

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

---

**“RECUBRIMIENTO METALICO DE FORROS DEL MOLINO DE BOLAS POR EL  
PROCESO SMAW EN LA EMPRESA DE SERVICIOS MINEROS DHARMAIN  
INVESTMENT SAC - AREQUIPA S.A.A.” (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

---

**PRESENTADO POR:**

**BR. ABEL CABALLERO LOVON**

**PARA OPTAR AL TÍTULO  
PROFESIONAL DE**

**INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR:**

**ING. VÍCTOR MELECIO DUEÑAS**

**AQUISE**

**CUSCO – PERÚ**

**2024**

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "RECOBRIMIENTO METALICO DE FORROS DEL MOLINO DE BOLAS POR EL PROCESO SRAW EN LA EMPRESA DE SERVICIOS MINEROS DHARNAIN INVESTMENT SAC - AREQUIPA S.A.A." (INVESTIGACION TECNOLOGICA)

presentado por: ABEL CABALLERO LOVON con DNI Nro.: 73694829 presentado por: con DNI Nro.: para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALURGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 01 veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 2%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 16 de DICIEMBRE de 2024

  
Firma

Post firma Víctor Melcio Dueñas Aguirre

Nro. de DNI 29378517

ORCID del Asesor 0000-0002-6459-9804

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:416763204

# Abel Caballero Lovón.

## RECUBRIMIENTO METALICO DE FORROS DEL RECUBRIMIENTO METALICO DE FORROS DEL MOLINO DE BO...

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

### Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:416763204

Fecha de entrega

16 dic 2024, 7:51 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

16 dic 2024, 8:00 p.m. GMT-5

Nombre de archivo

APA ABEL CABALLERO 10-12 finañ.pdf

Tamaño de archivo

3.8 MB

135 Páginas

25,567 Palabras

146,319 Caracteres

# 2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

## Filtrado desde el informe

- ▶ Bibliografía
- ▶ Texto mencionado
- ▶ Coincidencias menores (menos de 30 palabras)

## Exclusiones

- ▶ N.º de coincidencias excluidas

---

## Fuentes principales

- 0%  Fuentes de Internet
- 0%  Publicaciones
- 2%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

---

## Marcas de integridad

### N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

## DEDICATORIA

El desarrollo de la presente tesis lo dedicó principalmente a mi madre Viviana Lovón Peñalva por ser la fuente de inspiración, el empuje y la fuerza para llevar cumplir mis metas; y por darme su amor trabajo y tiempo para estar apoyándome en todo lo que he podido lograr, gracias a ella he llegado a convertirme en lo que soy, por lo cual estoy orgulloso de ser su hijo.

A todas las personas que han influenciado y apoyado a concluir este trabajo que significa el final de una etapa muy importante en mi vida.

Abel Caballero Lovón.

## AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer primero a mi madre, por su paciencia sus consejos y todo lo enseñado en mi vida, agradecer también a mis docentes los cuales a lo largo de mi vida cada uno me ha influenciado y dado una lección importante más allá de las aulas a mis amigos con los cuales he compartido alegrías y penas y siempre han estado para apoyarme, a mi enamorada por su compañía y cariño, gracias a todos por estar conmigo llevando el desarrollo de este trabajo

Un agradecimiento especial al ingeniero Julio Farfan Yopez por su disposición y colaboración durante el uso del laboratorio de metalurgia física para el desarrollo de las pruebas realizadas para este trabajo.

Abel Caballero Lovón.

## **PRESENTACIÓN**

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica

Señores Docentes, miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, pongo a vuestra disposición la tesis intitulada: RECUBRIMIENTO METALICO DE FORROS DEL MOLINO DE BOLAS POR EL PROCESO SMAW EN LA EMPRESA DE SERVICIOS MINEROS DHARMAIN INVESTMENT SAC-INVESTMENT SAC - AREQUIPA S.A.A. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA).

Espero que este trabajo de investigación tenga alcance hacia las personas involucradas en el área de recuperación por soldadura.

## RESUMEN

Este trabajo de investigación tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de recuperar los forros de molino de bolas por recubrimiento mediante el proceso de soldadura por Arco Electrico con electrodo revestido (SMAW) en la empresa Dharmain Investment S.A.A. – Arequipa con el fin de prolongar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento frente al reemplazo de los forros desgastados. La hipótesis central plantea que la recuperación de estos forros a través del recubrimiento metálico es técnicamente factible y puede ofrecer beneficios significativos en términos de prolongación de la vida útil y reducción de costos de mantenimiento.

EL de tipo de investigación aplicada ya que se centra en resolver un problema practico y especifico, con una metodología explicativa y un enfoque experimental donde se realizaron experimentos para probar hipótesis específicas. Se realizaron cálculos matemáticos para determinar la factibilidad de la recuperación de los forros desgastados, estableciendo las variables y parámetros necesarios para su soldabilidad mediante el proceso SMAW. Se emplearon cuatro pares de probetas de los forros usados, evaluándolas mediante control de calidad con inspección visual y pruebas de dureza. Los resultados mostraron que el proceso de soldadura es efectivo para recuperar los forros, teniendo como factor de recuperación 2.41 y incrementó de la dureza incrementando de un 65% al recubrir los forros de manera que aumenta su vida útil y generando beneficios económicos significativos para la empresa.

*Palabras clave:* Recubrimiento duro, proceso SMAW, forros de molino de bolas, acero ASTM A128 E1.

## ABSTRACT

The objective of this research work is to determine the recovery of ball mill linings by the SMAW process in the mining services company Dharmain Investment S.A.A - Arequipa. For this, the main hypothesis was formulated: "The recovery of linings by metal coating from a ball mill in the mining services company Dharmain Investment Sociedad Anónima - Arequipa by the SMAW process is technically possible." The methodology used is experimental and explanatory in nature, so first it was determined through mathematical calculations whether the recovery of said linings is feasible or not, the calculation determined that it is possible to recover by welding, for which the variables and parameters for its weldability by the SMAW process. 4 pairs of test pieces obtained from the linings of the ball mill used in the Dharmain Investment S.A.A mine were used. The specimens were evaluated through quality control, using visual inspection as a non-destructive test and the hardness test as a destructive test. Concluding that the recovery of said linings by welding is possible and increasing their useful life with consequent economic benefits for the company.

*Keywords:* Hardfacing, SMAW process, ball mill liners, ASTM A128 E1 steel

## ÍNDICE

DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTO .....	iii
PRESENTACIÓN .....	iv
RESUMEN .....	v
ABSTRACT.....	vi
ÍNDICE .....	vii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
SIGLAS Y ABREVIATURAS.....	xiv
CAPITULO I .....	1
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1    Planteamiento Del Problema .....	1
1.2    Formulación del Problema Objeto de Investigación.....	2
1.2.1    Problema General .....	2
1.2.2    Problemas Específicos.....	2
1.3    Justificación.....	3
1.3.1    Justificación Tecnológica.....	3
1.3.2    Justificación Social.....	3
1.3.3    Justificación Económica .....	3
1.3.4    Justificación Ambiental .....	4
1.4    Objetivo General y Específicos.....	4
1.4.1    Objetivo General .....	4
1.4.2    Objetivos Específicos.....	4
1.5    Hipótesis y Variables .....	5
1.5.1    Hipótesis General .....	5
1.5.2    Hipótesis Específicas .....	5
1.6    Variables Independientes y Dependientes .....	6
1.6.1    Variables Independientes .....	6
1.6.2    Variable Dependiente .....	6
1.6.3    Variables Interviniente o Externa .....	6
1.7    Operacionalización de variables .....	1

CAPITULO II .....	1
FUNDAMENTACION TEÓRICA .....	1
2.1    Antecedentes de la Investigación .....	1
2.1.1    Antecedentes Internacionales .....	1
2.1.2    Antecedente Nacional.....	2
2.2    Molino de Bolas .....	3
2.2.1    Funcionamiento del Molino de Bolas .....	5
2.2.2    Forros o Revestimientos del Molino de Bolas .....	6
2.2.3    Causa de Desgaste de los Revestimientos .....	7
2.2.3.1    Desgaste por las fuerzas de molienda. ....	7
2.2.3.2    Desgaste por operación del molino. ....	7
2.2.3.3    Desgaste por la característica de los minerales.....	8
2.2.4    Importancia de los revestimientos en el proceso de molienda.....	9
2.3    Aleaciones Metálicas para los Forros o Revestimientos.....	9
2.4    Aceros Auténtricos Al Manganeso (Aceros Hadfield) .....	11
2.4.1    Composición y Microestructuras .....	12
2.4.2    Propiedades Mecánicas del Acero Hadfield.....	15
2.4.3    Efecto de Elementos Aleantes Sobre las Propiedades Mecánicas.....	16
2.4.4    Aplicaciones del Acero Astm A128.....	24
2.5    Características de los Revestimiento de los Molinos de Bola de la Empresa de Servicios Mineros Dharmain Investment SAC - Arequipa S.A.....	25
2.6    Soldadura de Revestimientos Duros y Recuperación de Piezas .....	26
2.6.1    La Recuperación de Piezas Devolviéndoles sus Dimensiones Originales.....	26
2.6.2    La Protección Contra el Desgaste de Piezas Metálicas Nuevas .....	27
2.6.3    Ventajas y Aplicaciones del Recargue .....	27
2.7    Materiales que Pueden ser Recargados Mediante Soldadura.....	29
2.7.1    Aceros de Bajo y Medio Contenido de Carbono, (DE 0.10 A 0.25 %. Y DE 0.25 A 0.55 %) .	29
2.7.2    Aceros de Alto Contenido de Alto Contenido de Carbono (0.55% y mas).....	29
2.7.3    Aceros de Baja Aleación .....	29
2.7.4    Aceros al Manganeso (de 11 A 14% Mn) .....	30
2.7.5    Aceros Inoxidables (Serie 300).....	30
2.7.6    Níquel y sus Aleaciones.....	30
2.7.7    Hierro Fundido .....	30

