue más alto alrededor de 6 veces más que la bomba de hierro fundido blanco en operación continua para ambos diseños el HE y STD.

Figura 22

Efecto del tamaño de la partícula sobre la velocidad de desgaste corregida para los forros laterales (CI – Pruebas de laboratorio; WI – Pruebas de Campo).



(a) *Forro Lateral con Impulsor STD*

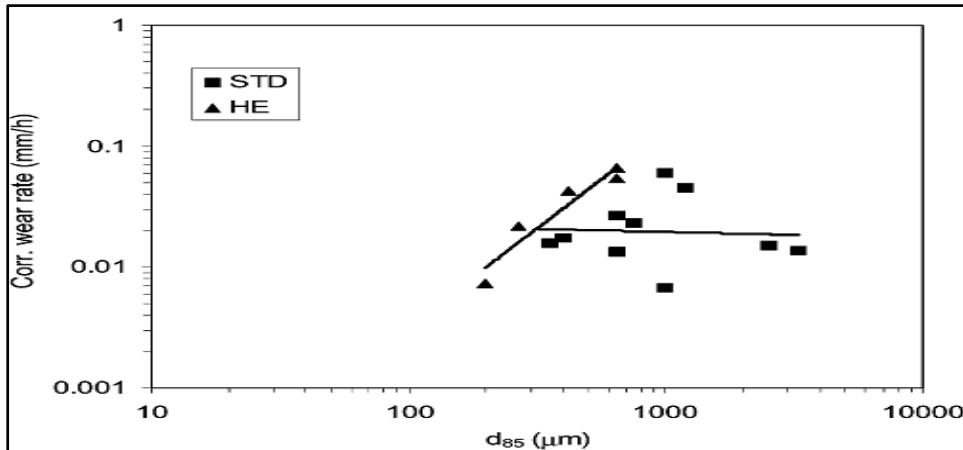
(b) *Forro Lateral con Impulsor HE*

Fuente: Walker, (2001)

En la Figura 23 las líneas de tendencia de los resultados para ambos STD y HE para los desgastes de los forros laterales de la bomba. Las líneas de tendencia se cruzan alrededor de $d_{85} = 300$ micrones. Este valor tiene implicancias prácticas en indicar cuál tipo de forro lateral dará la más baja velocidad de desgaste para una particular pulpa clasificada.

Figura 23

Comparación de las tendencias del desgaste los forros laterales del metal para los resultados de campo de STD Y HE

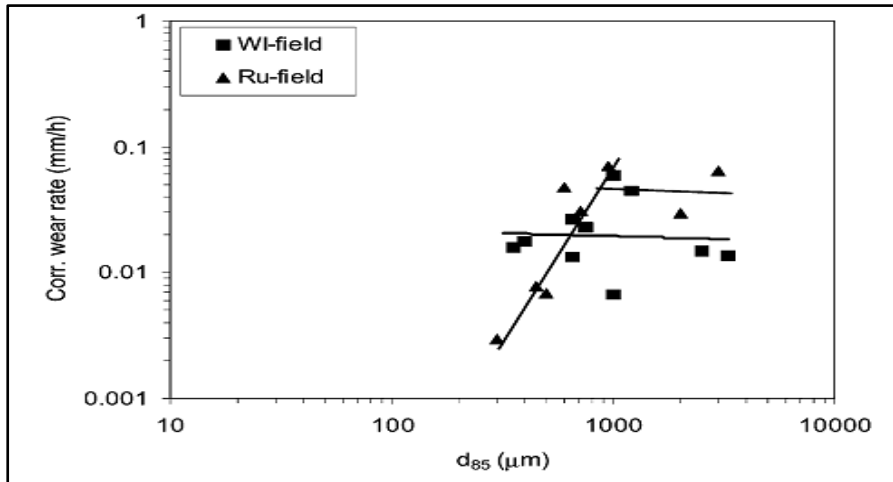


Fuente: Walker, (2001)

La Figura 24 muestra los resultados de operación de los forros laterales del caucho en operación comparados con el metal para el impulsor STD (el arreglo HE sólo tuvo dos datos puntuales de operación). Los resultados de los desgastes del caucho muestran una dependencia muy grande sobre el tamaño de partícula que del metal. Estos resultados tienen sentido cuando los mecanismos de desgaste para las clases de materiales que son consideradas (particularmente la probabilidad del corte del caucho o desgarrado debido a las colisiones con las partículas más grandes). Las líneas de tendencia se cruzan en un $d_{85} = 700$ micrones. Para tamaños de partículas $d_{85} > 1000$ micrones, la velocidad de desgaste para el caucho permanece constante.

Figura 24

Comparación de las velocidades de desgaste laterales de caucho y metal para el diseño STD en campo.



Fuente: Walker, (2001)

Patrones de Desgaste

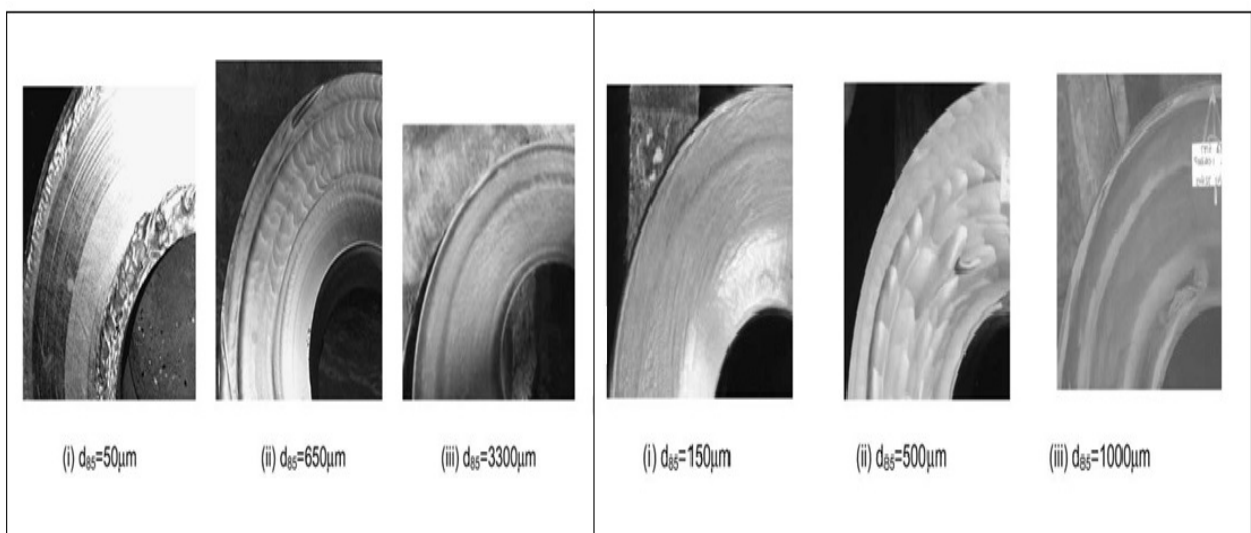
Como se observa previamente con las pruebas de laboratorio, los patrones de desgaste cambiaron dramáticamente con el tamaño de partícula. Para los forros de los lados de la bomba con el impulsor STD, los patrones de desgaste se muestran en la Figura 25 que fueron completamente similares a las pruebas de laboratorio con proceso continuo. La mayor diferencia con los resultados de laboratorio para las partículas más finas es que el tiempo no permite el patrón de desgaste para llegar al punto de falla funcional. En conclusión, para los tamaños de partículas más grandes, el volumen de desgaste ocurrió desde la sección media hacia la periferia, mientras que, para partículas más pequeñas, el mayor desgaste ocurrió alrededor del ojo del impulsor como se puede ver en la Figura 26 a (i).

El forro lateral en la bomba usando un impulsor HE además muestra buena similitud entre los patrones de desgaste para ambos; de laboratorio y proceso continuo. La Figura 25 (a) exhibe dos partes con desgastes localizados alrededor del ojo y con muy poco desgaste en la periferia. La apariencia del área desgastada de las partes de prueba en laboratorio se muestra en la Figura 26 (b), ha sido el mismo patrón de espiral para las partículas finas ($d_{85}= 150$ micrones).

En general, los patrones de desgaste de la operación continua con los forros de caucho de los lados de la bomba fueron similares a los del metal, en particular a tamaño de partículas más pequeñas (comparar Figura 25 a (i) con la Figura 26 a (ii)). La Figura 25 a (iii) muestra un desgaste anular alrededor de la periferia. El caucho HE en la Figura 26 b (ii) es además similar al metal en la Figura 25 (a).

Figura 25

Patrones de Desgaste con Impulsor STD (Standard)



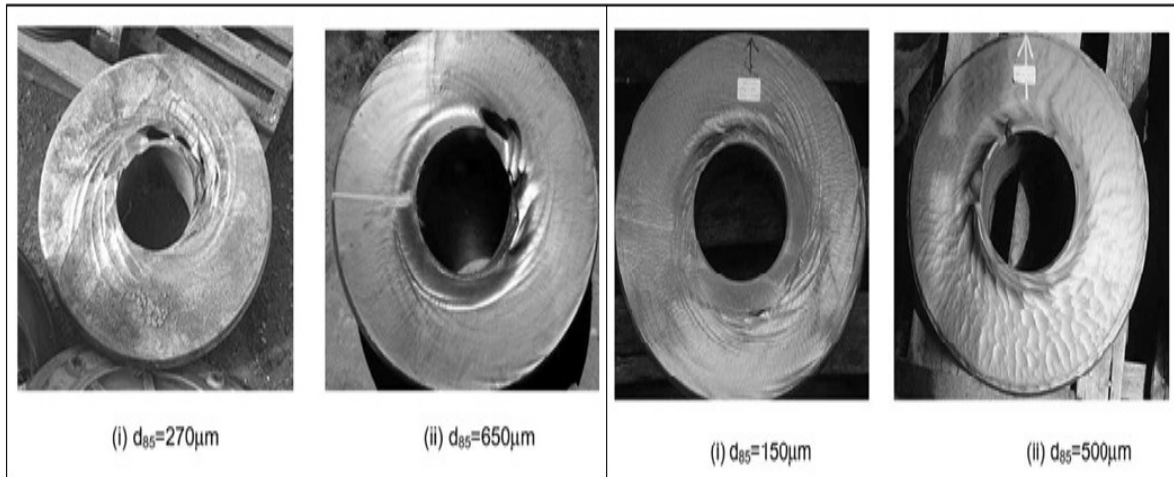
(a) Patrones de desgaste en campo – WI
laboratorio - CI

(b) Patrones de desgaste en

Fuente: Walker, (2001)

Figura 26

Comparación de los patrones de desgaste para los forros laterales del impulsor HE



(a) Patrones de desgaste en campo – WI (b) Patrones de desgaste de laboratorio – CI

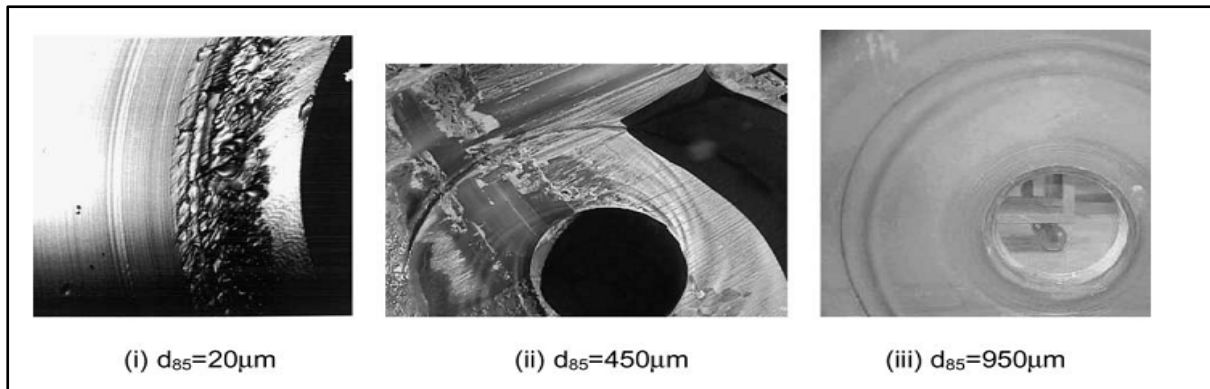
Fuente: Walker, (2001)

A continuación, en la Figura 27 se muestran los desgastes de los revestimientos STD y HE a nivel industrial:

Figura 27

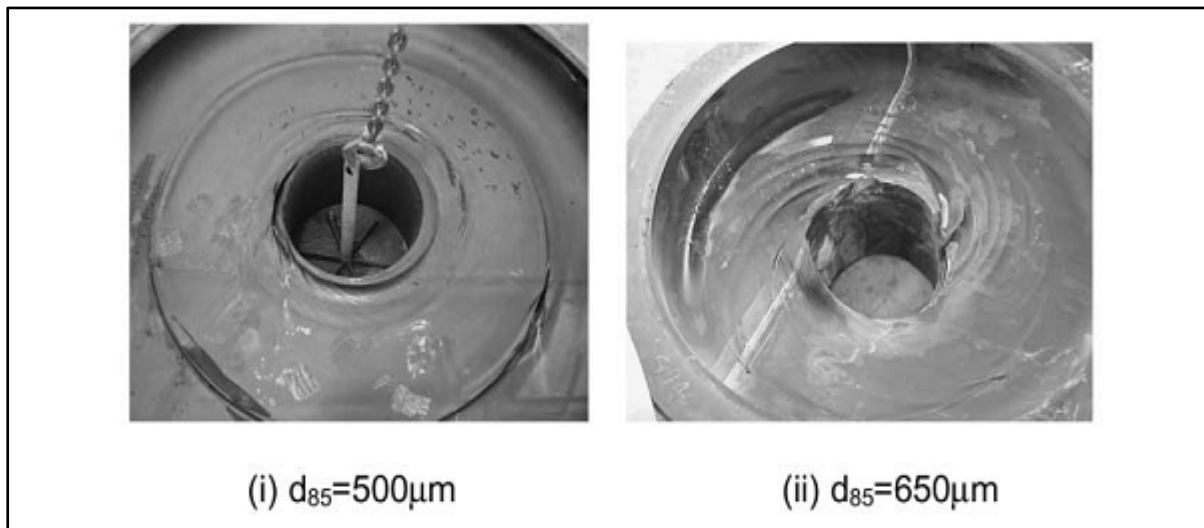
Patrones de desgaste en planta industrial para forros laterales en caucho

(a) Diseño STD



Fuente: Walker, (2001)

(b) Diseño HE



Fuente: Walker, (2001)

3.4 Estudio sobre el Comportamiento de la Abrasión – Corrosión en Pruebas de Lixiviación Ácida (Ácido Sulfúrico y Mineral de Carbonatos con Manganeso)

AKAN (2005) efectúa pruebas de corrosión y abrasión en los revestimientos de caucho bromobutyl. El estudio investiga los efectos del tamaño de partícula, tiempo de erosión, concentración de la pulpa, y velocidad del agitador de laboratorio. El desgaste se mide empleando mediciones de la rugosidad de la superficie y escaneo con microscopio electrónico de las superficies desgastadas. El grado de desgaste

se aumenta cuando incrementa el tamaño de partícula, concentración en peso de la pulpa, y tiempo de erosión y el desgaste parece estar en el máximo nivel a un ángulo de impacto nominal de 40°. El desgaste parece decrecer con el incremento de las velocidades de la pulpa, pero puede deberse al cambio en la forma de la partícula.

Asimismo, investiga la degradación química del caucho bromobutyl midiendo la dureza Shore A y la morfología del caucho después de ser expuesto al ácido y agua a 70°C. El caucho incrementa su dureza al estar en contacto con el ácido. Al momento de sumergir el caucho en el ácido tuvo un efecto de endurecimiento y este fenómeno puede haber jugado una parte en la falla.

Como consecuencia de este trabajo se nota que el caucho al estar expuesto a la pulpa de mineral, ácido y temperatura tiene un efecto de degradación. Sin embargo, el tamaño y la forma de la partícula tuvieron un mayor efecto en las velocidades de acumulación de daños, en donde las partículas más grandes y filudas producirían mayores daños.

Para las pruebas en donde los tamaños de partículas menores de 3.35 mm, la velocidad del daño acumulado es insignificante. Estudios adicionales sobre las superficies desgastadas indican que el mayor daño fue la formación de grietas las cuales penetraron el caucho y expusieron los álabes de acero del agitador al medio ácido.

El endurecimiento del acero por exposición a la solución ácida podría haber decrecido la resiliencia del caucho y puede haber incrementado el efecto del desgaste de la pulpa sobre la formación de grietas, sin embargo, no se han explorado los efectos de desgaste por pulpa y degradación térmica-química.

3.5 Variables y Propiedades Mecánicas de los Polímeros afectados por la Corrosión y Abrasión

FASSANO, JANZ & MYERS (2012), indican que los parámetros más importantes que afectan el desgaste de la pulpa sólido-líquido sobre los impulsores son medio químico, dureza de los sólidos, densidad de los sólidos, porcentaje de sólidos, forma de sólidos, régimen del fluido (turbulento, transición o laminar), dureza de las partes del agitador en contacto con la pulpa, eficiencia hidráulica del impulsor (velocidad de disipación de la energía cinética cerca de los álabes del impulsor), velocidad de impacto y frecuencia del impacto. Las técnicas para minimizar el desgaste sobre los impulsores cubren la elección del impulsor, tamaño y velocidad del impulsor, selección de la aleación, y la cubierta de la superficie.

Debido a que las velocidades máximas en los procesos de mezclado raramente exceden de 6 m/s, la erosión y la erosión-corrosión de los materiales son procesos de fatiga para la mayoría de los procesos de mezcla. El proceso de fatiga ocurre sobre una escala localizada o microescala.