2.8	Recargues Aplicados a cada Tipo de Desgaste.....	31
2.8.1	Recubrimientos Antiabrasión .....	31
2.8.2	Recubrimientos Anti Erosión .....	32
2.8.3	Recubrimientos Contra la Cavitación.....	32
2.8.4	Recubrimientos Anti Fricción .....	32
2.8.5	Recubrimiento Contra la Corrosión .....	33
2.8.6	Recubrimiento Contra los Efectos Térmicos.....	33
2.9	Soldadura .....	33
2.9.1	Clasificación de los Procesos de Soldadura.....	34
2.9.2	Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW).....	35
2.9.2.1	Definición y antecedentes.....	35
2.9.2.2	Ventajas y limitaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos (smaw). .....	35
2.10	Denominación de Recubrimientos Duros y Microestructuras Características .....	37
2.11	Características Específicas (efectos) de Algunos Elementos de Aleación.....	41
2.12	Selección de Proceso de Soldadura .....	44
2.13	Defectos más Comunes Presentes en la Aplicación de Recubrimiento.....	45
2.14	Dilución .....	47
2.14.1	Variables de Soldadura que Afectan la Dilución .....	48
2.15	Composicion Química del Cordón de Soldadura .....	51
2.16	Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco. ....	54
2.17	Control de Calidad del Recubrimiento Duro.....	56
2.17.1	Ensayos Destructivos .....	56
2.17.2	Ensayos No Destructivos.....	57
2.18	Evaluación del Factor de Recuperación (R).....	57
CAPITULO III .....		59
PROCEDIMIENTO METODOLOGICO Y EXPERIMENTAL .....		59
3.1	Metodología.....	59
3.1.1	Alcance del estudio .....	59
3.1.2	Tipo de investigación .....	59
3.1.3	Nivel de investigación .....	59
3.1.4	Diseño de la investigación.....	59
3.1.5	Metodología de investigación.....	60
3.1.6	Población y muestra.....	60

3.1.6.1	Población.....	60
3.1.6.2	Muestra.....	60
3.2	Determinación del Factor de Recuperación (R).....	60
3.3	Maquinaria, Equipos, Herramientas.....	61
3.3.1	Máquina de Soldar.....	61
3.3.2	Probador de Dureza.....	62
3.3.3	Desbastador Metalográfico.....	63
3.3.4	Pulidor Metalográfico.....	64
3.4	Materiales para la Investigación.....	65
3.4.1	Material Base.....	65
3.4.2	Material de Aporte.....	67
3.5	Soldadura de las Probetas.....	70
3.5.1	Características de las Probetas.....	70
3.5.2	Preparación de las Probetas.....	71
3.6	Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para los Cupones de Experimentación	71
3.7	Cálculo del Calor Neto Aportado.....	76
3.8	Cálculo de la Dilución.....	77
3.9	Determinación de la composición química.....	78
3.10	Control de Calidad de las Probetas.....	84
3.10.1	Ensayo no Destructivo.....	84
3.10.1.1	Inspección visual de los cupones.....	84
3.10.1.2	Ensayos de dureza.....	85
3.11	Resultados y Análisis.....	90
3.11.1	Cálculo del Calor Neto.....	90
3.11.2	Dilución.....	91
3.11.3	Composición Química del Recubrimiento Duro (Tercer Deposito).....	92
3.11.4	Inspección Visual.....	93
3.11.5	Ensayo de Dureza.....	93
CONCLUSIONES.....		95
RECOMENDACIONES.....		96
BIBLIOGRAFÍA.....		97
ANEXOS.....		100

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Materiales utilizados para la fabricación de revestimientos de un molino</i> .....	10
<b>Tabla 2</b> <i>Tipos de aceros Hadfield y su composición química</i> .....	12
<b>Tabla 3</b> <i>Designación de recubrimientos según su microestructura</i> .....	40
<b>Tabla 4</b> <i>Comportamiento de los elementos de aleación más utilizados</i> .....	42
<b>Tabla 5</b> <i>Niveles de dilución de los procesos de soldadura</i> .....	48
<b>Tabla 6</b> <i>Eficiencia térmica de los procesos de arco</i> .....	55
<b>Tabla 7</b> <i>Costos en Recuperación de Piezas</i> .....	58
<b>Tabla 8</b> <i>Cálculo del factor de recuperación</i> .....	61
<b>Tabla 9</b> <i>Características técnicas del desbastador metalográfico</i> .....	64
<b>Tabla 10</b> <i>Características técnicas del pulidor metalográfico</i> .....	65
<b>Tabla 11</b> <i>Composición química ( en %) del acero ASTM A 128 E1</i> .....	66
<b>Tabla 12</b> <i>Propiedades mecánicas y microestructura</i> .....	66
<b>Tabla 13</b> <i>Análisis químico de metal depositado (%)</i> .....	68
<b>Tabla 14</b> <i>Propiedades mecánicas</i> .....	68
<b>Tabla 15</b> <i>Análisis químico de metal depositado (%)</i> .....	69
<b>Tabla 16</b> <i>Propiedades mecánicas del metal depositado</i> .....	69
<b>Tabla 17</b> <i>Calor neto aportado</i> .....	77
<b>Tabla 18</b> <i>Cálculo de dilución</i> .....	78
<b>Tabla 19</b> <i>Composición química del material base y material de aporte para el primer pase</i> ...	79
<b>Tabla 20</b> <i>Composición química del electrodo EFeCr-A8</i> .....	80
<b>Tabla 21</b> <i>Composición química del tercer deposito</i> .....	84
<b>Tabla 22</b> <i>Resultados del examen visual</i> .....	85
<b>Tabla 23</b> <i>Valores de calor aportado</i> .....	90
<b>Tabla 24</b> <i>Valores de dilución</i> .....	91
<b>Tabla 25</b> <i>Composición química del recubrimiento duro (tercer deposito)</i> .....	92
<b>Tabla 26</b> <i>Resultados de la inspección visual</i> .....	93
<b>Tabla 27</b> <i>Dureza promedio del tercer depósito</i> .....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> <i>Esquema de las partes del molino de bolas</i> .....	3
<b>Figura 2</b> <i>Revestimiento del molino de bolas</i> .....	6
<b>Figura 3</b> <i>Fuerzas que influyen en el desgaste de los revestimientos</i> .....	7
<b>Figura 4</b> <i>Operación de un Molino a distintas velocidades</i> .....	8
<b>Figura 5</b> <i>Microestructura del acero Hadfield grado A. 100X</i> .....	13
<b>Figura 6</b> <i>Microestructura acero Hadfield grado A, 200X.</i> .....	14
<b>Figura 7</b> <i>Microestructura acero Hadfield grado A tratada térmicamente.</i> .....	15
<b>Figura 8</b> <i>Solubilidad del carbono en un acero Hadfield.</i> .....	16
<b>Figura 9</b> <i>Variación de la temperatura con el contenido de carbono y manganeso</i> .....	17
<b>Figura 10</b> <i>Influencia del carbono sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield</i> .....	18
<b>Figura 11</b> <i>Influencia del manganeso sobre el acero austenítico al manganeso</i> .....	19
<b>Figura 12</b> <i>Influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas</i> .....	20
<b>Figura 13</b> <i>Influencia del molibdeno sobre las propiedades mecánicas</i> .....	22
<b>Figura 14</b> <i>Influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas</i> .....	23
<b>Figura 15</b> <i>Esquema principal de procesos de soldadura</i> .....	34
<b>Figura 16</b> <i>Soldadura por arco con electrodo revestido</i> .....	35
<b>Figura 17</b> <i>Comportamiento de recubrimientos en base Fe ante un mecanismo de desgaste según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes</i> .....	38
<b>Figura 18</b> <i>Microestructuras de recubrimientos base Fe según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes</i> .....	41
<b>Figura 19</b> <i>Fe-Mo vs. Fracción de volumen de carburos y Fe-Mo vs. Dureza</i> .....	43
<b>Figura 20</b> <i>Factores que Inciden en la selección del proceso de soldadura</i> .....	45
<b>Figura 21</b> <i>Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución</i> .....	47
<b>Figura 22</b> <i>Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura</i> .....	50
<b>Figura 23</b> <i>Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución</i> .....	50
<b>Figura 24</b> <i>Fuente de poder.</i> .....	62
<b>Figura 25</b> <i>Durómetro.</i> .....	63
<b>Figura 26</b> <i>Desbastador metalográfico</i> .....	64
<b>Figura 27</b> <i>Pulidor Metalográfico</i> .....	65

<b>Figura 28</b> <i>Probeta de acero austenitico al manganeso ASTM A 128 E1</i> .....	66
<b>Figura 29</b> <i>Consumibles</i> .....	67
<b>Figura 30</b> <i>Cupones de prueba.</i> .....	70
<b>Figura 31</b> <i>Probeta con recubrimiento duro.</i> .....	76

## SIGLAS Y ABREVIATURAS

ASTM: American Society for Testing Materials (Sociedad americana para la prueba de materiales)

AWS : American Welding Society (Sociedad americana de soldadura)

SMAW: Shielded Metal Arc Welding (Soldadura de arco eléctrico con electrodo)

MIG: Soldadura gas inerte (Metal inert gas)

MAG: Soldadura gas active

MB: Metal Base

WPS: Welding Procedure Specification (Especificación del Procedimiento de Soldadura)

ZAC: Zona Afectada por el Calor

ZF: Zona Fundida

$v$  = Velocidad de soldeo.