El material de recubrimiento debe ser o duro o suave o elástico. Hay un número de recubrimientos duros tales como cubierta cerámica, carburo de tungsteno o carburo de silicio, el cual podría ser aplicado a las áreas de alto desgaste tales como los álabes de los impulsores. Los recubrimientos elastómeros están en el orden de 3/8" de espesor para impulsores de escala industrial que son los más empleados en las aplicaciones de pulpa en vez de tener que absorber la mayor parte de la energía de impacto de la partícula, un elastómero deja la mayor parte de la energía hacia la partícula después del impacto. Los fabricantes de revestimientos elastómeros y aplicadores generalmente recomiendan una dureza de elastómero de 40-60 Dureza

A para la vida óptima. La dureza del elastómero está directamente relacionada a su resistencia por corrosión.

Sin embargo, cuando una dureza del elastómero incrementa encima de 40 SHORE A, su resistencia a la corrosión decrece. Los elastómeros más comúnmente empleados son caucho, neopreno, butil, EPDM, y hypalon.

Capítulo IV: Marco Conceptual

El desgaste del revestimiento de caucho en las partes en contacto con la pulpa se debe a los siguientes aspectos:

4.1. Tipo de Desgaste

4.1.1. *Desgaste por Erosión*

Ocurre cuando el esfuerzo cortante local del material es excedido y un fragmento del material se rompe. Esto se debe a los ángulos de impacto que están asociados con el componente de velocidad de la partícula la cual es paralela a la superficie de los límites. El desgaste por corte o desgarramiento ocurre cuando las partículas cortantes tienen suficiente energía para cortar en pedazos un material dúctil y deja la superficie en forma de ranuras. Una ranura en la superficie ocurre como resultado del impacto de las partículas redondeadas que desplazan el material al final del lado ranurado. Materiales frágiles fallan como resultado de la formación de grietas y subsecuentes hendiduras de las partículas de la superficie.

4.1.2 *Desgaste por Deformación*

Ocurre por altos impactos direccionales de las partículas especialmente del componente perpendicular sobre el área del álabe. El desgaste ocurre cuando los esfuerzos de impacto exceden el rendimiento del esfuerzo del límite del material y se produce la deformación. Los esfuerzos de endurecimiento ocurren debido a la deformación plástica producto de los impactos de alto ángulo. El impacto de alta energía produce roturas de la capa de la superficie y pérdidas del material. Las penetraciones del material elastómero ocurren cuando la energía de la partícula es suficiente para desgarrar permanentemente la superficie.

4.1.3 Desgaste por Abrasión

Es un proceso de erosión el cual ocurre cuando el material que está siendo transportado se desgasta en su superficie durante el tiempo. Es el proceso de raspar, rayar, desgastar, estropear y frotar los materiales. La intensidad de la abrasión depende de la dureza, concentración, velocidad y masa de las partículas en movimiento.

4.1.4 Desgaste por Corrosión

Es la destrucción gradual de materiales (generalmente un metal) por reacción química y/o electroquímica con su entorno. La oxidación, la formación de óxidos de hierro es un ejemplo de la corrosión electroquímica, la corrosión degrada las propiedades útiles de los materiales y estructuras, incluida, la resistencia, la apariencia y la permeabilidad a líquidos y gases.

4.1.5 Degradación de Polímero

Es un cambio en las propiedades del esfuerzo a la tracción de un polímero o producto basado en polímero bajo la influencia de uno o más factores ambientales tales como calor, luz, o químicos tales como ácidos, álcalis, y algunas sales. Estos cambios son generalmente indeseables, tales como agrietamiento y la desintegración química de productos, o la reducción deliberada del peso molecular de un polímero. Los cambios en las propiedades son frecuentemente conocidos como "envejecimiento".

4.1.6 Desgaste por Molienda

Ocurre cuando las partículas sólidas llegan a estar atrapadas entre superficies que se mueven entre sí en estrecha proximidad. Existiendo una compresión concentrada y esfuerzos cortantes transmitidos entre las partículas de mineral debido a las fuerzas de chancado sobre la partícula, lo cual causa falla por fragilidad o ductilidad

localizada. Asimismo, la fragmentación de la partícula causará desgaste adicional erosivo debido a fricción causada por los pequeños ángulos de contacto de las partículas.

4.2 Tipos de Caucho

4.2.1. Caucho Natural

Es el más comúnmente empleado material no metálico y proveerá mayor resistencia al desgaste que metales y otros elastómeros para clasificaciones de partícula específica (0.01 pulgadas o más finos), el caucho absorbe la carga debido a su elasticidad.

4.2.2 Neopreno

No es tan bueno como el caucho natural en términos de resistencia de abrasión, pero puede ser económicamente atractivo en la presencia de aceites y otros químicos.

4.2.3 Hypalon

Es más resistente a los ácidos fuertes y químicos oxidantes hasta temperaturas 107°C.

4.2.4 Poliuretanos

Resistentes a pulpas de mineral altamente abrasivos y corrosivos, es mejor utilizado para superficies de alta dureza.

4.2.5 Uretanos

Se desempeña mejor en aplicaciones de pulpa húmeda donde el tamaño de partícula es de 0.3 pulgadas o menos, y el mecanismo de desgaste es debido a la abrasión ocurrida por una partícula impactando a bajo ángulo.

4.3 Mantenimiento Proactivo

Es una actividad desarrollada para detectar y corregir la causa raíz de las fallas. Este mantenimiento es la acción tomada para corregir condiciones que pudieran dirigir a la degradación del material. El mantenimiento proactivo se concentra en identificar y corregir la causa raíces anormales que crean condiciones de operación inestables. Tales condiciones inestables son las “**raíces de las fallas**”.

El **mantenimiento proactivo** es la primera línea de defensa en contra de la degradación del material (falla incipiente) y una subsecuente degradación del rendimiento (inminente fracaso). El operador puede corregir un modo de falla condicional que es la causa de una condición inestable y asegura que las fallas del tipo degradación nunca ocurran.

4.4 Recuperaciones de Plata y Manganeseo

Son valores obtenidos del proceso productivo de lixiviación ácida y que brindarán ganancias para la empresa, sin embargo, con paradas intempestivas, o no programadas o sin un registro de fallas y sin análisis de causa-raíz, se verán afectados por ser considerados como costos de operación (OPEX).

Sin embargo, también estos valores de las recuperaciones dependerán de la calidad del manganeseo, plata alimentada en el proceso inicial.

Capítulo V: Metodología de la Investigación

Se estableció un método experimental para cuantificar el desgaste por erosión, abrasión y corrosión de los 5 polímeros en contacto con la pulpa de plata-manganeso. Previo a desarrollar este método de prueba, los estudios han sido llevados a cabo para explorar las técnicas disponibles a los métodos de prueba estándar. Las descripciones de estos métodos de prueba estándar con sus respectivos gráficos son colocadas en esta sección. Una descripción detallada del método de prueba de la abrasión de la pulpa incluyendo fotos esquemáticas de los equipos empleados, y procedimientos experimentales son descritos en este capítulo.

5.1 Unidad de Análisis

La presente investigación se va realizar a nivel de laboratorio sobre álabes del agitador forrado en los siguientes polímeros:

- Caucho natural
- Hypalon
- Neopreno
- EPDM
- Silicona

Las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los cinco polímeros en estudio se encuentran en el anexo, sin embargo, es necesario efectuar la previa caracterización de estos polímeros para poder estudiar los fenómenos de erosión, abrasión y corrosión; y su impacto en el desgaste de los álabes forrados en estos 5 polímeros cuando se ejecuten las pruebas de lixiviación a nivel de laboratorio.

La primera prueba de caracterización de los 5 polímeros que se efectúa fue de abrasividad y la segunda es de corrosión ácida.

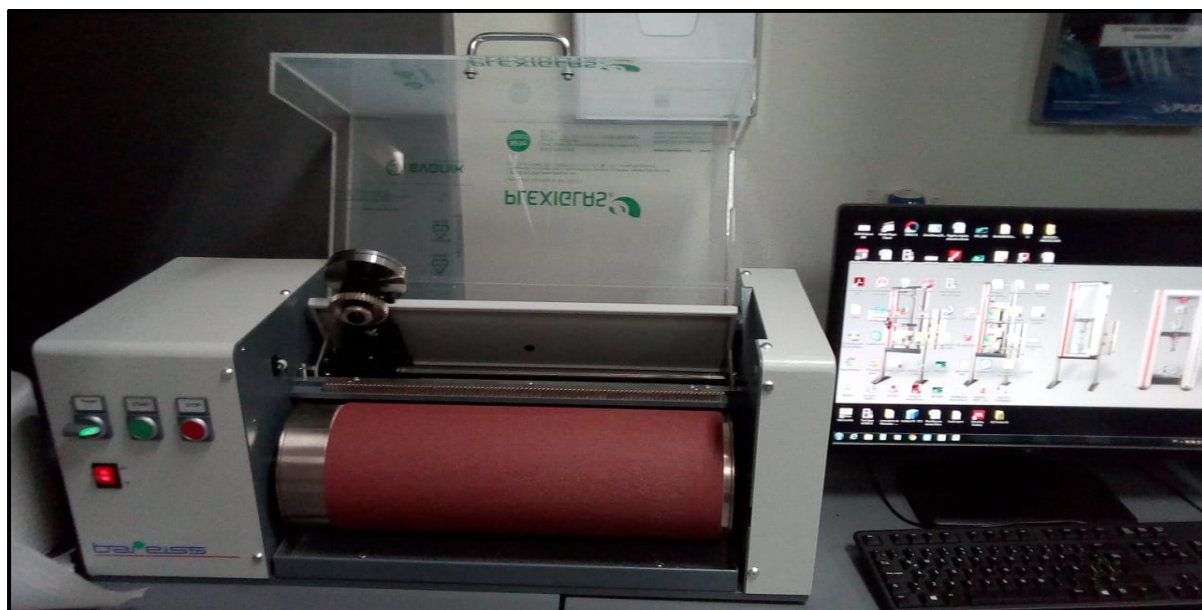
5.1.1 Pruebas de confirmación de la abrasividad de los 5 polímeros antes de someterlos a la lixiviación (Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú)

Se efectuaron las pruebas confirmatorias de abrasión de los 5 polímeros (Caucho Natural, hypalon, neopreno, EPDM y silicona) de acuerdo la Norma ASTM D5963 se emplea el Equipo de Abrasión BAREISS tipo rodillo que gira un equivalente a 40 metros de longitud, aplicando una presión de 10 Newton a las muestras de polímeros de dimensiones 16 mm de diámetro x 6 mm de espesor. Luego del cual los mismos polímeros serán sometidos a las pruebas de lixiviación ácida con empleo de mineral, ácido sulfúrico y agua.

La Figura 28 muestra una vista del equipo de abrasión empleado.

Figura 28

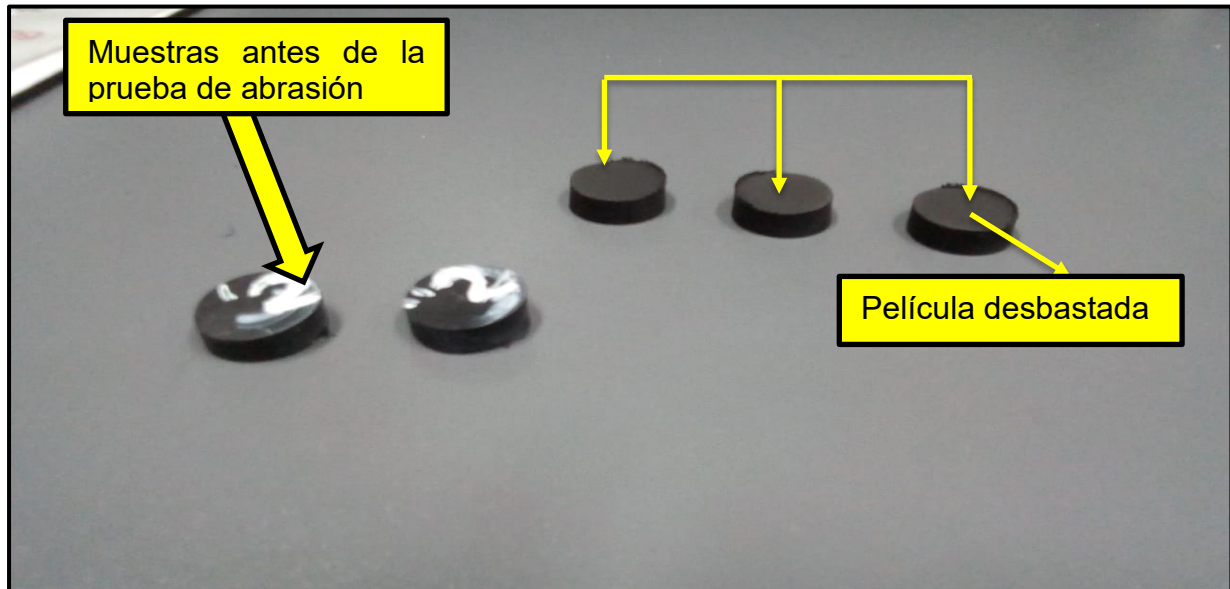
Equipo de Abrasión Bareiss



En la siguiente Figura 29, se observa las probetas de caucho natural antes y después de ser sometidas al Equipo de abrasión BAREISS.

Figura 29

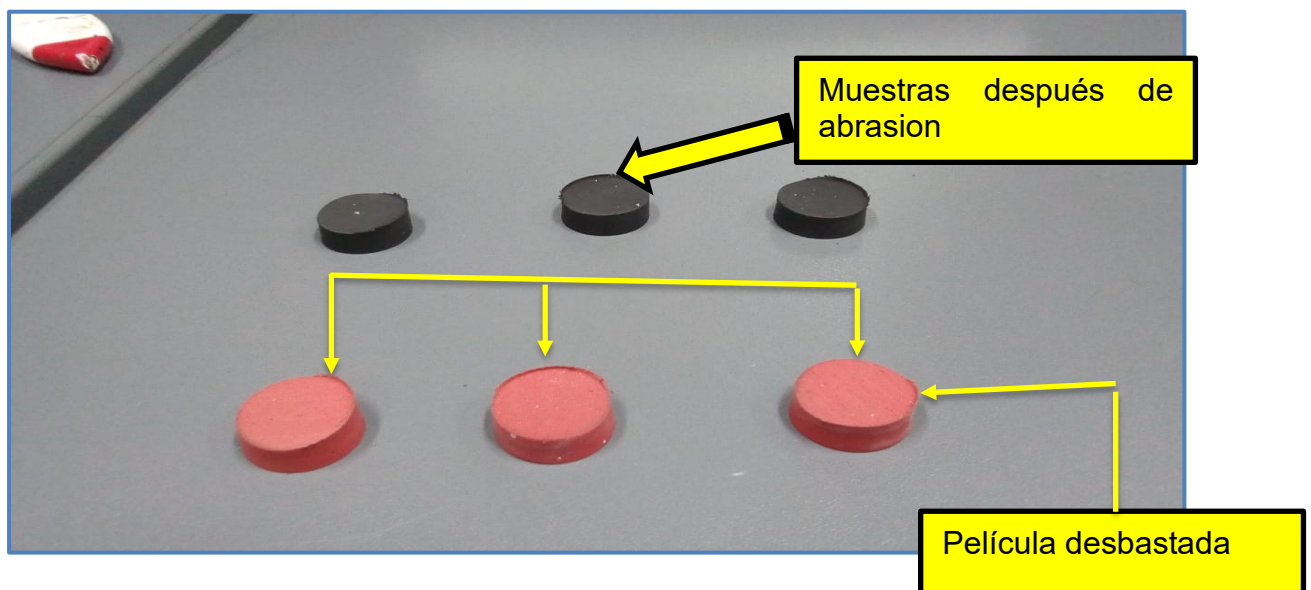
Prueba de Abrasividad con el Caucho Natural



En la Figura 30 se observan las probetas antes y después de aplicar el Equipo de abrasión BAREISS

Figura 30

Prueba de Abrasividad con la Silicona



La Tabla 8 resume las pruebas de abrasividad de los 5 polímeros en estudio, se medirán el porcentaje de pérdida de peso y volumen, los cuales se reflejarán en el índice de abrasividad (ARI).

El índice de abrasividad nos indicará el grado de desgaste por fricción de los 5 polímeros, el desgaste por fricción como se indicó se debe al contacto partícula sobre la superficie del polímero, el cual producirá superficies pulidas, cortes y picaduras.

La abrasión es uno de los fenómenos de desgaste de los revestimientos de polímeros sobre los álabes del agitador al estar en contacto con la pulpa de mineral, el cual ocurrirá durante la agitación a nivel de laboratorio.

Las pruebas de abrasividad se efectuaron en El Laboratorio de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú las cuales se muestran a continuación:

Tabla 8

Resultados de las pruebas de abrasividad con los polímeros en estudio empleando el equipo de abrasión BAREISS.

Muestra	Densidad (mg/mm ³)	Pérdida masa probeta (mg)	%Pérdida masa probeta	Pérdida volumen probeta (mm ³)	Índice de Resistencia Abrasiva
	Probeta	Δmt	% Δmt	Δvt	ARI (%)
Caucho Natural	1.3506	186.20	14.10	171.20	86.5
Hypalon	1.3502	332.90	20.80	264.00	56.2
Neoprene	1.3509	374.50	22.10	281.00	52.9
EPDM	1.3494	385.60	24.40	306.10	48.4
Silicona	1.3502	162.80	11.70	157.70	94.1

Condiciones de Prueba: Norma de ensayo; ASTM D5963-15, método de ensayo:

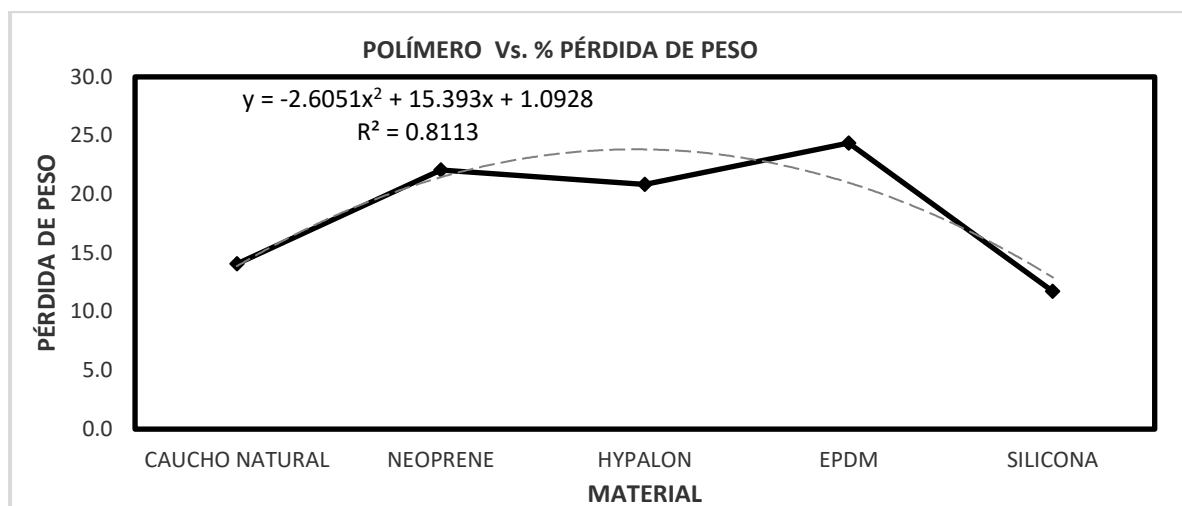
A, preparación de la muestra: cortada con herramienta, temperatura ambiente: 21

°C, condición de la muestra: V.B.E., ARI: abrasive resistance index.

Con los datos de la Tabla 8 de las pruebas de abrasividad efectuadas empleando el equipo de abrasión BAREISS, se procede a plotear la curva en la Figura 31, en donde se muestra el comportamiento de los polímeros en estudio con respecto a la pérdida de peso, de los cuales podemos observar que el CAUCHO NATURAL y la SILICONA poseen menores pérdidas de peso equivalente a 11.70% y 14.10% respectivamente, comparados con todos los polímeros y mucho menor que al NEOPRENE (22.10%) que es el polímero que se está empleando a nivel industrial y es motivo del estudio comparativo.

Figura 31

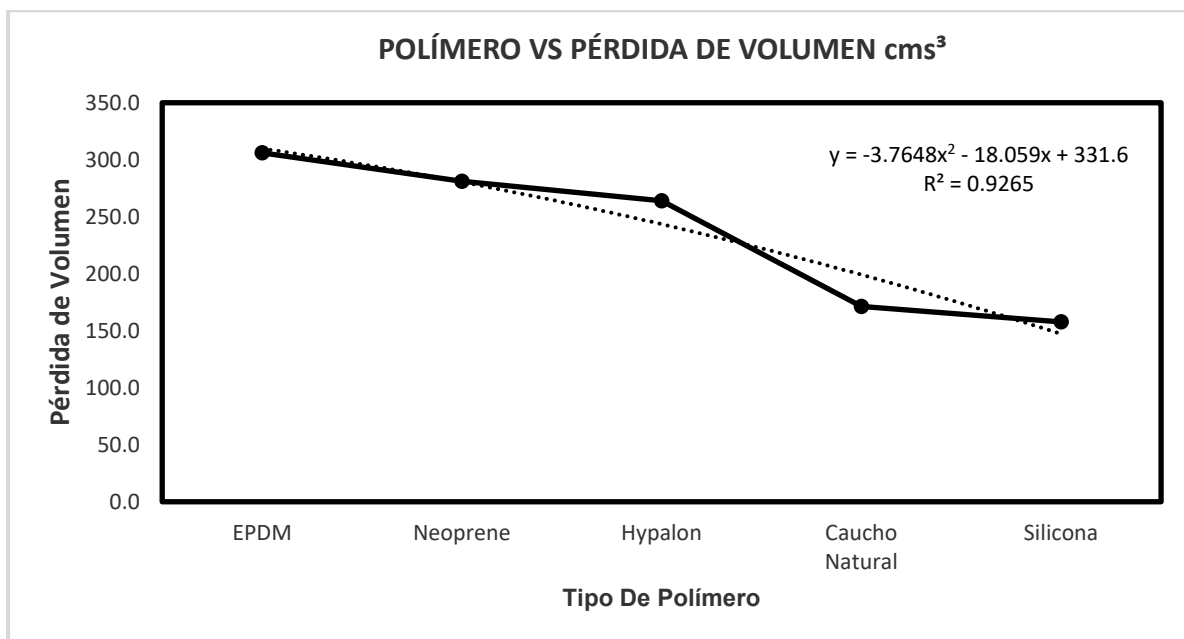
Polímero vs % Pérdida de Peso



De la misma manera con la curva obtenida en la Figura 32, debido a la diferencia en densidades de cada polímero, se puede observar que la SILICONA, CAUCHO NATURAL y HYPALON pierden más volumen durante la prueba de abrasividad que el NEOPRENE en comparación.

Figura 32

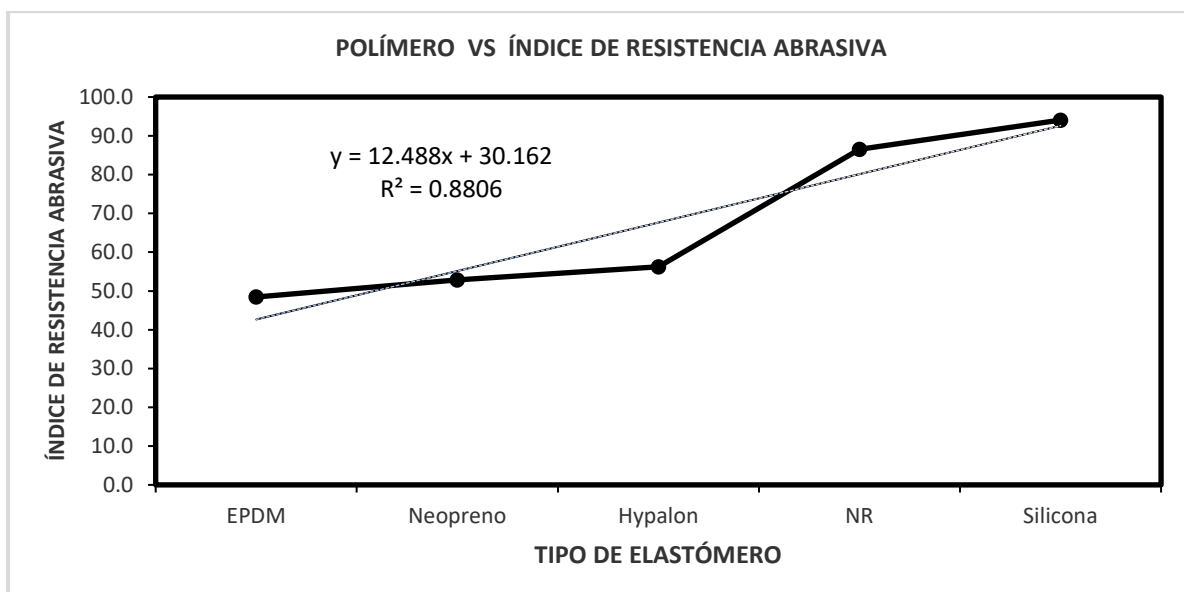
Polímero vs % Pérdida de Volumen cms³



El Figura 33, muestra el índice de abrasividad de la SILICONA y CAUCHO NATURAL, con mejor comportamiento que el NEOPRENE, porque ambos polímeros muestran más altos valores.

Figura 33

Polímero vs % Índice de Resistencia Abrasiva

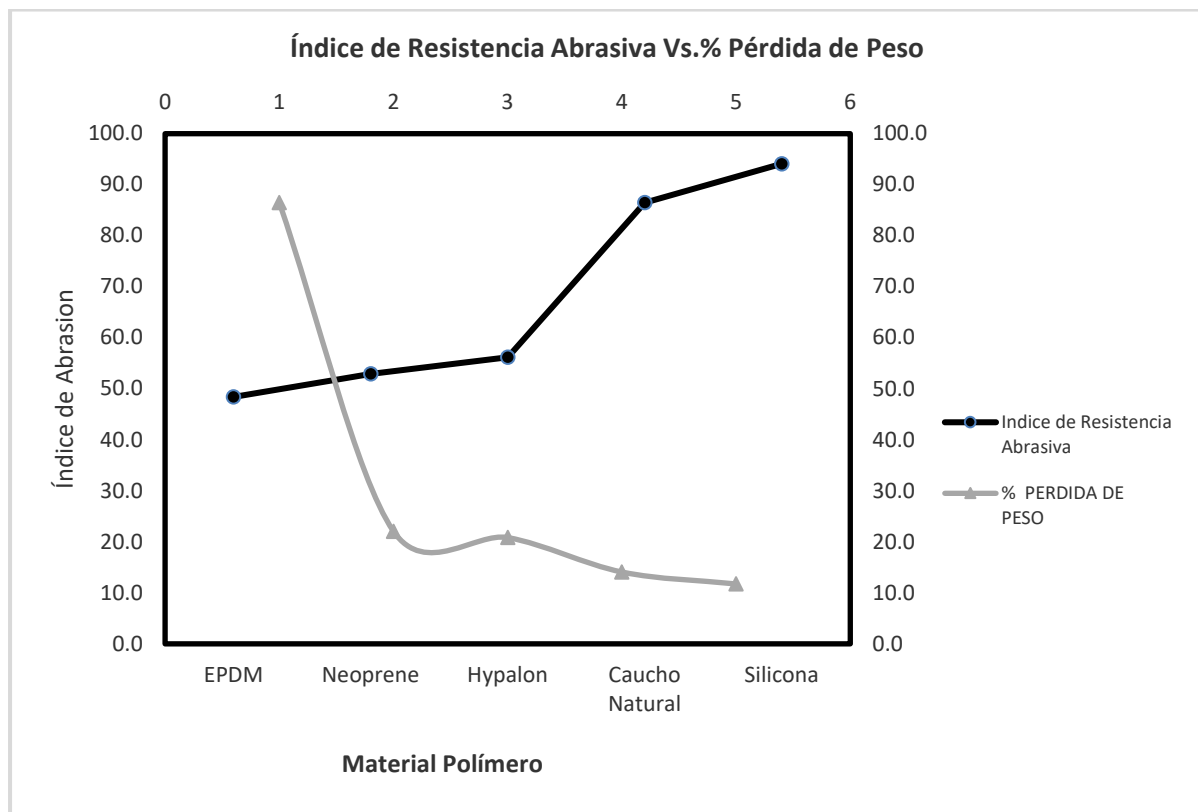


La información obtenida a partir de estos gráficos nos permitirá ver el comportamiento de los polímeros con respecto a la abrasión, antes de ser sometidos a las pruebas de lixiviación a nivel de laboratorio y la tendencia de cada material al degradarse por efecto de las pruebas de laboratorio, de tal manera que podamos entender los resultados e interpretarlos.

Las siguientes correlaciones de Figura 34 y 35, se efectuaron para mostrar comparativamente el Índice de Resistencia Abrasiva y las propiedades de cada polímero expresado en la pérdida de peso y volumen porcentual de los 5 polímeros en estudio.

Figura 34

Índice de Resistencia Abrasiva vs % Pérdida de Peso

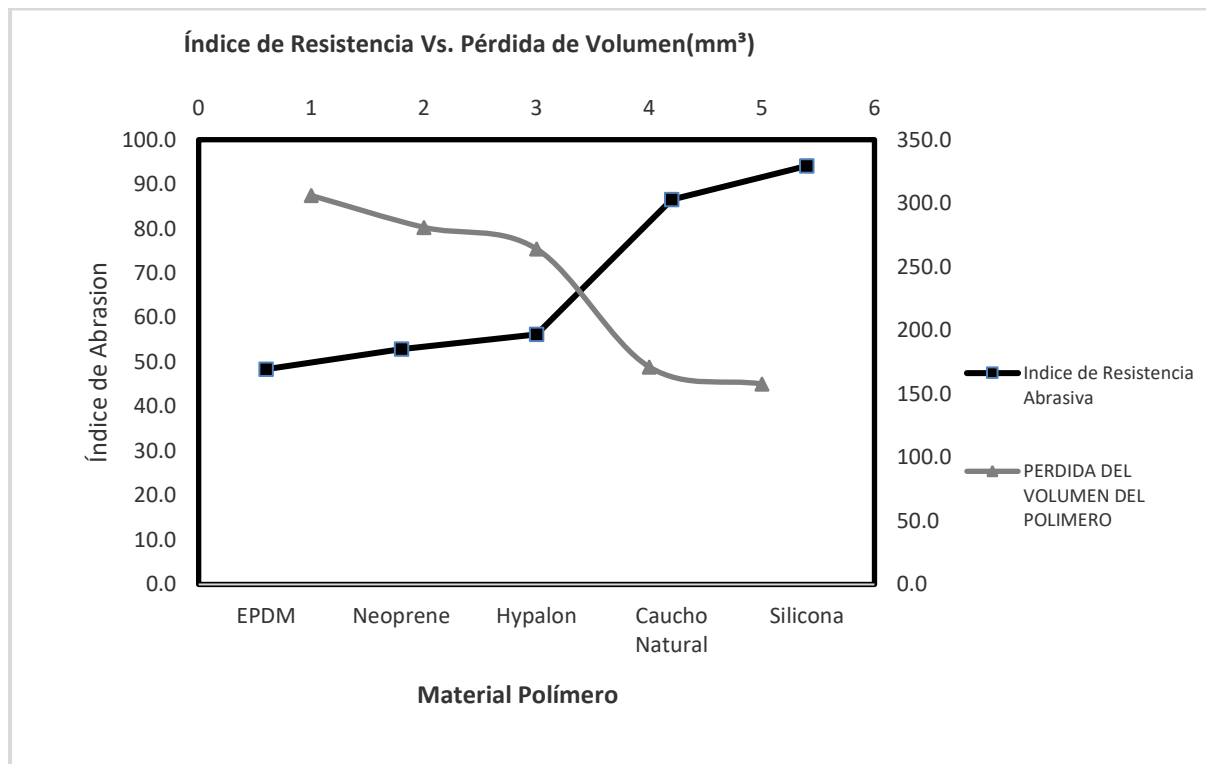


Posteriormente, se calcula la pérdida de volumen comparado con su respectivo índice de abrasividad. La pérdida de volumen nos brinda un indicativo de la pérdida de espesor en cada polímero sometido a prueba de abrasión.

Los datos obtenidos de la prueba se grafican en la Figura 35.

Figura 35

Índice de Resistencia vs Pérdida de Volumen (mm³)



5.1.2 Pruebas de Confirmación de Corrosión de los 5 Polímeros antes de someterlos a la lixiviación (Laboratorio de Análisis Mineral de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos– Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – Facultad de Ingeniería Geológica, Minería, Metalúrgica y Geológica)

Se efectuaron pruebas de confirmación de la degradación química de 5 muestras de polímeros de dimensiones 50 mm largo x 10 mm ancho x 6 mm colocados en una luna de reloj para ser sumergidos en un vaso Beaker de laboratorio de 1,000 ml, dentro de una solución de 400 mililitros de ácido sulfúrico diluido al 10% y con un PH de solución de 1.0. El vaso Beaker con la solución ácida y los 5 polímeros se colocaron sobre un calentador eléctrico para elevar la temperatura a 70 °C por espacio de 30 días (ver la Figura 36).

Figura 36

Ubicación de los Polímeros en la Luna de Reloj



Figura 37

Ubicación de los Polímeros dentro del Vaso Beaker de 800 mls

**Figura 38**

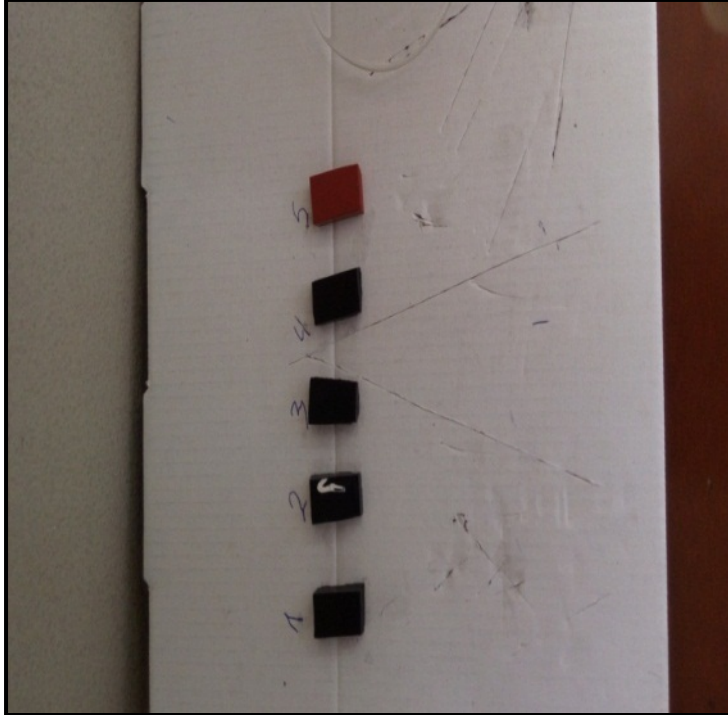
Prueba de corrosión de los polímeros en solución de ácido sulfúrico diluido al 10% en el calentador eléctrico a 70 °C



Figura 39

Muestra de polímeros después del ataque con ácido sulfúrico a temperatura de 70

°C



Para el peso de las muestras después del ataque químico (corrosión) se lleva a cabo con una Balanza **METTLER TOLEDO Modelo AE160**, que nos permite dar valores con precisión de hasta 3 milésimas de gramo.