$T_{max}$  = Temperatura máxima

$T_o$  = Temperatura inicial de la chapa.

$T_m$  = Temperatura de fusión o Temperatura del liquidus del metal a soldar.

$C$  = Calor específico del metal sólido.

$H_{net}$  = energía aportada neta.

$t$  = Espesor de la chapa a soldar.

$\rho$  = Densidad del material (g/mm<sup>3</sup>)

$\rho_C$  = Calor específico volumétrico.

$X_W$  = Porcentaje promedio del elemento X en el depósito de soldadura

$X_A$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base A

$X_B$  = Porcentaje promedio del elemento X en el metal base B

$D_A$  = Porcentaje de dilución del metal base A, expresado en decimal

$D_B$  = Porcentaje de dilución del metal base B, expresado en decimal

$D_T$  = Porcentaje de dilución total, expresado en decimal

HRC = Dureza Rockwell C

## INTRODUCCIÓN

La industria minera juega un papel esencial en la economía global, siendo responsable de la extracción de recursos naturales cruciales para la producción de bienes y servicios en diversos sectores. Entre los equipos más utilizados en el proceso de extracción y procesamiento de minerales se encuentran los molinos de bolas, fundamentales en la molienda de los minerales. Estos molinos están diseñados para operar en condiciones extremas de desgaste, debido a las intensas fuerzas de fricción a las que están sometidos. Los forros que recubren los molinos de bolas experimentan un desgaste considerable con el tiempo, lo que conlleva elevados costos de mantenimiento y reemplazo. Esta situación genera una constante necesidad de reemplazar los forros, lo que no solo implica un alto costo económico, sino también una pérdida significativa de tiempo debido a los períodos de inactividad de los equipos. Es en este contexto donde la recuperación de los forros mediante un proceso eficiente cobra relevancia.

La investigación que se presenta a continuación tiene como objetivo evaluar la viabilidad de recuperar los forros de molino de bolas mediante el proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW). La investigación surge de la necesidad de evaluar la viabilidad del proceso de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW) para la recuperación de los forros de molino de bolas. Aunque se había considerado esta técnica como una opción potencial, no se disponía de datos cuantitativos que permitieran validar de manera precisa y objetiva los beneficios de este proceso. Así, el objetivo fue realizar un análisis detallado y medible que permitiera comprobar si el uso de SMAW podría mejorar la durabilidad de los forros y reducir los costos operativos en comparación con su reemplazo total. Por ello, esta investigación se orientó a realizar un análisis más detallado, basado en datos concretos, que permitieran comprobar de forma tangible la efectividad del proceso SMAW en la recuperación de los forros. La hipótesis

principal planteada fue que la soldadura SMAW no solo es técnicamente viable para recuperar los forros de los molinos de bolas, sino que también podría mejorar la durabilidad de estos componentes y reducir los costos operativos en comparación con el reemplazo completo de los mismos.

El origen de esta investigación radica en la necesidad de optimizar los procesos de mantenimiento dentro de la empresa. Aunque la soldadura SMAW ya se empleaba, no se disponía de datos claros sobre su efectividad en cuanto a la prolongación de la vida útil de los forros y la reducción de costos. La finalidad era comprobar, de manera cuantitativa, si la soldadura podía ser una solución más económica y eficiente para la recuperación de los forros desgastados, minimizando así la necesidad de reemplazarlos por completo. Además, se evaluó si este proceso podría ser una alternativa más sostenible, al reducir la fabricación de nuevos componentes y disminuir los residuos industriales generados.

Durante el desarrollo del estudio, surgieron diversas dificultades. La obtención de muestras de forros desgastados resultó complicada debido a la limitación de recursos y la escasa disponibilidad de estos componentes, los cuales son costosos y difíciles de conseguir en grandes cantidades. Asimismo, la realización de los ensayos de soldadura exigió una significativa inversión en materiales y equipos, lo que representó un desafío económico adicional. No obstante, a pesar de estas dificultades, la investigación avanzó con éxito, logrando obtener resultados concretos que demostraron la viabilidad del proceso SMAW para la recuperación de los forros.

Los resultados obtenidos tienen implicaciones tanto para la empresa Dharmain Investment S.A.A. como para el campo de la ingeniería metalúrgica y la tecnología de soldadura. La investigación aporta datos cuantitativos sobre la efectividad de la soldadura SMAW para mejorar la resistencia al desgaste y la durabilidad de los forros de molino de bolas. Este enfoque

experimental no solo permite optimizar los procesos dentro de la empresa, sino que también promueve el desarrollo de soluciones más sostenibles y eficientes en la industria minera, alineadas con los principios de economía circular y la reducción de impactos ambientales.

A pesar de los desafíos enfrentados, se alcanzaron conclusiones significativas. En primer lugar, se demostró que el proceso de soldadura SMAW es viable para la recuperación de los forros de molino de bolas, mejorando considerablemente la durabilidad de los componentes y generando ahorros importantes en costos de mantenimiento. La correcta selección de los materiales de recubrimiento metálico permitió aumentar la resistencia al desgaste de los forros, alcanzando una dureza final de 58.2 HRC, lo que representa un incremento del 66.29% en la dureza del material base. Desde un punto de vista económico, el recubrimiento metálico resultó ser la opción más rentable en comparación con el reemplazo de los forros, con un factor de recuperación de 2.43, lo que indica que el proceso de soldadura es significativamente más eficiente en términos de costos operativos. Los parámetros de soldadura también desempeñaron un papel crucial en la calidad de los cordones de soldadura y en la eficiencia del proceso de recuperación, lo que demuestra que ajustar estos parámetros puede mejorar considerablemente los resultados obtenidos.

El trabajo se organiza en cuatro capítulos principales. En el Capítulo 1, se introduce el planteamiento del problema, los objetivos y la justificación del estudio. Este capítulo describe los problemas que la investigación busca resolver, plantea las hipótesis y establece la relevancia de la investigación para la industria minera. En el Capítulo 2, se expone la fundamentación teórica, donde se revisan antecedentes relevantes y se explican los principios técnicos de la soldadura SMAW, así como las propiedades necesarias en los forros de molino de bolas para garantizar su eficiencia. En el Capítulo 3, se detalla la metodología de investigación, incluyendo el diseño experimental, la selección de materiales y los procedimientos de soldadura. Se describen los

ensayos realizados y las pruebas de dureza aplicadas a los forros recuperados. En el Capítulo 4, se presentan y analizan los resultados obtenidos, comparando las propiedades mecánicas de los forros recuperados con las de los forros nuevos, y se realiza una evaluación económica de la opción de recubrimiento frente al reemplazo de los forros.

En resumen, este trabajo no solo tiene un impacto significativo para la empresa Dharmain Investment S.A.A., sino que también ofrece valiosos conocimientos para la industria minera en general. La investigación demuestra que la soldadura SMAW es una alternativa viable y eficiente para la recuperación de los forros de molino de bolas, contribuyendo tanto a la optimización de los procesos operativos como a la reducción de costos y la mejora de la sostenibilidad en la minería.

## CAPITULO I

### FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1 Planteamiento Del Problema

En la industria minera, la eficiencia y durabilidad de los equipos son elementos cruciales para garantizar la continuidad operativa y maximizar la rentabilidad. Entre los componentes esenciales se encuentra el molino de bolas, el cual desgasta sus forros con el tiempo debido al constante contacto con el material triturado y las bolas de acero, lo que resulta en pérdida de rendimiento y costosas paradas de mantenimiento.

En la Empresa de Servicios Mineros Dharmain Investment SAC - Arequipa S.A.A., se enfrentan a este desafío con la necesidad de mantener la operatividad de sus molinos de bolas de manera eficiente y económica. Para abordar este problema, se ha considerado la aplicación de recubrimiento metálico sobre los forros del mol036

ino mediante el proceso de Soldadura por Arco Eléctrico con Electrodo Revestido (SMAW, por sus siglas en inglés), una técnica reconocida por su versatilidad y capacidad para restaurar superficies desgastadas.

Sin embargo, a pesar de la viabilidad técnica y las potenciales ventajas que ofrece este proceso, su implementación efectiva en la empresa no está exenta de desafíos y limitaciones. Estos pueden incluir la selección adecuada de materiales de recubrimiento, la optimización de parámetros de soldadura para garantizar la adhesión y resistencia del recubrimiento, así como la capacitación del personal en la aplicación correcta de la técnica.

Por lo tanto, surge la necesidad de realizar una investigación tecnológica exhaustiva que permita evaluar la idoneidad y eficacia del recubrimiento metálico de los forros del molino de bolas mediante el proceso SMAW en la Empresa de Servicios Mineros Dharmain Investment SAC - Arequipa S.A.A. Este estudio se propone identificar y analizar los principales desafíos, ventajas y limitaciones asociadas con la aplicación de esta técnica, así como proponer recomendaciones y estrategias para su implementación exitosa en el contexto específico de la empresa.

## **1.2 Formulación del Problema Objeto de Investigación**

### ***1.2.1 Problema General***

¿Será viable el recubrimiento de los forros de molino de bola para su recuperación mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) en cuanto a prolongar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?

### ***1.2.2 Problemas Específicos***

#### **Problema Específico 1**

¿Influirá de alguna manera la correcta selección del material de aporte en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?

#### **Problema Específico 2**

¿Cuál será el efecto de la recuperación de forros de molino mediante el proceso de soldadura SMAW en la reducción de costo de mantenimiento en comparación con la compra de nuevos componentes en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?

#### **Problema Específico 3**

¿Influirá los parámetros de soldadura en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?

### **1.3 Justificación**

#### ***1.3.1 Justificación Tecnológica***

La aplicación del recubrimiento metálico de los forros del molino de bolas mediante el proceso SMAW representa una solución tecnológica innovadora para mejorar la durabilidad y rendimiento de los equipos de molienda en la Empresa de Servicios Mineros Dharmain Investment SAC - Arequipa S.A.A. Esta técnica ofrece la posibilidad de restaurar las superficies desgastadas de manera eficiente, prolongando así la vida útil de los componentes críticos de los molinos y optimizando su funcionamiento.

#### ***1.3.2 Justificación Social***

La mejora en la eficiencia y disponibilidad de los molinos de bolas mediante el recubrimiento metálico beneficia directamente a los trabajadores y comunidades locales al garantizar la continuidad de las operaciones mineras y la estabilidad laboral. Además, al reducir los tiempos de inactividad por mantenimiento, se mejora la seguridad laboral al minimizar la exposición a riesgos operativos.

#### ***1.3.3 Justificación Económica***

La implementación del recubrimiento metálico con el proceso SMAW ofrece ventajas económicas significativas para la empresa minera, incluyendo la reducción de costos de mantenimiento al evitar el reemplazo frecuente de forros desgastados y la optimización de la

producción al minimizar los tiempos de inactividad no planificados. Además, la aplicación de esta técnica puede generar ahorros a largo plazo al prolongar la vida útil de los equipos y maximizar su rendimiento operativo.

### ***1.3.4 Justificación Ambiental***

La implementación del recubrimiento metálico como alternativa al reemplazo completo de los forros del molino de bolas puede reducir significativamente la generación de residuos industriales y la extracción de nuevos recursos. Además, al prolongar la vida útil de los equipos, se reduce la necesidad de fabricar nuevos componentes, lo que contribuye a la conservación de los recursos naturales y minimiza el impacto ambiental asociado con la producción y disposición de materiales.

## **1.4 Objetivo General y Específicos**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Evaluar la viabilidad de recubrir los forros de molino de bolas mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) en la empresa Dharmain Investment S.A.A. con el fin de prolongar la vida útil y reducir los costos de mantenimiento en comparación al cambio de los forros desgastados

### ***1.4.2 Objetivos Específicos***

#### **Objetivo Específico 1**

Demostrar que la correcta selección del material de aporte influye en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.

## **Objetivo Específico 2**

Comprobar que la recuperación de los forros de molino en comparación a la compra de nuevos componentes reducirá los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A

## **Objetivo Específico 3**

Verificar que los parámetros de soldadura influyen significativamente en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.

## **1.5 Hipótesis y Variables**

### ***1.5.1 Hipótesis General***

El recubrimiento de los forros del molino de bolas mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) es viable para aumentar la vida útil de los forros y reducir costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A. en comparación al cambio regular de los forros desgastados

### ***1.5.2 Hipótesis Específicas***

- **Hipótesis Específica 1**

La correcta selección del material de aporte influye en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.

- **Hipótesis Específica 2**

La recuperación de los forros de molino en comparación a la compra de nuevos componentes reducirá los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A.

- **Hipótesis Específica 3**

Los parámetros de soldadura influyen significativamente en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A..

## **1.6 Variables Independientes y Dependientes**

### ***1.6.1 Variables Independientes***

- Selección y aplicación de materiales de recubrimiento metálico:
- Parámetros de soldadura por arco eléctrico

### ***1.6.2 Variable Dependiente***

Durabilidad y rendimiento de los forros del molino de bolas

### ***1.6.3 Variables Interviniente o Externa***

Temperatura ambiental.

### 1.7 Operacionalización de variables

Variables		Definición de las variables	Indicador	Rango	Unidad	Técnicas e instrumentos de medición
Dependiente	Dureza	Medida de la resistencia del material al desgaste	Dureza	-	HRC	Durómetro
	Recuperación de forros	El grado de restauración del material original (o forro) tras un proceso de desgaste o de soldadura, con el fin de volver a su estado inicial o mejorar sus propiedades.	Factor de recuperación	>1	Numérico	Datos industriales
Independientes	Variable de soldabilidad	actores que afectan la capacidad del material para ser soldado exitosamente	Amperaje	120-160	Amperaje	SMAW
	Selección y aplicación de material	El tipo de material utilizado en la soldadura, específicamente el electrodo y la técnica aplicada para restaurar o mejorar las propiedades del material soldado.	Tipo de electrodo aplicado	-	Numero de pasada	Recubriendo para recuperación de pieza

## CAPITULO II

### FUNDAMENTACION TEÓRICA

#### 2.1 Antecedentes de la Investigación

##### 2.1.1 *Antecedentes Internacionales*

- a) Cañizares Silva & Quinchuela P, (2017) en su trabajo de investigación proponen una alternativa tecnológica para la recuperación de alabes de turbinas hidráulicas, para lo cual se aplicaron tres procedimientos de soldadura, el SMAW-GMAW-GTAW. Se usó como material base el acero inoxidable martensítico ASTM A743 CA-6NM y como materiales de aporte el austenítico (ER309LMo) para los primeros pases y martensítico (E410NiMo-15 o ER410NiMo) para los pases siguientes. Se evaluó la dureza y microdureza, mostrando una reducción máxima de 23.5%, concluyéndose con la evaluación de la microestructura. Dicha investigación se concluyó que es posible la recuperación de los alabes por los tres procesos de soldadura.
- b) (Chávez Aparicio, Mejía C, & Pacheco D, 2009), el objetivo de su trabajo de investigación realizado en la ciudad de Mexico, es el estudio del comportamiento de la técnica de proyección térmica de alta velocidad (HVOF) en la recuperación de dados de acero grado D2 y su influencia en las propiedades mecánicas y tribológicas del recubrimiento en el sustrato, para realizar esta investigación uso probetas de acero grado D2, haciendo uso de las técnicas de caracterización como son: el análisis químico, análisis metalográfico, ensayo de dureza, ensayo de resistencia al desgaste, con esta información obtenida se procedió a realizar un procedimiento de soldadura por la técnica convencional Gas Tungsten Arc Welding, por sus siglas en inglés (GTAW). Después de haber obtenido las características de una reparación con

el proceso GTAW, se realizó un diseño experimental del tipo Taguchi, a fin de encontrar las variables críticas del proceso HVOF que afectan a la trayectoria de la partícula a depositar, encontrándose que la distancia y la relación combustible/oxígeno fueron las de mayor impacto. Esta investigación permitirá comparar los resultados obtenidos de acuerdo al objetivo general planteado.

### ***2.1.2 Antecedente Nacional***

A) (Esquivias,2018), El objetivo de su trabajo de investigación realizado en el año 2018 en la ciudad de Arequipa, es mejorar las propiedades mecánicas para obtener una microestructura que resiste la dureza a la cual está sujeta el alabe, con lo que se beneficiara con un ahorro económico, Para desarrollar este trabajo de investigación se usaron probetas de acero inoxidable del tipo austenítico para luego ser soldados por el proceso TIG (Tungsten Inert Gas) llamado también GTAW, posteriormente las probetas se sometieron a ensayos de tracción, impacto, dureza y análisis metalográfico con el fin de evaluar sus propiedades mecánicas. En esta investigación se encontró una alternativa para recuperar los alabes por medio de la soldadura, de igual forma se encontró que los tiempos de recuperación son menores a los de la fabricación de un alabe nuevo, también se determinó que las resistencias obtenidas en las uniones soldadas son ligeramente mayores a los del material base, debido a que en los ensayos de tracción rompen en el material base, alejados de la ZAC. Este trabajo difunde una nueva tecnología de recuperación de alabes por soldadura con la calidad exigida.