Figura 40*Balanza Mettler Toledo Modelo AE160*

Los métodos existentes de prueba estándar ASTM para los polímeros son:

ASTM internacional ha diseñado y desarrollado un número de métodos experimentales para determinar las propiedades de los polímeros bajo varias condiciones. Los siguientes métodos de prueba estándar pueden ser aplicados a fin de investigar la degradación los polímeros. Sin embargo, estos métodos no fueron particularmente diseñados para medir la degradación química de los polímeros. A continuación, se describe algunos métodos:

- Métodos de prueba para degradación de polímeros por calor y oxígeno D572.
- Métodos de prueba estándar para el deterioro de polímeros por calor y presión de aire D454-04.
- Métodos de prueba para el deterioro de polímeros por calor y luz ultravioleta D1148-95 (2001).
- Métodos de prueba estándar para polímeros – evaluación de BIIR y CIIR D3958-00.

Hay muy poca información disponible sobre las interacciones entre desgaste y degradación y ninguna prueba estándar ASTM se direcciona directamente con este

tema. Asimismo, los métodos de prueba estándar no simulan las condiciones existentes en el proceso de lixiviación industrial. Esto es porque un método experimental fue establecido para determinar las propiedades cambiantes del polímero bajo la influencia de los procesos termoquímicos. El método de prueba D 2240-04 fue empleado para examinar el cambio en la dureza de los polímeros (SHORE A) a intervalos de tiempo durante la prueba.

La prueba no propone examinar las interacciones entre el desgaste y la degradación. Lo cual es limitado en el alcance de examinar los cambios en el comportamiento mecánico de los polímeros durante la inmersión en la solución de ácido sulfúrico.

Las pruebas de corrosión sometidas a los cinco polímeros en estudio se efectuaron en el Laboratorio de Análisis Mineral de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, los resultados se muestran en la siguiente Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de pruebas de corrosión con ácido sulfúrico a los 5 polímeros en estudio

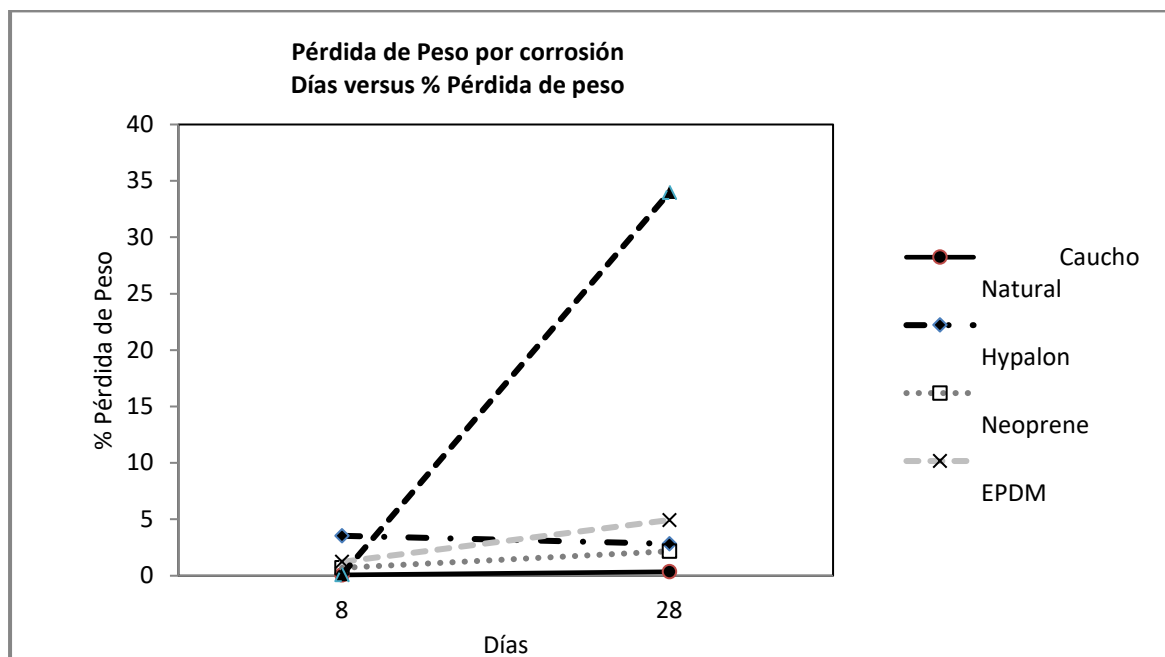
Polímero	Dureza SHORE A		Pérdida de Espesor (mms)		Pérdida de masa (grs)	
	Sin ataque ácido	Con ataque ácido	8 d	28 d	8 d	28 d
Caucho Natural	45.25	45.67	0.1	0.0	0.00100	0.0103
Hypalon	48.83	67.00	0.2	0.1	0.0614	0.1104
Neopreno	45.92	64.50	0.1	0.1	0.0123	0.0819
EPDM	51.25	54.09	0.1	0.3	0.0200	0.1597
Silicona	46.83	58.25	0.1	0.1	0.0018	1.2986

Condiciones de la Prueba: 400 mililitros de ácido sulfúrico diluido al 10%, PH de solución: 1.0, temperatura de solución: 70 °C, tamaño de muestras de polímeros de dimensiones 50 mm largo x 10 mm ancho x 6 mm (condiciones recomendadas en la tesis de maestría “**Abrasion Failure of Lining Rubber on Agitator Blades in the Leaching Circuit of Mineral Processing Industries**”, autor **A.K.M. Shamsul Huda Akan**, marzo 2005).

Los gráficos siguientes se plotean con la finalidad de poder evaluar la pérdida de propiedades de los polímeros en estudio, en la **Figura 41** se permite estudiar la pérdida de peso y cambio en sus propiedades físicas en el lapso de 30 días que es el adecuado en el proceso industrial. Este fenómeno es conocido como “**degradación del polímero**” (Polymer degradation).

Figura 41

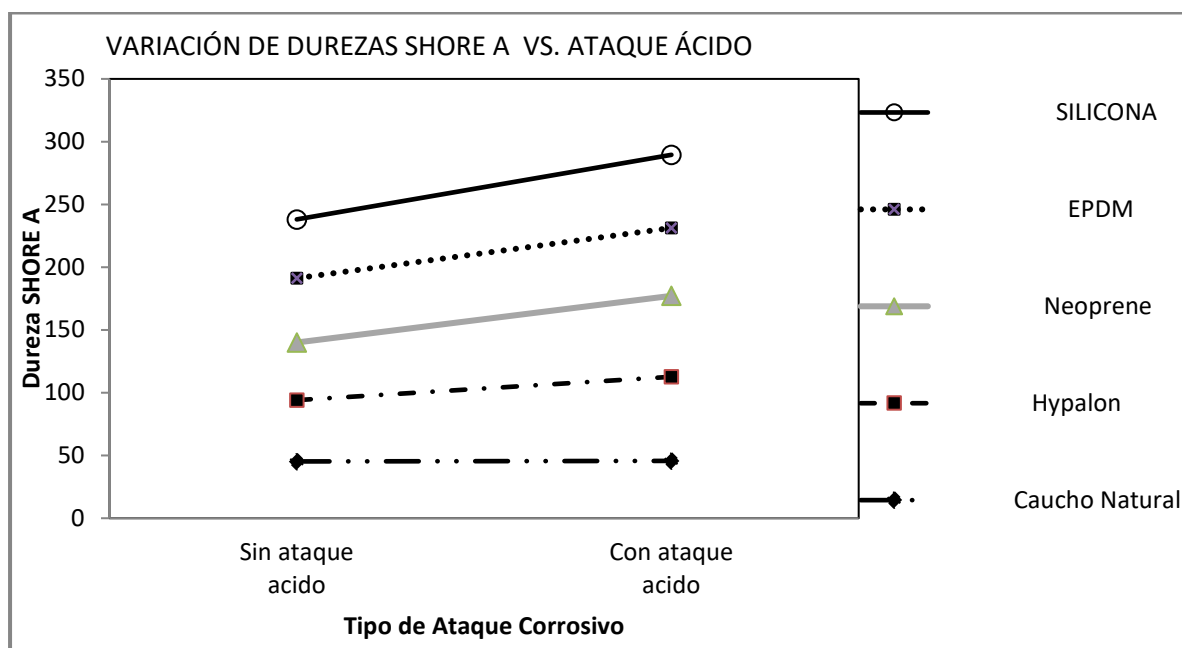
Pérdida de Peso por corrosión días versus % Pérdida de Peso



En la Figura 42, se grafica una de las propiedades más importantes en estudio, la dureza de cada uno de los cinco polímeros sin ser sometidos al ataque químico y luego del ataque químico.

Figura 42

Variación de Durezas Shore A vs Ataque Acido



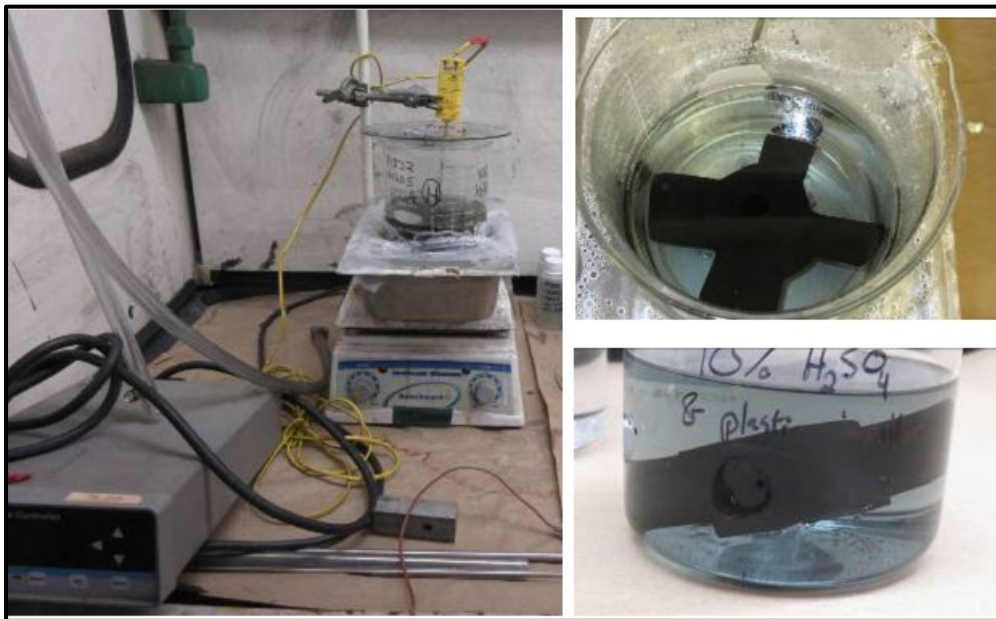
5.1.3. Pruebas de desgaste durante la lixiviación

Las pruebas de erosión fueron efectuadas sobre 5 impulsores revestidos de diferentes polímeros (Muestra A y H) para determinar la pérdida de masa. Los impulsores fueron primeramente sumergidos dentro de un vaso Beaker de 2 litros con una solución de 10% H_2SO_4 (ácido sulfúrico) a $45^\circ C$ por 14 días para “**acondicionamiento**” del polímero al desgaste ácido y luego ser transferido a un tanque agitador para pulpa (pulpa de mineral más agua) mientras gira a 800 rpm por un periodo de tiempo adicional de 14 días para inducirlos a abrasión/erosión. La pérdida de masa fue determinada a diferentes periodos de la prueba de erosión.

Los materiales empleados para la prueba de acondicionamiento (ataque ácido) a nivel de laboratorio, son el vaso Beaker de vidrio de 2 litros y el agitador forrado en su respectivo polímero, mostrados en la siguiente Figura 43.

Figura 43

Prueba de Acondicionamiento a nivel de Laboratorio



El mineral empleado para la prueba de erosión fue tamizado para tener las fracciones de partículas más grandes que 4 mm y menores que 4 mm. El mineral mayor al tamaño de 4 mm fue reducido por chancado a menos de 2 mm de diámetro, el cual equivalía a 23.2% del material total. La pulpa preparada constaba de 10.00 kg. de agua, 1.55 kg de material chancado (originalmente < 4 mm), y 5.12 kg de material homogéneo (> 4 mm).

Las características del mineral en estudio se encontrarán en la Tabla 10 inferior adjunta, con la cual se efectuaron las pruebas de desgaste.

Tabla 10

Características del Mineral Plata – Manganeso en estudio

Características del Mineral en Estudio		
Gravedad Específica del mineral	gr/cm ³	3.2
Sólidos	%	40
Ph		7.0
Densidad de pulpa	gr/cm ³	1.38
Tamaño de partícula	micrones	75
Mineralogía		Silicatos manganeso plata cobre

Luego del acondicionamiento químico, los impulsores fueron empleados para ser usados en el tanque de erosión. El nuevo peso del impulsor se registró después de esta modificación. El impulsor se empernó al eje con dos grupos de llaves de dados y colocados en el tanque con la pulpa. El peso del tanque fue monitoreado, y la velocidad del impulsor fue colocado a 800 RPM durante los 14 días de la prueba de erosión. Luego el peso del tanque se registra y se completa con tanta agua como sea necesaria para mantener una cantidad consistente de pulpa en toda la prueba. La masa del impulsor, junto con las fotografías se toma en 2, 7 días y 14 días de la prueba de erosión. Antes de pesar y tomar las fotografías a los 2 y 7 días, el impulsor fue extraído del tanque, lavado muy suavemente con agua y luego secado con papel filtrante frotando suavemente la superficie para limpiar cualquier liquido residual. Igual procedimiento fue efectuado en 14 días, luego el impulsor se dejó fuera para secar por unos pocos días, para luego pesar la masa final.

Para mantener un control de la velocidad de rotación a 800 R.P.M se emplea un tacómetro digital de la marca **NEIKO USA**, cuyas características de operación son las siguientes:

- Alta Visualización por LCD.
- Rango amplio de medida y alta resolución.
- Visualización digital que brinda una velocidad exacta en R.P.M. sin error alguno.
- El ultimo valor valor/máx. o valor/min. será automáticamente almacenado en la memoria y puede ser visualizado en cualquier momento.

Las especificaciones del tacómetro empleado son las siguientes:

Visualización	: 5 dígitos, 16 mm (0.7") LCD
Rango de prueba	: 2.5 a 99,999 R.P.M (r/min).
Resolución	: 0.1 RPM (2.5 a 999.9 R.P.M) 1 RPM (sobre 1,000 RPM)
Exactitud	: 0.05%
Tiempo de muestreo	: 0.2 segundos
Selección de rango de prueba	: Automático
Memoria	: Valor Máximo, Valor mínimo. Último valor
Distancia de detección	: 50 a 200 mm
Tiempo base	: Oscilador de cristal de 4 MHz
Circuito	: Un chip exclusivo del circuito LSI de Microcomputadora.
Batería	: 3 x 1.5VAA.

Primeramente, se procedió a pesar cada uno de los impulsores previo al acondicionamiento químico y se tomaron fotos en detalle de los álabes de los impulsores. Las fotos tomadas correspondían ambos lados del impulsor (SUPERIOR e INFERIOR). Los impulsores inicialmente acondicionados en la solución de ácido sulfúrico y precalentados dos horas antes en un calentador eléctrico cuya temperatura de 45 °C se mantuvo constante, se chequea constantemente la temperatura y se agregó volúmenes adicionales a la solución

para compensar la evaporación. Luego de 14 días de acondicionamiento, el impulsor fue extraído del vaso Beaker y enjuagado unas 10 veces con 200 mililitros de agua desionizada para lavar la solución acida residual.

Antes de registrar la masa final, la muestra fue secada con papel filtrante para extraer cualquier alícuota de líquido residual, dejándolo secar toda la noche. Se tomaron fotografías repetitivas en detalle sobre el impulsor para documentar cualquier cambio superficial.

El orden de los impulsores probados fue A, B, C, D, E y F después de las cuatro pruebas de erosión, la pulpa se removió del tanque y una pulpa fresca fue preparada.

Tabla 11

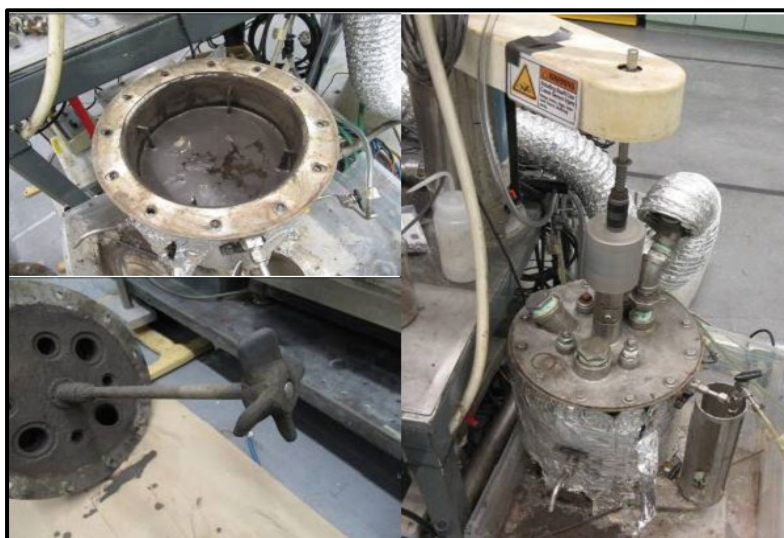
Codificación de Polímeros

Codificación de polímeros	Polímeros
A	Neopreno
B	EPDM
C	Silicona
D	Hypalon
E	Caucho Natural

En la Figura 44, se muestra el tanque agitador empleado el cual es un reactor cerrado forrado en papel metálico para mantener la temperatura de la pulpa y evitar fuga de gases de la reacción o por el desgaste por erosión y abrasión de los polímeros al estar en contacto con las partículas de mineral, de tal manera de evitar la contaminación ambiental.

Figura 44

Tanque agitador para las pruebas de erosión y abrasión

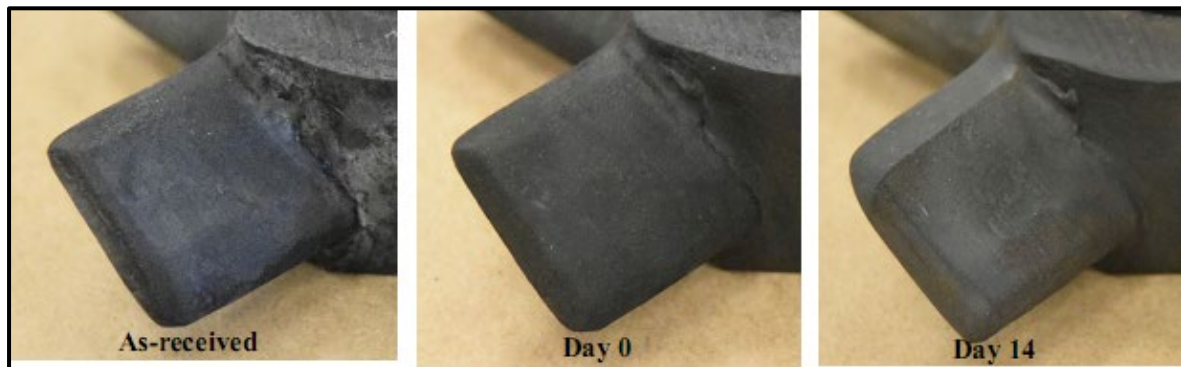


Adicionalmente, se tomaron fotos de los álabes de los diferentes impulsores forrados con los cinco polímeros en estudio desde el día “cero” de agitación hasta el día final “catorce” de duración de las pruebas de agitación, con lo cual nos permitía observar el desgaste por erosión y abrasión. De tal manera que nos permitía registrar el avance en la pérdida de las propiedades de los polímeros, así como la degradación de cada uno de los polímeros, una observación visual nos indicaría el avance del desgaste en las pruebas, durante todo el tiempo de agitación.

Las fotos tomadas muestran visualmente las zonas desgastadas, denotando áreas pulidas, fracturas, grietas o fisuras en cada uno de los polímeros después de las pruebas de ataque ácido y erosión-abrasión en las siguientes figuras a continuación en las Figuras 45, 46, 47,48 y 49:

Figura 45

Fotos de los Impulsores Forrados en Neopreno

**Figura 46**

Fotos de los Impulsores Forrados en EPDM

**Figura 47**

Fotos de los Impulsores Forrados en Silicona



Figura 48

Fotos de los Impulsores Forrados en Hypalon

**Figura 49**

Fotos de los Impulsores Forrados en Caucho Natural



Las curvas de desgaste por erosión y abrasión de los polímeros en estudio se llevaron a cabo en 14 de agitación a 800 R.P.M. en el vaso Beaker con mineral de características metalúrgicas mencionadas en la Tabla 10 y empleando impulsores revestidos con los cinco polímeros en estudio mostrados en la Tabla 11.

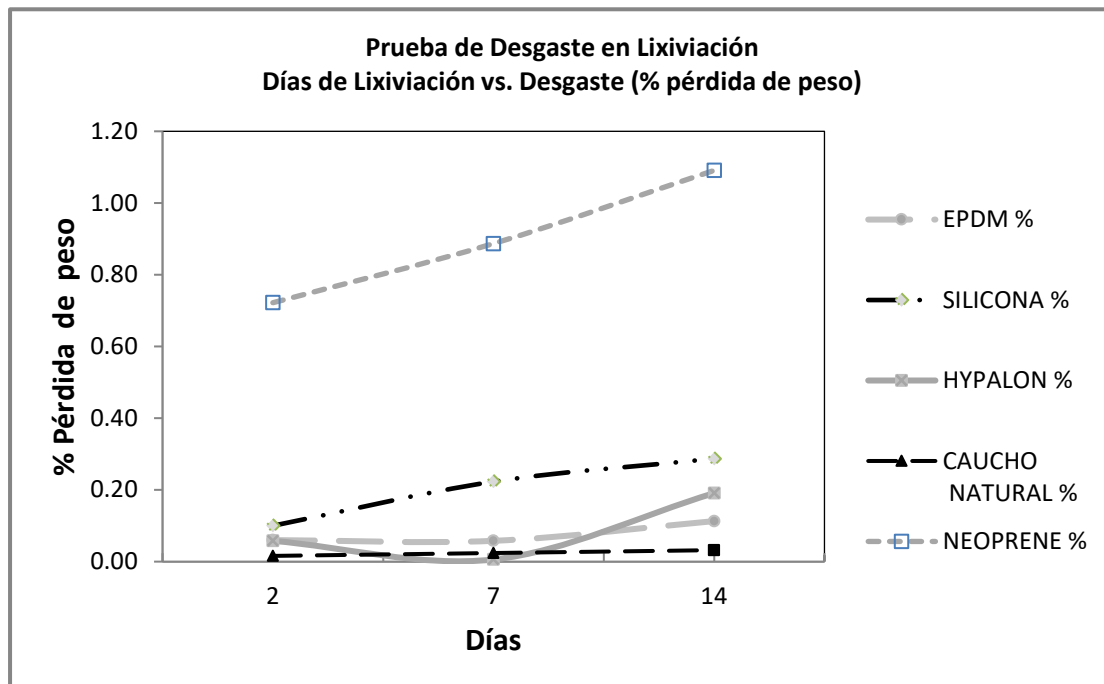
Después de un periodo de 2 y 7 días de agitación, se retiraron los impulsores y se secaron con papel filtrante, dejándose reposar por 3 días para su secado al medio ambiente, asimismo, en este tiempo se tomaron las respectivas fotografías.

En la siguiente Figura 50, las curvas graficadas nos permiten observar el desgaste para cada impulsor forrado en cada polímero en estudio debido al desgaste ocurrido por erosión-abrasión en días versus % pérdida de peso.

Figura 50

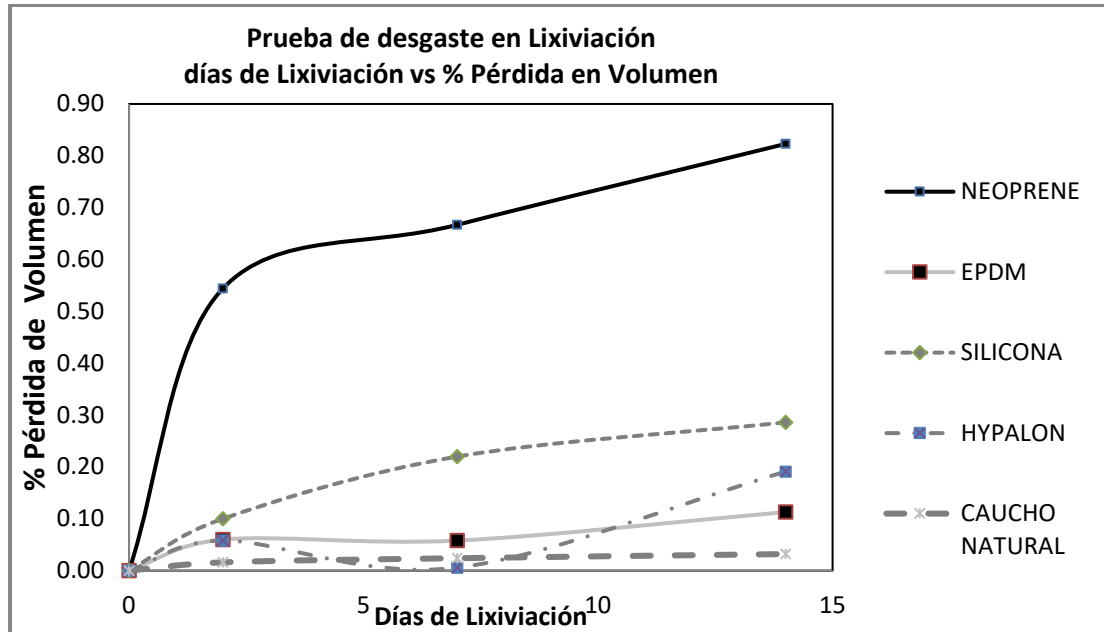
Prueba de Desgaste en Lixiviación en pulpa de mineral

Días de Lixiviación vs Desgaste (% Pérdida de Peso)



Se grafica la pérdida de volumen en porcentaje para cada polímero a través del tiempo (días de lixiviación con pulpa de mineral) en la siguiente Figura 51.

Figura 51

Prueba de Desgaste en Lixiviación con pulpa de mineral*Días de Lixiviación vs % Pérdida de Volumen*

Para la medida de los espesores se empleó el medidor de espesor **Ultrasónico CE FC Standard**: Q/GMY 003-2016, Versión 100-EN-05, sus especificaciones de operación son como sigue:

Visualización : 4-digital LCD display

Unidad mínima de visualización: 0.1 mm

Frecuencia de trabajo : 5 MHz

Rango de medida : 1.2 a 225.0 mm (acero)

Exactitud : +/- (1%H+0.1) mm H denota la medida del espesor.

Rango de velocidad de sonido : 1000 a 9999 m/segundo.

Temperatura de Operación : 0 °C a 40 °C

Suministro de poder : 3*1.5V AAA baterías alcalinas

Corriente normal de operación : ≤ 50 mA, con luz de encendido a una

Corriente

≤ 120 mA y corriente de standby $\leq 20\mu\text{A}$.

Para mediciones encima de 20 mm, la exactitud es $\pm 1\%$; cuando el espesor dado es menor a 20 mm, la exactitud es $\pm 5\%$.

Se procede con la calibración del equipo previo a efectuar las mediciones, se toma una muestra de cada uno de los polímeros fijando la velocidad de sonido, el cual se almacena en la memoria del medidor de espeso. Para los polímeros es en promedio 2620 m/segundo, se limpia la superficie de polímero para ser medido con una solución de thinner (recomendable emplear un agente de alta viscosidad), debido a que, si la rugosidad es muy alta debido al polvo residual, la medición errada puede ocurrir.

Dado que la cubierta de los revestimientos sobre los álabes es paralela a la matriz metálica, no habría falla en la medición.

Las mediciones se efectúan empleando un transductor (pastilla de metal) colocando una silicona líquida sobre su superficie y la superficie del polímero a medir, para que pueda adherirse muy bien durante las mediciones. Este procedimiento se repite para cada medición. **(Ver foto N°2 del anexo).**

Luego, se procede a medir la dureza (SHORE A) en cada uno de los álabes forrados en los cinco tipos de polímeros en estudio. Para efectuar las mediciones empleamos un **Durómetro modelo LX-A, C, D Type Digital durometer, marca CE FC USA** cuyas mediciones se efectúan de acuerdo al **Standard DIN53505, ASTM D2240 ISO/R868, JIS R7215** y permite efectuar mediciones desde 0 – 100 HA, para lo cual emplea un indentor de 0,2.5 mm. El presente durómetro permite llevar a cabo mediciones de dureza de acuerdo a su código **A** para caucho normal, caucho suave,

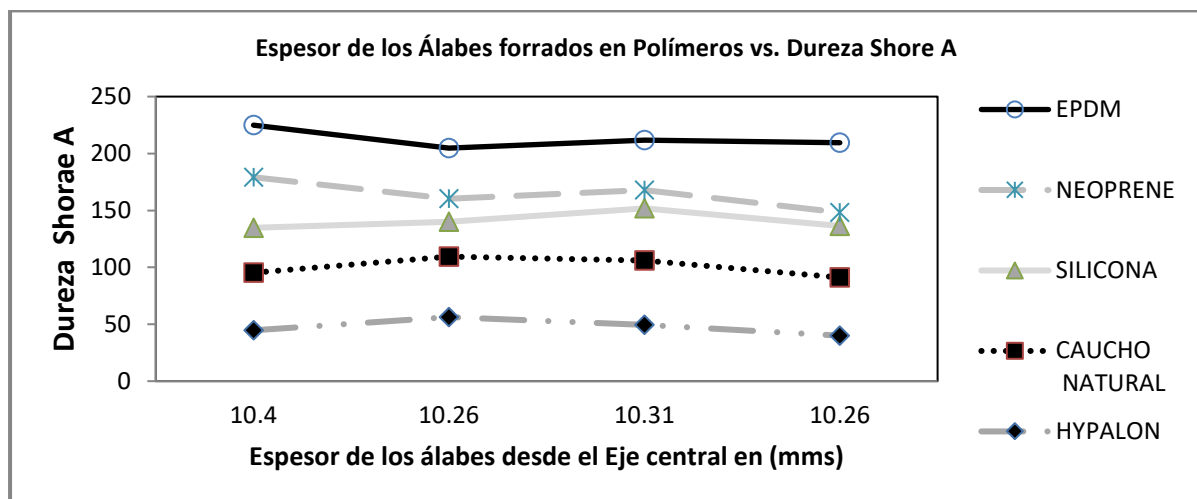
resina dura, acrílico, poliéster, fibra etc., y su código **D** referido a caucho duro, resina dura, acrílico, vidrio, fibra y etc.

El procedimiento de empleo del durómetro para efectuar las pruebas de dureza se hace colocando la muestra sobre un plano estable, colocar el indentor a la distancia de 12 mm de la muestra de polímero a medir, luego presionar el indentor en dirección perpendicular contra la muestra en forma suave hasta que se introduzca completamente dentro de la muestra de polímero, medir la dureza al menos 5 veces en diferentes lugares distanciados a 15 mm cada uno.

Asimismo, debido al desgaste fue necesario medir la variación del espesor de los revestimientos polímeros en los 5 impulsores con respecto a la pérdida de volumen a los 14 días de finalizar las pruebas de erosión, de esta manera se elaboró el Figura 52.

Figura 52

Espesor de los Álabes forrados en Polímeros vs Dureza Shore A



La función que indica el comportamiento del desgaste de los polímeros es la ecuación de **WEIBULL**, los gráficos siguientes fueron obtenidos considerando el

porcentaje de variación de peso de cada uno de los polímeros sobre los álabes durante la agitación por 14 días, para lo cual se procede a extraer el eje y álabe del agitador por cada día, luego quitar el tornillo de sujeción de los impulsores con el eje del agitador por cada día de agitación los cuales se extraen al final del día y se proceden a secar las muestras por un espacio de un día, para luego realizar el pesaje empleando la balanza **METTLER TOLEDO Modelo AE160**, que permite dar valores en peso con precisión de hasta 3 milésimas de gramo.

De esta manera se puede obtener los datos del desgaste por erosión, que permite graficar sus valores en el Eje X (número de experimento por tiempo en días) y en el Eje Y (% pérdida de peso por cada tiempo de prueba) para ser ajustados linealmente y así permitir estudiar el comportamiento del desgaste, en tal manera de poder emitir las conclusiones respectivas.

Asimismo, se calcula el coeficiente de correlación (R^2) y las ecuaciones lineales de Weibull para cada polímero en estudio, se considera la **función Y (GAMMA)** mayor que **1**, que corresponde a la falla por desgaste con el tiempo.

A continuación, se detalla los gráficos de las curvas de las ecuaciones de **WEIBULL** para cada uno de los polímeros en las Figuras 53 – 57.