B) (Aquino,2021) En la empresa MEPSA, la implementación de ensayos no destructivos (END) en el control de calidad de forros de molinos SAG se inició en 2019, con el objetivo de mejorar la precisión de la inspección y la detección de defectos en los forros. Inicialmente, debido a la falta de capacitación del personal de calidad en técnicas de END, los resultados fueron

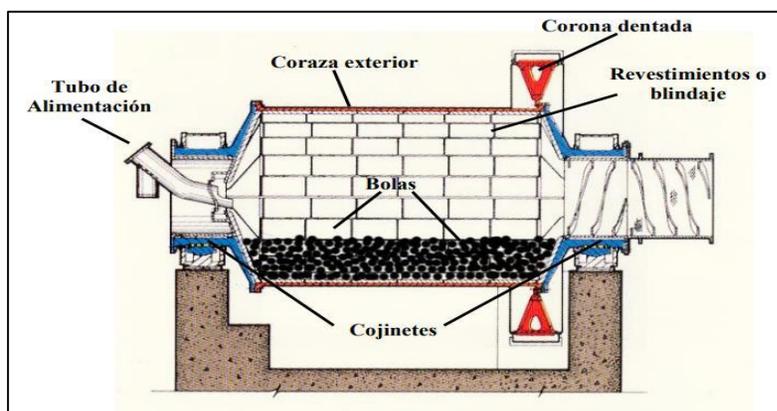
limitados, con un 0% de forros rechazados y un 0% reprocesados. Sin embargo, después de un proceso de capacitación en END, se observó una mejora en los resultados de inspección en 2020. Se realizaron inspecciones visuales de 224 forros, y los resultados mostraron un incremento del 2.23% en el rechazo y un 3.57% en el reproceso, lo que se interpretó como un "falso positivo" debido a la mayor precisión en la detección de defectos por parte del personal capacitado. En cuanto a las inspecciones mediante partículas magnéticas, se registró un incremento en el rechazo de un 2.23% y un 1.79% en el reproceso con respecto a 2019.

## 2.2 Molino de Bolas

Considerada como la representante de la molienda fina. Es en este tipo de molino donde el mineral pasa por la etapa final de conminución, siendo reducido por la acción de bolas de acero. Estas bolas deben ser lo suficientemente grandes para moler las partículas más grandes y duras del mineral. Para un molino de bolas, los medios de molienda ocupan aproximadamente el 35% de la capacidad total del molino. Cabe resaltar que la molienda por bolas está perdiendo camino con relación a la creciente demanda de los molinos semiautógenos. En las figuras 1, se muestra las partes del molino de bolas.

### Figura 1

*Esquema de las partes del molino de bolas*



Fuente: (COMESA, 1990)

### **a) Cuerpo del Molino**

Comesa (1990) “Compuesto por un cilindro de chapa de acero soldado con cabezas de acero fundido. Los cabezales llevan en el centro muñones (trunnions) sobre los que giran en conjunto y son huecos para permitir el ingreso y salida de material a reducir”

### **b) Chumaceras principales**

Los trunnions reposan sobre sendas, chumaceras diseñadas de modo que el rozamiento entre ellos sea mínimo al contacto con una superficie altamente lisa y una lubricación correcta a una presión adecuada. Dependiendo del tamaño del molino y de la organización de la planta podrá ser necesario un sistema totalmente automático o uno muy simple de grasa en distribuidores que están colocada en las tapas de las chumaceras.

### **c) Transmisión**

El movimiento del molino se consigue mediante un conjunto de engranaje y piñón, llamados contra eje y catalina, que pueden estar fabricados con dientes rectos o helicoidales, dependiendo del tamaño del molino. El piñón de ataque o contra eje están soportadas por chumaceras en ambos lados del contra eje y es necesario tener cuidado al efectuar el montaje, pues la correcta marcha del molino depende del alineamiento u holgura entre diente catalina y piñón y la precisión entre estos. Los demás elementos de transmisión incluyen: el motor y la reducción necesaria, ya sea por medio de un reductor, trenes de engranaje o poleas y fajas.

### **d) Blindajes o revestimientos**

En la parte interna del cuerpo del molino se encuentra con un blindaje que contiene una aleación de acero para el impacto especialmente expuesta al duro ataque que le hacen tanto las

bolas de acero internas y el mineral trabajado. Por el constante movimiento de cascada pronunciada y al ser agresivo el impacto debe de protegerse la protección entre protección y el casco del molino. Si la pulpa fuera tal que pudiera penetrar por detrás del blindaje y causar daños al casco del molino se debe de proteger con planchas de jebe de 5mm de espesor.

#### **e) Dispositivo de Descarga**

La descarga puede ser directa a la caja de descarga para pasar a la etapa siguiente del proceso o alternativamente puede desembocar a un cilindro de malla giratoria, conocido como trommel este puede ser de plancha perforada.

#### **2.2.1 Funcionamiento del Molino de Bolas**

Funciona por el giro del cilindro con bolas de acero. La rotación suele ser de 4 a 20 revoluciones por minuto, ello depende de la capacidad de la planta concentradora. Trabaja bajo un sistema cerrado, y aquí el molino es alimentado por el cajón de alimentación; tenemos el overflow de la batería de ciclones, agua de proceso, los reactivos y bola de molienda. Las bolas de acero, colman el molino, hasta un promedio aproximado de 35% del cuerpo y la pulpa llena el vacío dejado entre las bolas, cubriendo un 35% a 45 % del cuerpo del mismo. Cuando el molino gira sobre sus chumaceras por acción del motor, las bolas junto con el mineral son elevados por acción de rotación y por la forma ondulada de los revestimientos interiores. El mineral en conjunto con las bolas de acero, sube hasta cierta altura, de donde luego caen, girando y/o golpeándose entre sí y contra los revestimientos. El ciclo se repite, vuelven a subir y bajar el mineral junto con las bolas, y se da el proceso de molienda

### **2.2.2 Forros o Revestimientos del Molino de Bolas**

Los molinos son revestidos con revestimientos de metal duro fundido (acero aleado al cromo y molibdeno) los cuales incluyen conjuntos completos de carcasa y cilindros de entrada de la alimentación. Los revestimientos incluyen pedazos de revestimientos empernadas en las esquinas de las carcasas. El cilindro de descarga está revestido con caucho vulcanizado en las estructuras de acero. Un material de refuerzo para el revestimiento de caucho es fijado a la carcasa del molino, placas tubulares y cilindro de entrada de la alimentación para permitir irregularidades pequeñas dentro de la disposición de los revestimientos para evitar la erosión de la carcasa por la pulpa que pudiera quedar atrapada entre los revestimientos.

De acuerdo con Segovia (1997), estos sistemas tienen una doble misión, proteger la carcasa, elemento resistente del molino, de las acciones de la molienda, golpes, desgastes, etc., y favorecer el movimiento de la carga dentro del molino, En la figura 2, se muestra la disposición de los forros o revestimiento de los molinos de bolas.

#### **Figura 2**

*Revestimiento del molino de bolas*



Fuente: (COMESA, 1990)

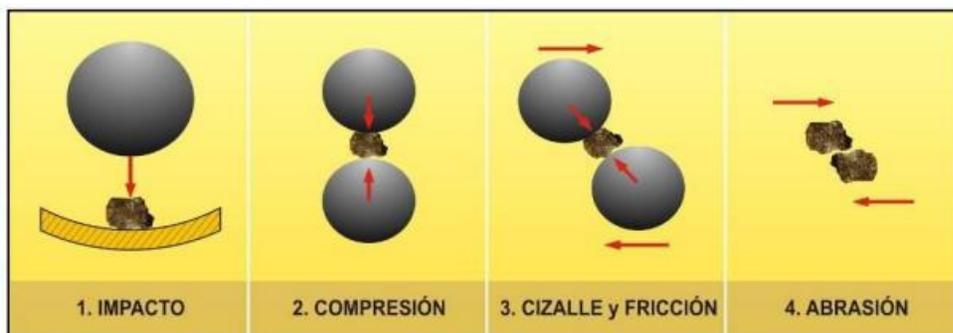
### 2.2.3 Causa de Desgaste de los Revestimientos

#### 2.2.3.1 Desgaste por las fuerzas de molienda.

Las fuerzas de impacto son generadas por el efecto catarata que se produce dentro del molino. Esta fuerza se producirá siempre y cuando la energía que se aplique sea rápida, buscando que el impacto se dé entre los cuerpos de molienda y el mineral propio, ya que si las bolas no impactan con el mineral estas caerán en el revestimiento e irán desgastándolo constantemente. Concerniente a las fuerzas de abrasión, los minerales que han alcanzado una trituración pequeña traerán consigo un desgaste constante del revestimiento por las fuerzas de abrasión, siendo esta fuerza la que produce el mayor desgaste en los revestimientos. En la figura 3, se muestra las fuerzas que influyen en el desgaste de los molinos.