Figura 53

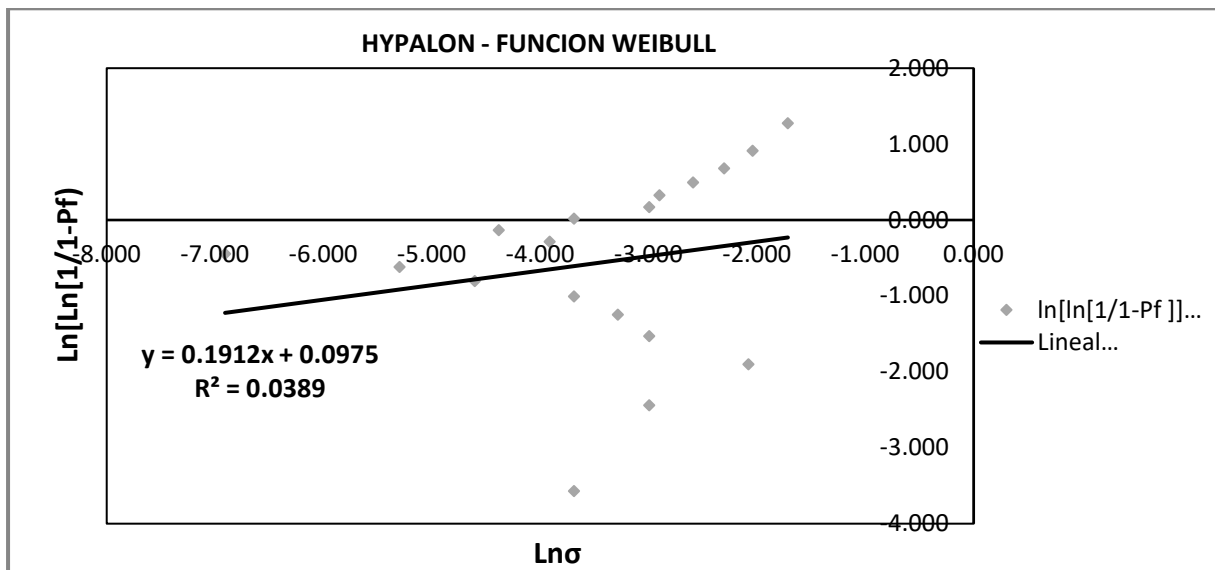
Hypalon – Función Weibull

Figura 54

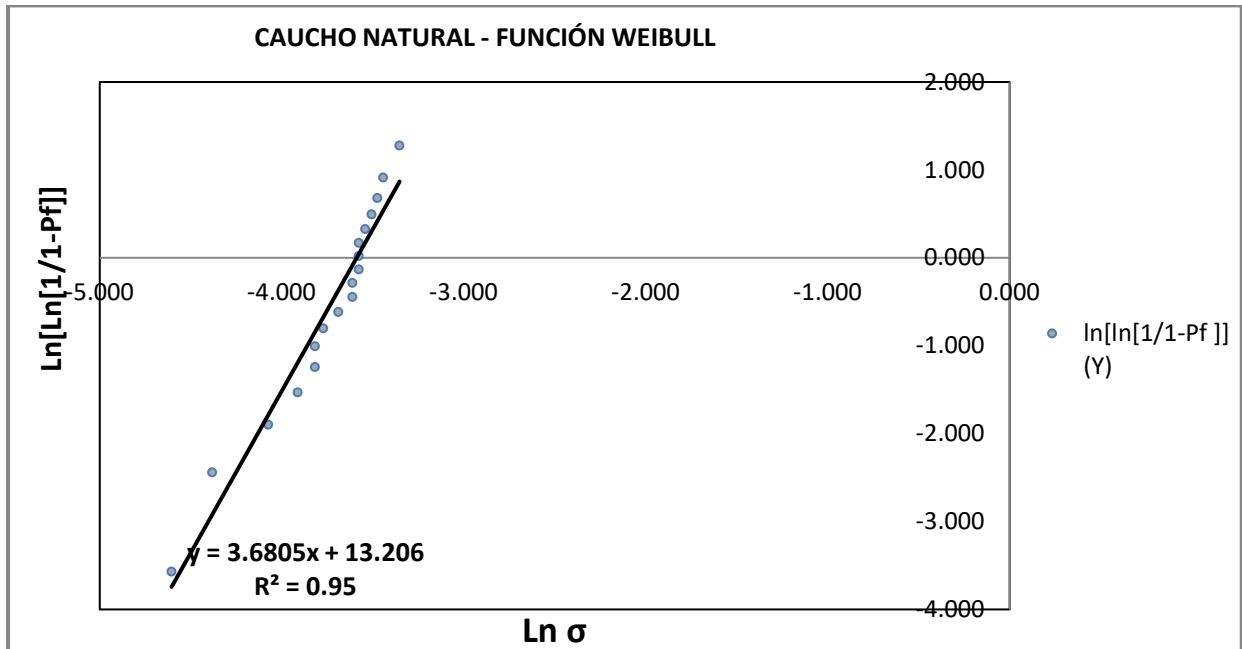
Caucho Natural – Función Weibull

Figura 55

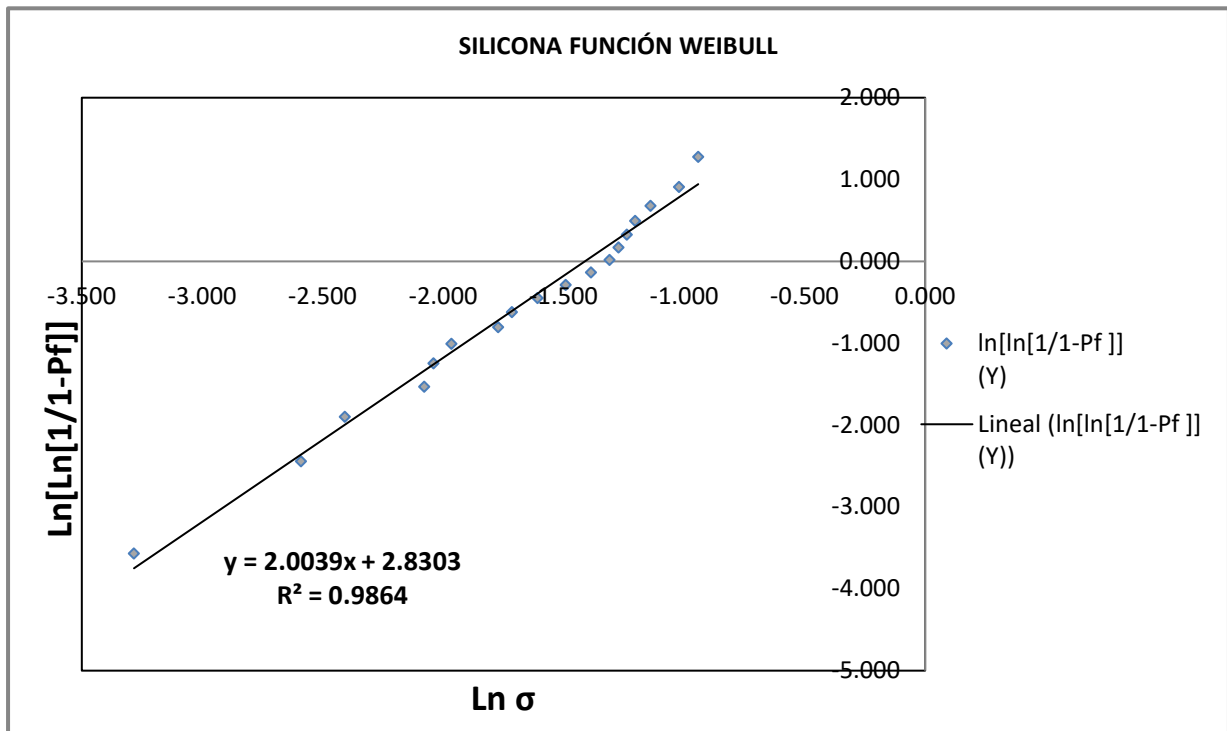
Silicona – Función Weibull

Figura 56

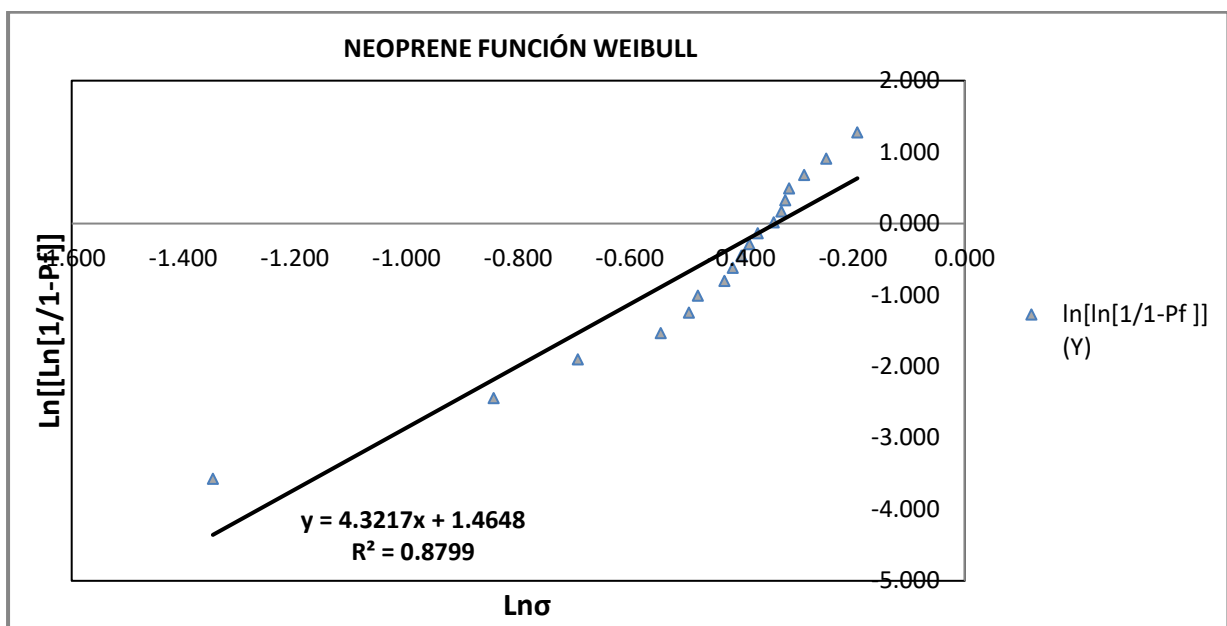
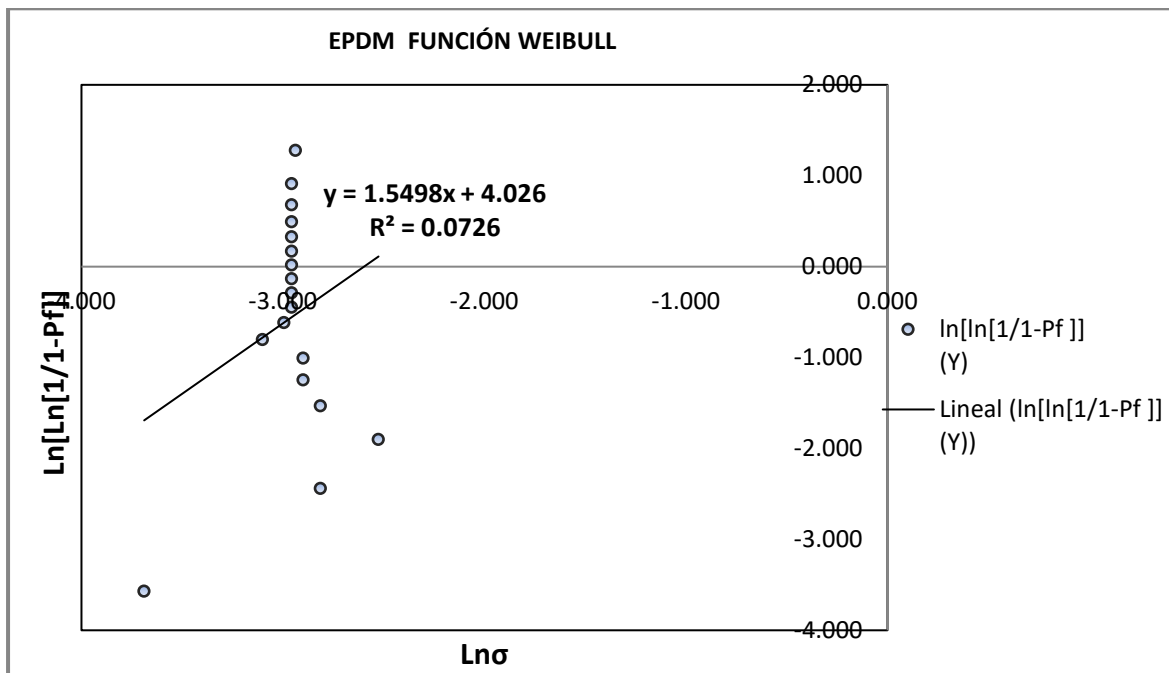
Neopreno – Función Weibull

Figura 57

EPDM – Función Weibull

Debido a que los datos obtenidos durante las pruebas de erosión/abrasión brindaron datos al azar por el impacto de las partículas de mineral sobre los álabes forrados por los polímeros en estudio, deben ser ajustados por la **Ecuación de WEIBULL**.

A continuación, en la Tabla 12 un resumen de estas ecuaciones y sus respectivas curvas obtenidas:

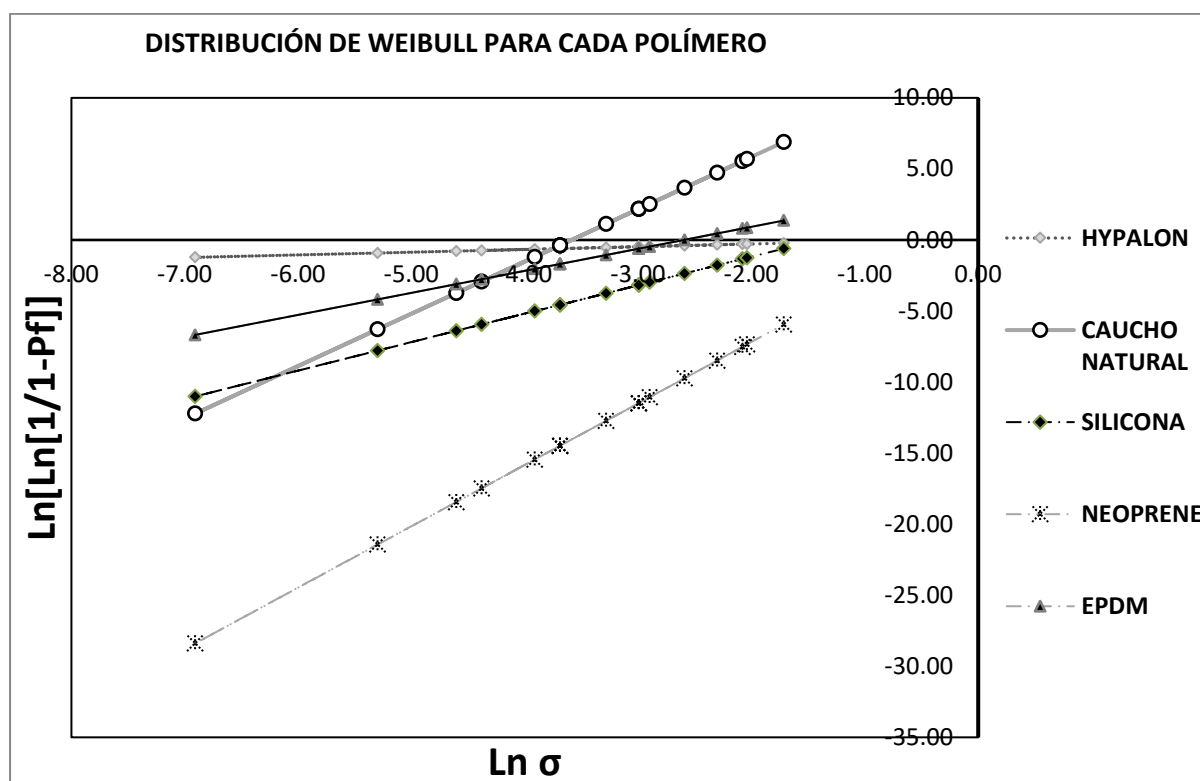
Tabla 12

Resumen de Ecuaciones Lineales Weibull y sus parámetros obtenidos

Polímero	α	B	Y	R ²	Formula
Hypalon	0.6004	0.1912	1.488	0.1912	$Y= 1-e[-(\sigma/0.6004)^{0.1912}]$
Caucho Natural	0.0276	3.6805	35.681	0.9500	$Y= 1-e[-(\sigma/0.0276)^{3.6805}]$
Silicona	0.2436	2.0039	3.726	0.9864	$Y= 1-e[-(\sigma/0.2436)^{2.8303}]$
Neoprene	0.7125	4.317	1.2790	0.8799	$Y= 1-e[-(\sigma/0.7125)^{4.3217}]$
EPDM	0.744	1.5498	12.933	0.0726	$Y= 1-e[-(\sigma/0.744)^{1.5498}]$

La Figura 58, muestra un gráfico resumen para cada polímero obtenido de la Distribución de WEIBULL para la pérdida de peso por unidad de tiempo.

Figura 58
Distribución de Weibull para cada polímero



La velocidad de desgaste de la pérdida de peso (gramos) en el tiempo es un valor que debe ser calculado para estimar el desgaste en el tiempo de los cinco polímeros

que permite predecir su comportamiento y durabilidad o degradación, de tal manera que es necesario graficar los datos obtenidos en las diferentes pruebas y dado el impacto al azar de las partículas de mineral en estudio se puede estimar su tendencia en el tiempo, asimismo se calcula la correlación para cada curva y su fórmula de tendencia.

Finalmente, se construyen las diferentes gráficas, desde las Figuras 59-64 considerando la velocidad de desgaste medido en pérdida de masa de cada uno de los polímeros en función al tiempo de agitación (14 días) cada una de ellas con sus curvas de tendencia y su coeficiente de regresión R^2 , luego se obtendrá un gráfico resumen de todas las velocidades de desgaste de los polímeros en estudio.

Figura 59

Velocidad de desgaste del Neopreno

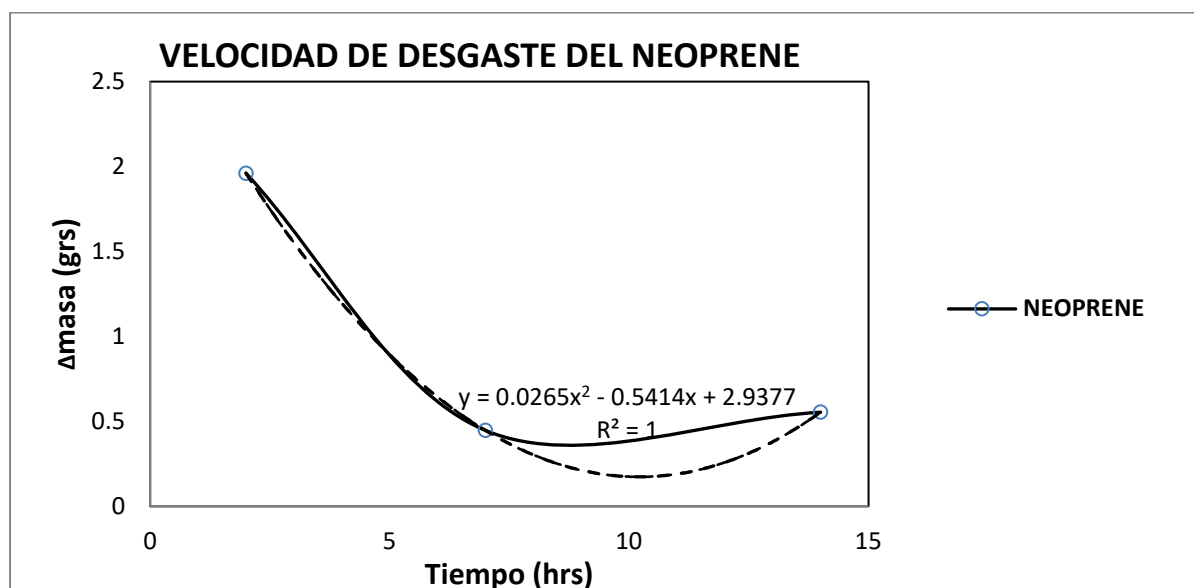


Figura 60

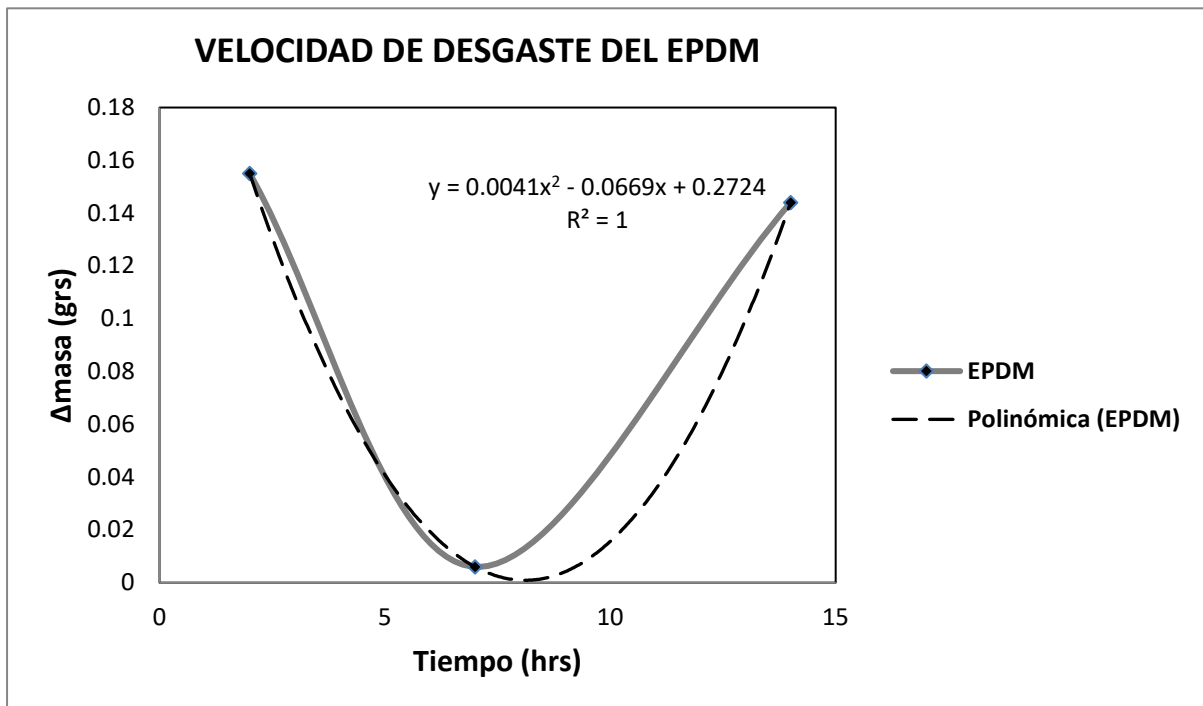
Velocidad de desgaste del EPDM

Figura 61

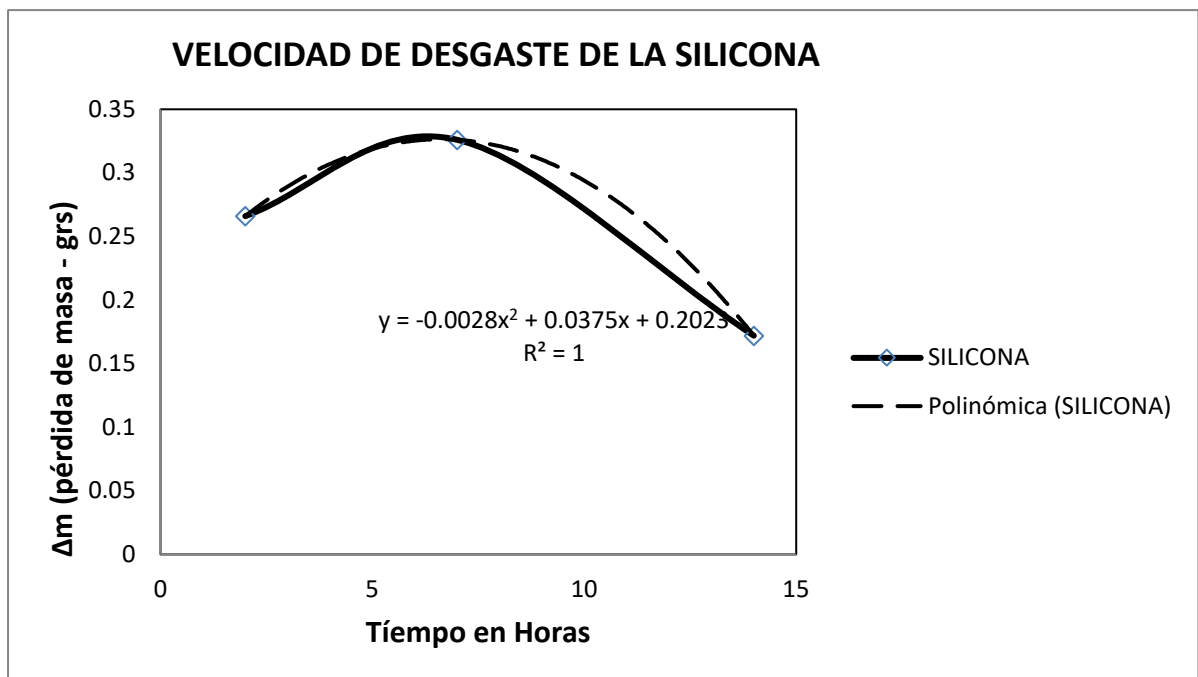
Velocidad de desgaste de la Silicona

Figura 62

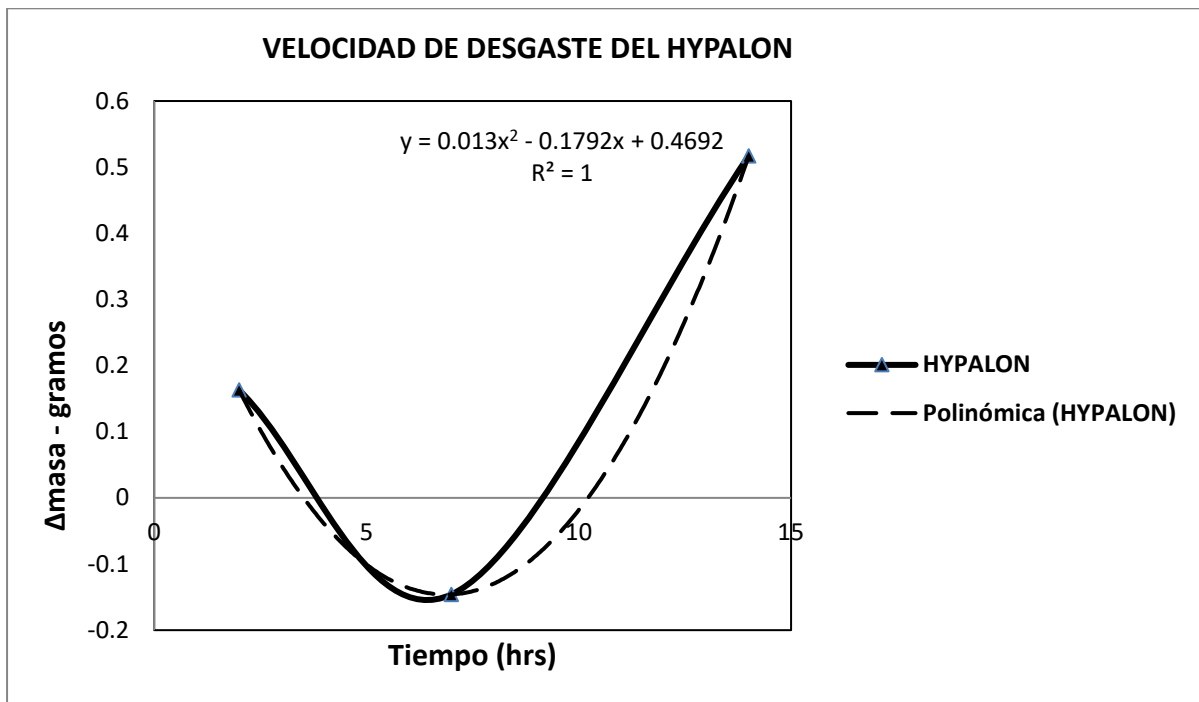
Velocidad de desgaste de Hypalon

Figura 63

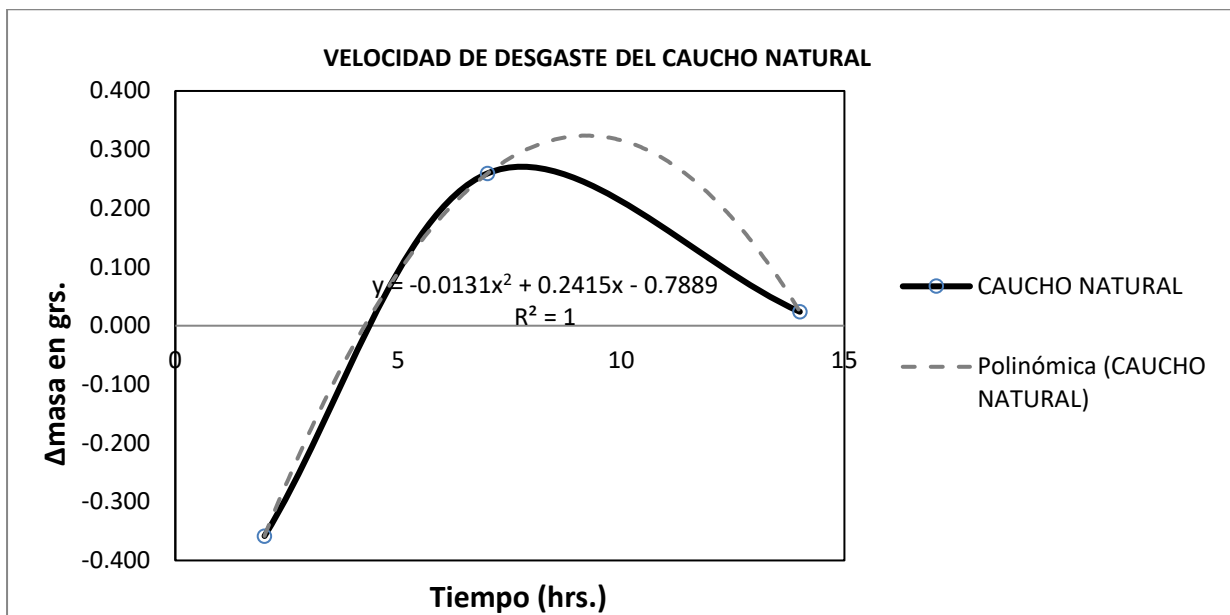
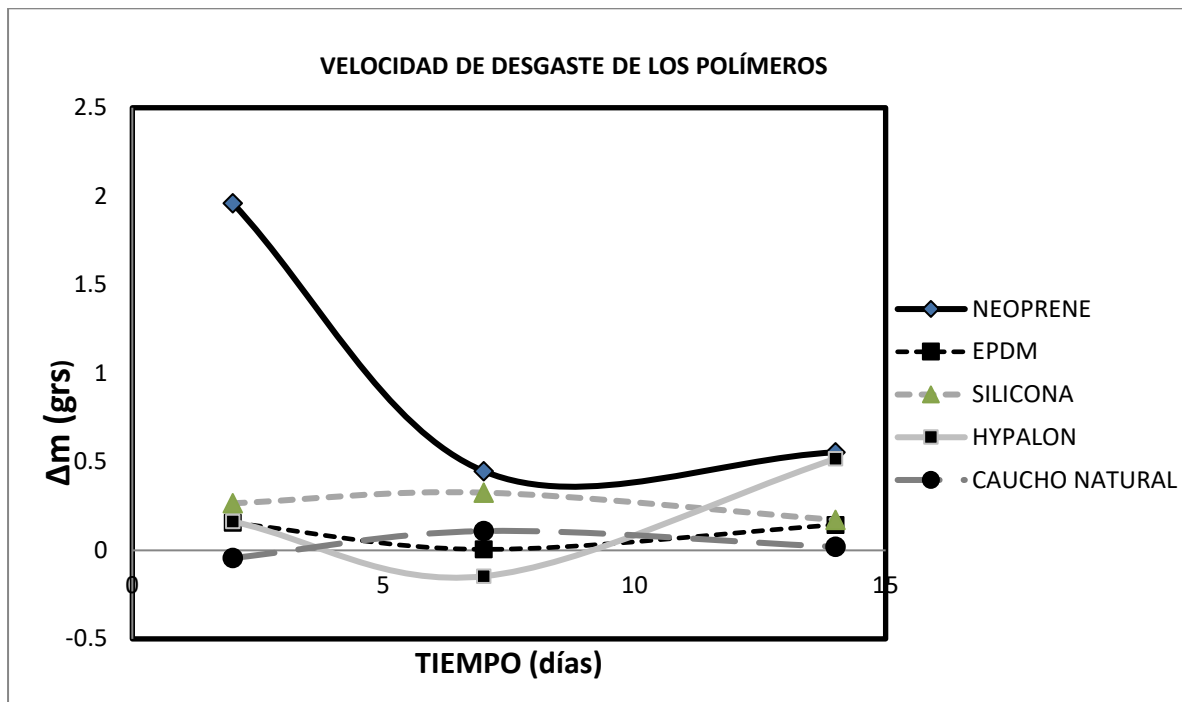
Velocidad de desgaste del Caucho Natural

Figura 64*Velocidad de desgaste de los 5 Polímeros*

Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

Debido al elevado volumen de trabajo en esta tesis, se brindarán las conclusiones en forma separada bajo las siguientes secciones.

Análisis de desgaste visual de los impulsores revestidos en los cinco polímeros durante el acondicionamiento con ácido sulfúrico y prueba de erosión en tanque agitador

El impulsor **A forrado en neopreno** mostrado en la **Figura N° 45**, después del acondicionamiento presentaron zonas claras y oscuras sobre la superficie, y después de los 14 días de la prueba de erosión muestra una superficie más limpia y las características superficiales más suaves, existe una evidencia de desgaste en el borde del álabe, las rugosidades presentes aparecen de manera más suave. El impulsor **B forrado en EPDM** mostrado en la **Figura N° 46** no sufre mucho cambio durante el acondicionamiento, sólo se observa zonas claras y oscuras, sin embargo, durante la prueba de erosión después de 14 días existe desgaste en el borde superior del álabe. El impulsor **C forrado en silicona** mostrado en la **Figura N° 47** muestra muy poco desgaste después del acondicionamiento y después de 14 días de erosión.

El impulsor **D forrado en hypalon** de la **Figura 48** muestra zonas de poco pulido después del acondicionamiento y de la prueba de erosión. Finalmente, el impulsor **E forrado en caucho natural** de la **Figura N° 49** mostró un pulido suave después del acondicionamiento y durante la prueba de erosión en tanque por 14 días, presentó desgaste suave de su superficie.

Desgaste durante la lixiviación

Se observa que los polímeros que muestran menor pérdida de peso al final de los 14 días de pruebas de lixiviación (**Figura N° 50**) ordenados en forma creciente son: **caucho natural, EPDM, hypalon, silicona y neopreno**.

Las pérdidas de volumen del material de los cinco polímeros en estudio (**Figura N° 51**) muestran que los polímeros con menor pérdida en peso mantienen una relación directamente proporcional con la pérdida de su volumen debido a su menor peso específico (**Anexo**).

Los valores de los índices de abrasividad de los polímeros (**Tabla N° 8**), confirman comparativamente que los polímeros más resistentes al desgaste por abrasión serán los siguientes en orden decreciente **silicona (94.10%), caucho natural (86.50%), hypalon (56.20%), neopreno (52.90%)** y finalmente **EPDM (48.40%)**.

Los resultados de la prueba de corrosión de los cinco polímeros (**Tabla N° 9**) después de 28 días de ataque por corrosión química con ácido sulfúrico, muestran que el **caucho natural** tiene menor pérdida de peso (0.0103 gramos) que el **neopreno** (0.0819 gramos) y el polímero que más se degrada es la **silicona** (1.2986 gramos); también se puede observar que la dureza (SHORE A) de estos polímeros en el caso del **caucho** aumenta ligeramente de 45.25 a 45.67 y para el **neopreno** su dureza aumenta sustancialmente de 45.92 a 64.50.