#### Figura 3

*Fuerzas que influyen en el desgaste de los revestimientos*



Fuente: (Gutierrez G., 2011)

#### 2.2.3.2 Desgaste por operación del molino.

El funcionamiento correcto de un molino, depende de las variables de operación. Un molino funcionará correctamente si es que sus valores de Potencia Neta, carga de Mineral y velocidad de trabajo se encuentran en los rangos permisibles de operación. Un aumento del

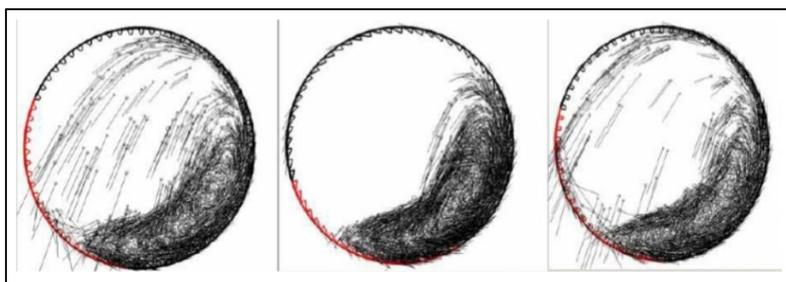
volumen de carga de mineral traerá consigo una mayor potencia y con ello un mayor trabajo de los revestimientos, produciéndose desgastes prematuros (Fueyo C, 2019)

Entre las características de operación que más se resalta está la variable de velocidad de trabajo (ver figura 4). Una velocidad por debajo del 60% de la velocidad crítica, traerá consigo que las fuerzas de impacto no se presenten con tanta regularidad, ya que no se producirá el efecto catarata el cual es el principal factor de la trituración por impacto, pero si se presentará un mayor desgaste por abrasión debido a que las bolas de molienda y el propio mineral estarán en continua interacción, desgastando de manera paulatina los revestimientos de un molino.

Si es que la velocidad de trabajo se encuentra por encima del 60% de la velocidad crítica, se producirá un efecto catarata más pronunciado la cual traerá consigo que las bolas de molienda impacten de forma directa con el revestimiento triturándolo por las constantes fuerzas de impacto que se producen (Franke & Lichti, 2005)

#### **Figura 4**

*Operación de un Molino a distintas velocidades*



Fuente: (Franke & Lichti, 2005)

#### **2.2.3.3 Desgaste por la característica de los minerales.**

La abrasividad y dureza de los minerales juega un papel muy importante en la operación y desgaste de sus componentes. Es necesario que una planta concentradora antes de iniciar su proceso de concentración realice un estudio de las características del mineral no solo con la

finalidad de elegir qué tipo de protección llevarán sus equipos, sino también qué método de flotación y/o lixiviación se utilizará para separar el mineral de interés del estéril. Si se produce un efecto catarata bajo operación de minerales con alto grado de dureza, el propio mineral se encargará de triturar dicho elemento y quebrarlo al momento de caer en los revestimientos. Si un mineral cambia rápidamente su densidad por la añadidura de agua y reactivos, esto traerá consigo que el revestimiento se desgaste por corrosión. Además, si un mineral es muy abrasivo el desgaste de los revestimientos será de una forma más rápida, ya que la constante interacción entre revestimiento y mineral producirá que el mineral abrasivo carcoma el forro del molino (Dandotiya, 2011)

#### ***2.2.4 Importancia de los revestimientos en el proceso de molienda.***

Como se ha mencionado anteriormente la conminución del mineral, etapa previa a la concentración, es sin lugar a dudas el proceso o etapa de mayor relevancia práctica en todo el circuito, por cuanto demanda la principal inversión de capital incidiendo fuertemente en los costos unitarios y determina en gran medida la rentabilidad de la operación.

Los revestimientos forman parte de esta etapa, ya que son los encargados de brindar una protección y ayuda en el proceso de molienda; siendo el factor clave para una correcta operación del molino. Un revestimiento en óptimas condiciones ayuda a reducir el consumo de energía, mayores horas de operación del equipo y una mejor trituración del mineral.

### **2.3 Aleaciones Metálicas para los Forros o Revestimientos**

“La selección del material de construcción para un forro o revestimiento va en función a la abrasividad del mineral, tamaño del molino, corrosión, tamaño de los medios molturantes y velocidad del molino”. (Sider Perú, 2020)

El diseño del revestimiento y el material de construcción son integrales y no pueden ser elegidos de forma aislada. En la Tabla 1, se proporciona una lista de los materiales primarios de construcción, con los usos y fortalezas particulares de cada uno (Dandotiya, 2011).

**Tabla 1**

*Materiales utilizados para la fabricación de revestimientos de un molino*

Materiales	Descripción	Ventajas	Desventajas
Acero austenítico a base de manganeso (AMS).	Se utiliza para revestimiento de rejilla, en general, para molinos más pequeños.	Se endurece bajo estrés, pero el sustrato sigue siendo resistente y puede soportar impactos externos sin fracturas.	Se ponga con el impacto, por lo que los revestimientos sólidos comienzan a apretarse y se vuelve extremadamente difíciles de quitar, y pueden dañar la cubierta de un molino si se permite que la tensión se acumule hasta un nivel extremo.
Acero al Cromo con bajo contenido de carbono (300-370 BHN)	Se usa generalmente para revestimientos de laminación (AG, SAC y bola) hacia aceros con mayor contenido de carbono.	Excelentes características de desgaste con cierta resistencia al impacto, generalmente ahora se usa para las rejillas de descarga donde se requiere una resistencia al impacto ligeramente mejor.	Elevados costos de manufactura
Acero al Cromo con alto contenido de carbono (300-370 BHN)	Este acero ahora se considera el principal material utilizado para los revestimientos para molinos SAG.	Las variaciones tienden a tener relación con el tamaño del forro y el grosor de sección.	Hay un desarrollo continuo de esta área ya que el tamaño de los revestimientos está superando las propiedades proporcionados por los aceros estándar de cromo con alto contenido de cromo (24).
Acero con alto Niquel	El uso de este tipo de material generalmente comenzó con molinos de bolas y barras donde los impactos se consideraron lo suficientemente bajos	Funciona perfectamente bajo fuerzas de abrasión	Se considera obsoleto a la luz del uso de los aceros con alto contenido de cromo y el hierro blanco al cromo y molibdeno.

---

	como para que este material se desgaste frágil pero altamente abrasivo funcione bien.		
Hierro con alto contenido de cromo	Se usa generalmente en los molinos de barras y bolas	Es más rentable pero más quebradizo que los hierros de cromo blanco molino.	Características superiores de abrasión al desgaste.

---

Fuente: (Dandotiya, 2011)

Los forros o revestimiento de los molinos de bolas de la empresa de servicios mineros DHARMAIN INVESTMENT SAC, son de acero austenítico al manganeso (ASTM A 128).

#### **2.4 Aceros Austeníticos Al Manganeso (Aceros Hadfield)**

El acero austenítico al manganeso fue desarrollado por Sir Robert Hadfield en 1882, por lo que fue denominado acero Hadfield. Son aleaciones no magnéticas extremadamente tenaces en las cuales la transformación martensítica de endurecimiento ha sido suprimida por una combinación de alto contenido de manganeso y carbono, y la precipitación de carburos por una alta velocidad de enfriamiento desde temperaturas de austenización.

Estos aceros están caracterizados por sus propiedades mecánicas como son: alta resistencia a la tracción y a la compresión, alta ductilidad y excelente resistencia al desgaste. El acero Hadfield es el único que combina alta resistencia y ductilidad con gran capacidad de endurecimiento por deformación y, usualmente, buena resistencia al desgaste. Los aceros austeníticos al manganeso presentan ciertas propiedades que tienden a restringir su uso, por ejemplo, son difíciles de maquinar y usualmente tienen esfuerzos de fluencia de 345 a 415 MPa (50 a 60 Ksi). Consecuentemente no son aptos para partes que requieren alta precisión durante el maquinado o que deben resistir deformación plástica cuando son sometidos a altos esfuerzos durante el servicio. Los aceros Hadfield tienen una composición nominal de 1.2%C y 12 a 13%Mn como elementos

esenciales. Las aleaciones comerciales usualmente varían en el rango de 1 a 1.4%C y 10 a 14%Mn como lo establece la norma ASTM A128. (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 231)

### 2.4.1 Composición y Microestructuras

Muchas variaciones de los aceros al manganeso originales han sido propuestas, pero solo unas pocas han sido adoptadas como mejoras significativas. Estas usualmente incluyen variaciones en el contenido de carbono y manganeso, con o sin elementos aleantes adicionales tales como cromo, níquel, molibdeno, vanadio, titanio y bismuto. Las composiciones más comunes establecidas por la norma ASTM A128 son resumidas en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Tipos de aceros Hadfield y su composición química*

Identificación		Composición química							HB Dureza
Norma	Grado	% C	% Mn	% Si	% Ni	% Cr	% Mo	% P	Brinell
Astm A 128	A	1,05-1,35	11 mín.	1,00 máx				0,07 máx.	180
	B1	0,90-1,05	11,5-14,0	1,00 máx				0,07 máx.	
	B2	1,05-1,20	11,5-14,0	1,00 máx				0,07 máx.	
	B3	1,12-1,128	11,5-14,0	1,00 máx				0,07 máx.	
	B4	1,20-1,35	11,5-14,0	1,00 máx				0,07 máx.	200
	C	1,05-1,35	11,5-14,0	1,00 máx		1,5-2,5		0,07 máx.	
	D	0,7-1,30	11,5-14,0	1,00 máx	3,0-4,0			0,07 máx.	
	E1	0,7-1,30	11,5-14,0	1,00 máx			0,9-1,2	0,07 máx.	185
E2	1,05-1,45	11,5-14,0	1,00 máx			1,8-2,1	0,07 máx.		
F	1,05-1,35	6,0-8,0	1,00 máx			0,9-1,2	0,07 máx.	180	

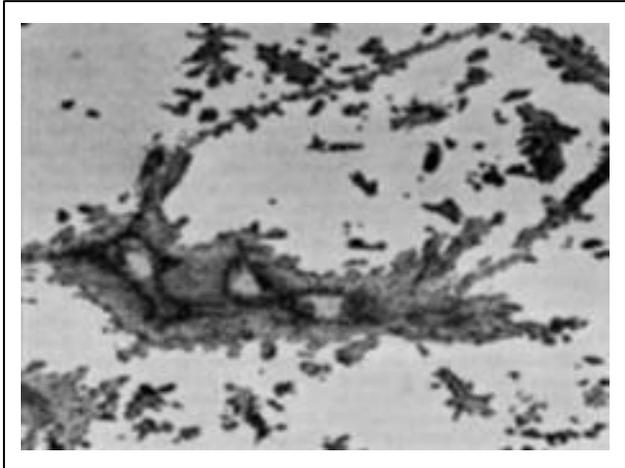
Fuente: (ASM Handbook, 1990)

Los aceros austeníticos al manganeso tienen microestructuras que son extremadamente sensibles al tamaño de la sección. Estos aceros son metaestables con solución sólida de carbono, manganeso y silicio en hierro gamma ( $\gamma$ ). Por lo tanto, el desarrollo de una microestructura simple de austenita depende de la rapidez y efectividad del temple en agua durante el tratamiento térmico. La microestructura es caracterizada por una matriz austenítica con carburos precipitados y pequeñas colonias de perlita resultado del rechazo del carbono por parte de la austenita durante el

enfriamiento, En la figura 5, se observan granos de austenita (claro) con carburos precipitados (oscuro) atacada con picral al 4%. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

### **Figura 5**

*Microestructura del acero Hadfield grado A. 100X*

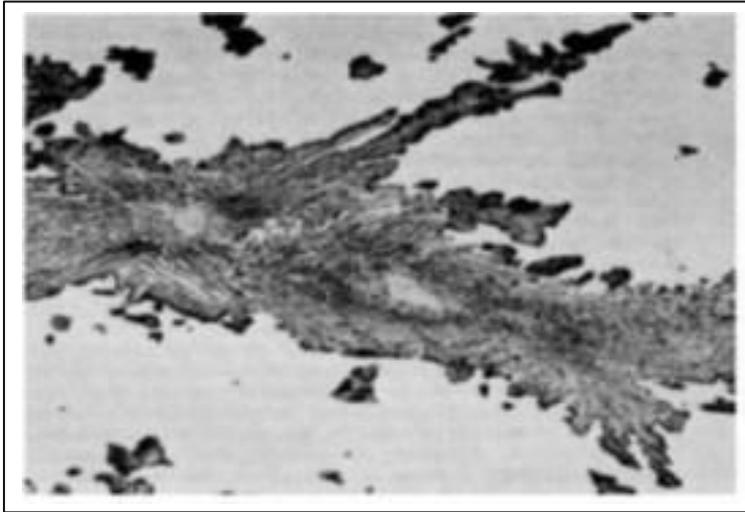


Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 232).

Estos carburos nuclean en los límites de grano y en áreas interdendríticas dentro de los granos de austenita. Los carburos interdendríticos pueden ser masivos, especialmente en los puntos triples, y algunas veces son rodeados por zonas de carburos laminares en la que se observan carburos precipitados rodeados de carburos laminares. Ver figura 6, microestructura atacada con picral 4%.

**Figura 6**

*Microestructura acero Hadfield grado A, 200X.*

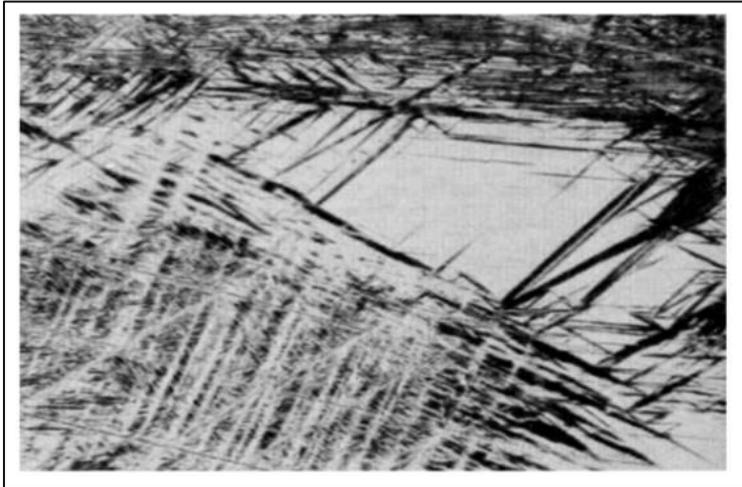


Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 232).

Los aceros Hadfield son sometidos a tratamientos térmicos de endurecimiento, los cuales consisten en calentar a una temperatura lo suficientemente alta para disolver los carburos, seguido de un enfriamiento rápido en agua agitada a temperatura ambiente para retener una mayor cantidad de carbono en la solución sólida metaestable. Estas aleaciones son no magnéticas, sin embargo, debido a la pérdida de carbono y algo de manganeso desde la superficie durante la solidificación dentro del molde y durante el tratamiento térmico, algunas veces existe una capa magnética (martensita) sobre la superficie del metal, se observa en la figura 7 una capa de martensita formada durante la deformación como resultado de la descarburación de la austenita. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

**Figura 7**

*Microestructura acero Hadfield grado A tratada térmicamente.*



Fuente: (Higuera, Tristáncho, & Florez, 2007, pág. 232).

#### **2.4.2 Propiedades Mecánicas del Acero Hadfield**

- **Resistencia al desgaste**

Higuera, Tristáncho, & Florez (2007). La principal propiedad mecánica de los aceros Hadfield es su gran resistencia al desgaste que fue atribuido a un rápido endurecimiento por deformación para lo cual se han propuesto varios mecanismos:

- ✓ Transformaciones que inducen tensiones como  $\gamma \rightarrow \alpha$  o  $\gamma \rightarrow \epsilon$ .
- ✓ Pares mecánicos.
- ✓ Interacción de dislocaciones con átomos de carbono en solución sólida, etc.

Su alta resistencia al desgaste está relacionada con la aleación con elementos de gran tendencia a la formación de carburos. Los aceros Hadfield son usualmente menos resistentes a la abrasión que las fundiciones blancas martensíticas o los aceros de alto carbono martensíticos, pero son mucho más resistentes que las fundiciones blancas perlíticas o aceros perlíticos.

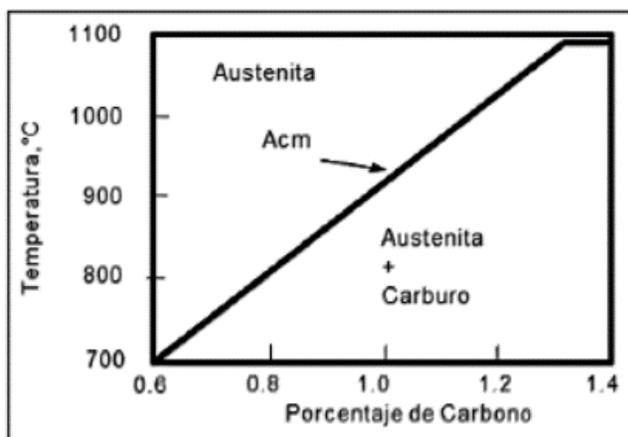
### 2.4.3 Efecto de Elementos Aleantes Sobre las Propiedades Mecánicas

#### a) Carbono y Manganeso

Las composiciones de la norma ASTM A128 no permite ninguna transformación austenítica cuando las aleaciones son templadas en agua desde temperaturas superiores a la línea Acm. Sin embargo, esto no restringe obtener menores valores de ductilidad en secciones gruesas debido a menores velocidades de temple. Esta pérdida de ductilidad de la aleación se debe a la formación de carburos a lo largo de los límites de grano y de otras áreas interdendríticas. Este fenómeno ocurre en casi todas las aleaciones comerciales excepto en las piezas muy pequeñas en las cuales las velocidades de enfriamiento son altas. La figura 8, muestra la temperatura Acm para un acero Hadfield con 13% de Mn con un contenido de carbono entre 0.6 y 1.4% C. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