Del análisis anterior, se concluye que revestir los álabes en polímero **caucho natural** es una muy buena alternativa de reemplazo con respecto al revestimiento actual en **neopreno** porque muestra el menor desgaste durante las pruebas de corrosión ácida y lixiviación (erosión y abrasión combinadamente), por consiguiente, se reducirá el costo de reponer los revestimientos de los impulsores cada tres meses.

Evaluación empleando la Ecuación de WEIBULL

El presente modelamiento nos indica una tendencia estadística de los cinco polímeros en estudio en función a su pérdida de masa por cada número de experimentos efectuado durante el tiempo de lixiviación.

Los resultados en la **Tabla 12** indican que los polímeros con un buen coeficiente de regresión R^2 tales como **silicona (0.98)**, **caucho natural (0.95)** y **neopreno (0.87)** mantienen un desgaste linealmente predecible en un tiempo de 14 días de lixiviación, mientras que los polímeros **EPDM y hypalon** presentan valores muy dispersos con un coeficiente de regresión muy bajo, se puede deber a la pérdida de sus propiedades físicas y de composición química.

Evaluación de las velocidades de desgaste (Δ m/t)

Las velocidades de desgaste para los polímeros sometidos a lixiviación (**Figura N° 64**) nos indican que son menores en un rango muy cercano el **caucho natural, EPDM y hypalon**, mientras que los polímeros de mayor desgaste son la **silicona y el neopreno** (más elevado), por lo tanto la durabilidad del **neopreno** por desgaste de la corrosión y erosión-abrasión será menor, con lo cual el ácido y las partículas del mineral lograrán ingresar a la matriz de acero de los álabes de los impulsores de los agitadores, produciendo fallas debido a la presencia de fracturas sobre la superficie o grietas por erosión.

6.2 Recomendaciones

- Efectuar más pruebas de lixiviación a temperaturas constante de la pulpa a 70°C empleando ácido sulfúrico (diluido al 10%), porcentaje de sólidos mayores a 40% y con velocidades de agitación mayores a 80 rpm.

- Las pruebas adicionales deben efectuarse a mayores tiempos de lixiviación con la pulpa ácida y a elevadas temperaturas mayores a 70°C.
- Con las pruebas sugeridas anteriormente, si se vuelve a comprobar que el **Neopreno es reemplazable**, se debe efectuar pruebas a nivel industrial y en proceso continuo durante la operación de la planta de lixiviación de plata-manganeso.
- Durante el desarrollo de las pruebas de lixiviación es adecuado efectuar un análisis de distribución de partículas de mineral para mantener esta variable homogénea durante todas las pruebas.
- Se recomienda emplear la **Ecuación de Weibull** siempre para evaluar los resultados de las pruebas de laboratorio realizadas, porque permiten indicar la tendencia a falla de los polímeros sobre los álabes de los impulsores e interpolar valores para compararlos con los otros polímeros, en un periodo de tiempo crítico.
- Se recomienda efectuar un buen secado de los polímeros después de extraerlos de los tanques de lixiviación para su correspondiente pesado, dado que los polímeros siempre absorben agua.
- Es recomendable observar y cuantificar la degradación de los polímeros luego del ataque con ácido sulfúrico para poder encontrar el inicio de la falla, como encontrar cambios en su textura superficial por efecto de la reacción química con sus elementos o partículas físicas desprendidas durante la prueba.

Bibliografía

Akan, Sh. H. (2005) *Abrasion Failure of Lining Rubber on Agitator blades in the Leaching Circuit of Mineral Processing Industries, Faculty of Engineering and Physical Systems, Central Queensland University, Gladstone, Australia.*

Camello, C., Reyes, M., A., Della Rovere, C., A., Ferrareso, N., & Carvajal, H. (2016), *Slurry erosion and corrosion behavior of some engineering polymers applied by low-pressure flame spray.* Journal of material Engineering and performance, 25 (11), 4911-4918.

Chandrasekaran, C. (2017), *Anticorrosive Rubber Lining, Practical Guide for plastics Engineers,* Elsevier Inc., 3(2017), 21-28, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-44371-5.00003-7>.

Davidson, G. (1992) *Considerations for proper sizing and material selection to optimize centrifugal slurry pump performance.* Worthington Pumps Division – Dresser Canada, 35-54.

Davidson, G., & Williams, P., G. (1992). *Developments in slurry pump technology,* Canadian Institute Of Mining, 85, 33-40.

Fassano, J., Janz, E., E., & Myers, K. (2012). *Design Mixers to Minimize Effects of Erosion and Corrosion Erosion,* International Journal of Chemical Engineering, 2012, 1-8.

Fitch, E.C. (1992), *Proactive maintenance for mechanical seals*. Oklahoma, USA: Elsevier Science Publishers Ltd.

Fukumori, K., & Kurauchi, T. (1984). *Static Fatigue of Rubbery Polymers: Statistical Approach to the Failure Process*. *Journal of Materials Science*, 19, 2501-2512.

Iwai, Y., & Nambu K. (1997), *Slurry wear properties of pump lining materials*, ELSEVIER, 210, 211-219.

Jean-Fulcrand, A. Masen, M., A., Bremmen, T., & Wong, J., S.S, (2017), *High Temperature tribological properties of polybenzimidazole (PBI)*, *Polymer*, 128 (2017), 159-168.

Ludema, K., C. & Ajayi, L. (2019), *Friction, Wear and Lubrication, a textbook in tribology*. Recuperado de <https://lccn.loc.gov/2018020485>.

Mobley, R., K. (2017), *Root cause failure analysis*, Plant engineering maintenance series, Massachusetts, USA: British Library Cataloguing-in-Publication Data.

Mukhopadhyay, A. (2016) *SEM study of worn surface morphology of an indigenous EPDM rubber*. *Polymer Testing*, 52 (2016), 167-173.

Namdeo, R., Tiwari, S. & Manepatil, S. (2017), *Optimization of High Stress Abrasive wear of Polymer Blend Ethylene and Vinyl Acetate Copolymer/ HDPE/MA –g-PE/ OMMT Nanocomposites*, Transactions of the ASME, 39(2017), 1-6.

Stevenson, A. (1985) *on the Durability of Rubber/Metal Bonds in Seawater Adhesion and Adhesive. International Journal of Malaysian rubber producers*, 5 (2), 81-91.

Taggart, A.F. (1954). *Handbook of Mineral Dressing Ore and Industrial Minerals*. New York, United States of America: John Wiley & Sons.



Tarodiya, R., & Bhupendra, G. K. (2016). *Hydraulic performance and erosive wear of Centrifugal slurry pumps*. Powder Technology, 305(2017), 27-38.

Valigi, M., C., Logozzo, S., & Rinchi, M. (2015), *Wear resistance of Blades in planetary concrete mixers. Design of a new improved blade shape and 2D*. Tribology International, 96 (2016), 191- 201.

Walker, C., I. (2001) *Slurry pump side-liner wear: comparison of some laboratory and fields results*. Elsevier, 250, 81-87.

Xie, Y. S., Jiang, J., Tufa, K., Y., & Yick, S. (2015), *Wear Resistant of Materials used for slurry transport*, Elsevier, 332- 333 (2015), 1104-1110.

Anexos

Caucho Sintetico SBR		
 		
<p>El Caucho SBR es un elastómero sintético obtenido mediante la polimerización de una mezcla de estireno y de butadieno. Es el caucho sintético con mayor volumen de producción mundial. Su principal aplicación es en la fabricación de neumáticos.</p>		
Propiedades Generales	Unit	Valor
Peso Especifico	g / cm ³	0.94
Coefficiente de Dilatación Térmica	°C	66.6
Adhesión a Metales / Tejidos		EXCELENTE
Sabor		POBRE - BUENO
Olor		BUENO
No Manchante		POBRE
Rango de Temperatura de Trabajo	°C	- 10 / 70
Propiedades Físicas	Unit	Valor
Rango de Dureza	°Sh	40 - 100
Resistencia a la Tracción Máxima	Kg / cm ³	220
Alargamiento de Rotura Máxima	%	600
Deformación Permanente por Compresión		BUENO
Resistencia		BUENO
Permeabilidad a los Gases	10 ⁶ cm ³ seg 4 atm	4.8 (POBRE)
Resistencia Eléctrica		EXCELENTE
Resistencia a la Flexión		BUENO
Resistencia a la Abrasión		BUENO - EXCELENTE
Resistencia al Desgarre		POBRE
Resistencia al Impacto		EXCELENTE
Envejecimiento a 100 °C		BUENO
Elasticidad a 100 °C		BUENO
Resistencia a la Llama		USO EN CASO ESPECIAL
Temperatura de Rigidez	°C	- 18 / - 45
Punto de Vidrio	°C	- 65

Resistencia Química	Unit	Valor
Agua / Vapor		BUENO / POBRE
Alcalis Diluidos / Concentrados		POBRE - BUENO / POBRE - BUENO
Acidos Diluidos / Concentrados		POBRE - BUENO / POBRE - BUENO
Hidrocarburos Alifáticos (Kerosene, etc)		NO USAR
Hidrocarburos Aromáticos (Benceno, Tolueno)		NO USAR
Hidrocarburos Clorados, Desengrasantes		NO USAR
Cetonas, Solventes Oxigenados		BUENO
Alcoholes		BUENO

Caucho Neopreno CR

El Caucho Neopreno ha gozado de gran popularidad en la fabricación de todo tipo de material deportivo. Debe destacarse la flexibilidad de este material, algo que favorece que se adhiera a los objetos que debe cubrir y garantiza una protección perfecta ante distintos tipos de agresiones.

Propiedades Generales	Unit	Valor
Peso Específico	g / cm ³	1.25
Coefficiente de Dilatación Térmica	°C	61.2
Adhesión a Metales / Tejidos		EXCELENTE / EXCELENTE
Sabor		POBRE - BUENO
Olor		POBRE - BUENO
No Manchante		BUENO - EXCELENTE
Rango de Temperatura de Trabajo	°C	- 10 / 100
Propiedades Físicas	Unit	Valor
Rango de Dureza	°Sh	30 - 95
Resistencia a la Tracción Máxima	Kg / cm ³	250
Alargamiento de Rotura Máxima	%	600
Deformación Permanente por Comprensión		BUENO
Resistencia		EXCELENTE
Permeabilidad a los Gases	10° cm ³ seg 4 atm	0.89 (BUENO)
Resistencia Eléctrica		POBRE
Resistencia a la Flexión		BUENO - EXCELENTE
Resistencia a la Abrasión		BUENO - EXCELENTE
Resistencia al Desgarre		BUENO
Resistencia al Impacto		BUENO
Envejecimiento a 100 °C		BUENO - EXCELENTE
Elasticidad a 100 °C		BUENO
Resistencia a la Llama		EXCELENTE
Temperatura de Rigidez	°C	- 10 / - 45
Punto de Vidrio	°C	- 65

Resistencia Química	Unit	Valor
Agua / Vapor		BUENO / BUENO
Alcalis Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Acidos Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Hidrocarburos Alifáticos (Kerosene, etc)		POBRE
Hidrocarburos Aromáticos (Benceno, Tolueno)		BUENO
Hidrocarburos Clorados, Desengrasantes		USO EN CASO ESPECIAL
Cetonas, Solventes Oxigenados		POBRE
Alcoholes		EXCELENTE

Caucho Silicona



El Caucho Silicona es reconocido por mantener propiedades de flexibilidad y baja deformación por compresión dentro del más amplio rango de temperaturas de trabajo de los cauchos. También por su excelente resistencia al envejecimiento por la luz solar y el ataque del ozono.

Propiedades Generales	Unit	Valor
Peso Específico	g / cm ³	1.10 - 1.60
Coefficiente de Dilatación Térmica	°C	81
Adhesión a Metales / Tejidos		BUENO - EXCELENTE / EXCELENTE
Sabor		EXCELENTE
Olor		EXCELENTE
No Manchante		EXCELENTE
Rango de Temperatura de Trabajo	°C	- 80 / 250
Propiedades Físicas	Unit	Valor
Rango de Dureza	°Sh	25 - 90
Resistencia a la Tracción Máxima	Kg / cm ³	—
Alargamiento de Rotura Máxima	%	900
Deformación Permanente por Compresión		BUENO - EXCELENTE
Resistencia		BUENO
Permeabilidad a los Gases	10 ⁶ cm ³ seg 4 atm	200 (NO USAR)
Resistencia Eléctrica		EXCELENTE
Resistencia a la Flexión		NO USAR
Resistencia a la Abrasión		POBRE - BUENO
Resistencia al Desgarre		EXCELENTE
Resistencia al Impacto		USO EN CASO ESPECIAL
Envejecimiento a 100 °C		EXCELENTE
Elasticidad a 100 °C		EXCELENTE
Resistencia a la Llama		EXCELENTE
Temperatura de Rigidez	°C	- 50 / - 82
Punto de Vidrio	°C	- 70 / - 82

Resistencia Química	Unit	Valor
Agua / Vapor		EXCELENTE / POBRE
Alcalis Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Acidos Diluidos / Concentrados		BUENO / POBRE
Hidrocarburos Alifáticos (Kerosene, etc)		USO EN CASO ESPECIAL
Hidrocarburos Aromáticos (Benceno, Tolueno)		NO USAR
Hidrocarburos Clorados, Desengrasantes		NO USAR
Cetonas, Solventes Oxigenados		POBRE - BUENO
Alcoholes		POBRE - BUENO



El Caucho Hypalon es altamente recomendado para la industria de la construcción y la eléctrica. La capacidad para adaptarse a condiciones climáticas desfavorables lo convierten en un material muy utilizado en la fabricación de protectores para distintos sectores industriales.

Propiedades Generales	Unit	Valor
Peso Específico	g / cm ³	1.18
Coefficiente de Dilatación Térmica	°C	48.6
Adhesión a Metales / Tejidos		EXCELENTE / BUENO
Sabor		POBRE - BUENO
Olor		BUENO
No Manchante		EXCELENTE
Rango de Temperatura de Trabajo	°C	-35 / 160
Propiedades Físicas	Unit	Valor
Rango de Dureza	°Sh	45 - 100
Resistencia a la Tracción Máxima	Kg / cm ³	250
Alargamiento de Rotura Máxima	%	500
Deformación Permanente por Compresión		POBRE - BUENO
Resistencia		POBRE
Permeabilidad a los Gases	10 ⁶ cm ³ seg 4 atm	0.8 (BUENO)
Resistencia Eléctrica		BUENO
Resistencia a la Flexión		POBRE - BUENO
Resistencia a la Abrasión		BUENO - EXCELENTE
Resistencia al Desgarre		BUENO
Resistencia al Impacto		BUENO
Envejecimiento a 100 °C		BUENO - EXCELENTE
Elasticidad a 100 °C		POBRE
Resistencia a la Llama		BUENO - EXCELENTE
Temperatura de Rigidez	°C	-35 / -45
Punto de Vidrio	°C	-55

Resistencia Química	Unit	Valor
Agua / Vapor		BUENO / BUENO
Alcalis Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Acidos Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Hidrocarburos Alifáticos (Kerosene, etc)		POBRE
Hidrocarburos Aromáticos (Benceno, Tolueno)		BUENO
Hidrocarburos Clorados, Desengrasantes		USO EN CASO ESPECIAL
Cetonas, Solventes Oxigenados		BUENO
Alcoholes		EXCELENTE

Caucho EPDM

El Caucho EPDM posee excelente resistencia al agua, vapor, al ozono y a los rayos UV. Tiene buenas propiedades de flexibilidad a bajas temperaturas. Posee un inmejorable comportamiento frente al envejecimiento y a los agentes climáticos en su uso a la intemperie a largo plazo.

Propiedades Generales	Unit	Valor
Peso Específico	g / cm ³	0.88
Coefficiente de Dilatación Térmica	°C	57.8
Adhesión a Metales / Tejidos		POBRE - BUENO / BUENO
Sabor		BUENO
Olor		BUENO
No Manchante		BUENO
Rango de Temperatura de Trabajo	°C	-35 / 150
Propiedades Físicas	Unit	Valor
Rango de Dureza	°Sh	30 - 90
Resistencia a la Tracción Máxima	Kg / cm ³	200
Alargamiento de Rotura Máxima	%	600
Deformación Permanente por Compresión		BUENO
Resistencia		BUENO
Permeabilidad a los Gases	10° cm ³ seg 4 atm	6.4 (POBRE)
Resistencia Eléctrica		EXCELENTE
Resistencia a la Flexión		NO USAR
Resistencia a la Abrasión		BUENO
Resistencia al Desgarre		POBRE
Resistencia al Impacto		BUENO
Envejecimiento a 100 °C		EXCELENTE
Elasticidad a 100 °C		POBRE - BUENO
Resistencia a la Llama		USO EN CASO ESPECIAL
Temperatura de Rigidez	°C	-30 / -45
Punto de Vidrio	°C	-70

Resistencia Química	Unit	Valor
Agua / Vapor		EXCELENTE / EXCELENTE
Alcalis Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Acidos Diluidos / Concentrados		EXCELENTE / EXCELENTE
Hidrocarburos Alifáticos (Kerosene, etc)		NO USAR
Hidrocarburos Aromáticos (Benceno, Tolueno)		NO USAR
Hidrocarburos Clorados, Desengrasantes		NO USAR
Cetonas, Solventes Oxigenados		BUENO - EXCELENTE
Alcoholes		BUENO - EXCELENTE

1.- Foto del durómetro Ultrasónico marca CE FC Standard Q/GMY 003-2016



2.- Foto del medidor de espesor Modelo LX-A, C, D Type Digital marca CE FC USA



3.- Foto de Ejes y Placas de sujeción de los álabes después de la falla por erosión, abrasión y corrosión