#### Figura 8

*Solubilidad del carbono en un acero Hadfield.*

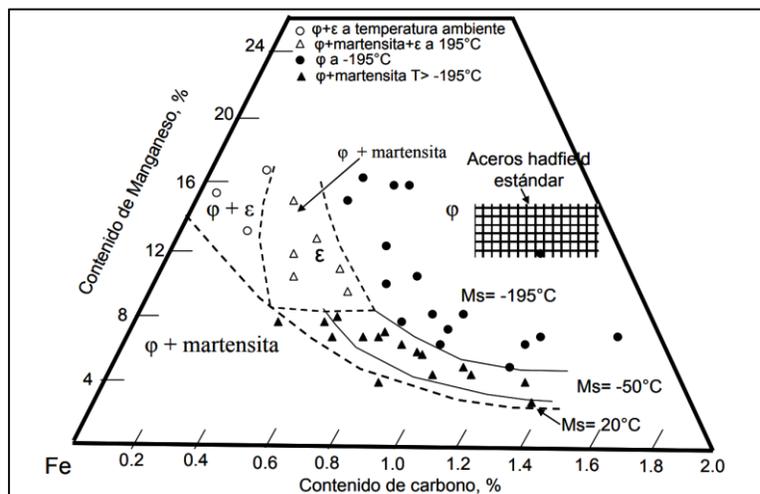


Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 233).

En la figura 9, se muestra el efecto del carbono y manganeso sobre la temperatura  $M_s$ , temperatura en la cual comienza la transformación martensítica desde la fase austenítica con todo el carbono y el manganeso en solución sólida.

### Figura 9

*Variación de la temperatura con el contenido de carbono y manganeso*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 234).

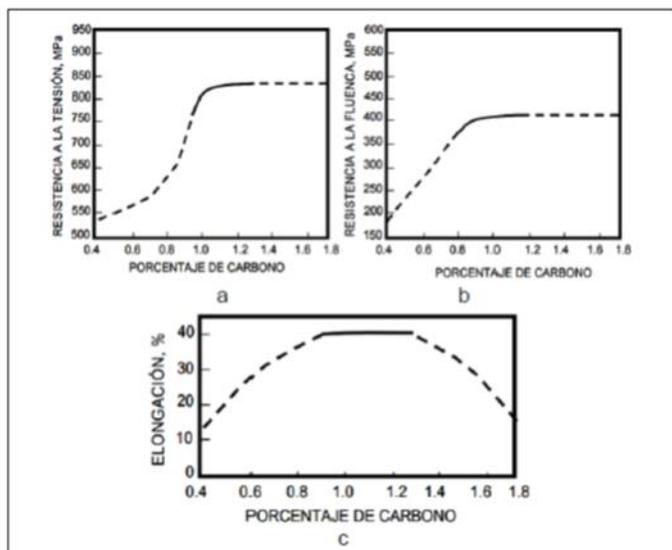
El contenido de carbono incrementa la resistencia de los aceros austeníticos al manganeso por encima del rango del acero grado A de la norma ASTM A 128, hasta 1.05%C. En el rango entre 1.05 y 1.35%C se estabiliza la resistencia en 827 MPa (120Ksi), con un contenido de manganeso diferente, como se observa en la figura 10. Cualquier valor por fuera de este dato se atribuye al efecto del tamaño de grano en la fase austenítica.

El aumento en el porcentaje de carbono dificulta cada vez más la obtención de austenita saturada en carbono, por tanto, se van a presentar carburos en los límites de grano lo cual producirá reducción en la resistencia a la tensión y disminución en la ductilidad del material. Sin embargo, con el incremento en el porcentaje de carbono se aumenta la resistencia al desgaste del acero austenítico al manganeso. Si se disminuye simultáneamente el porcentaje de carbono y el de

manganeso a rangos entre 0.53%C y 8.3% Mn o 0.62%C y 8%Mn el acero se endurece debido a la formación de martensita  $\alpha$  (BCC) Sin embargo, esta transformación no produce un aumento significativo en la resistencia al desgaste del material. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

### Figura 10

*Influencia del carbono sobre las propiedades mecánicas de un acero Hadfield*



Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234).

El manganeso estabiliza la austenita retardando la transformación martensítica (pero no eliminándola).

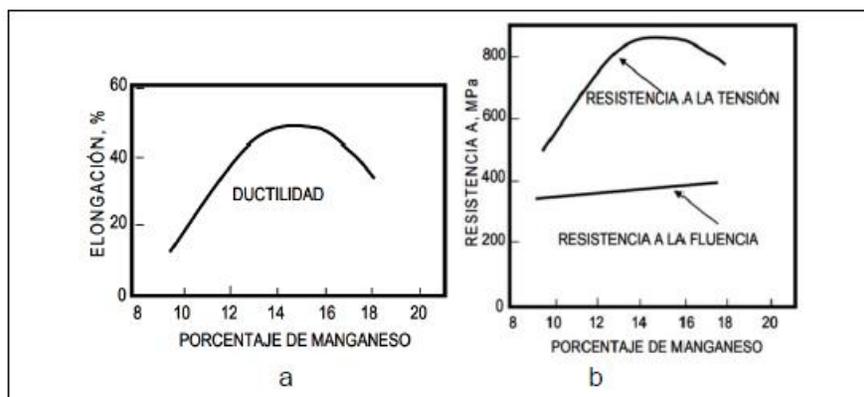
La figura 11 muestra la influencia del manganeso sobre la resistencia manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C y ductilidad de un acero austenítico. El manganeso afecta en baja proporción la resistencia a la fluencia de los aceros austeníticos al manganeso. En pruebas de tensión, la resistencia ultima y la ductilidad se incrementa rápidamente con el aumento en el contenido de manganeso hasta un 14%, por encima de este valor muestra un leve decrecimiento. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

Está presente en todos los aceros comerciales, ensancha la región  $\phi$ , por lo que los aceros con más de un 12%Mn son austeníticos; disminuye la temperatura de formación de la perlita y

también su contenido de carbono; incrementa la solubilidad del carbono en la austenita; favorece la formación de carburos y endurece la ferrita reduciendo un poco su plasticidad; su solubilidad en la austenita es ilimitada y en la ferrita se disuelve y hasta un 17%. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

### Figura 11

*Influencia del manganeso sobre el acero austenítico al manganeso*



Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234).

Además, incrementa la resistencia a la tracción, el límite elástico, la resistencia a la fatiga y a la fluencia lenta, la forjabilidad, la resistencia al desgaste, la resistencia al revenido, la fragilidad del revenido, la tendencia al embastecimiento de grano, la formación de carburos y la dilatación térmica. En cambio, disminuye la maquinabilidad, la embutibilidad, las conductividades térmica y eléctrica y la sensibilidad a la fractura frágil. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

El manganeso disminuye las velocidades críticas de enfriamiento durante el temple; con más de un 3%Mn, el enfriamiento al aire produce estructuras bainíticas y, si el contenido es mayor estructuras martensíticas; de ahí que su efecto sobre la templabilidad sea mayor que el de otros aleantes comunes. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

### b) Silicio y fósforo

Un contenido de silicio de 1 a 2% Si puede ser usado para incrementar moderadamente el esfuerzo de fluencia, pero desde el punto de vista operativo se prefieren otros elementos para este propósito. Cuando se adicionan porcentajes por encima de 2.2 % Si se presenta una pérdida abrupta en el límite de fluencia de los aceros austeníticos al manganeso, pero si los niveles de silicio son inferiores al 0.1% Si producen un decrecimiento en la fluidez durante la colada.

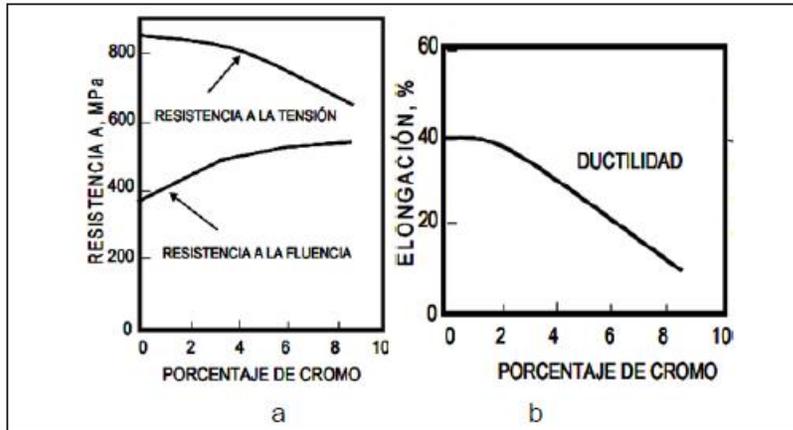
En cuanto al fósforo se considera una impureza excepto en los aceros en los que es deseable su efecto sobre la maquinabilidad y la resistencia a la corrosión; en estos casos, el contenido de fósforo puede ser hasta de 0.12%. En general el contenido de fósforo se debe mantener inferior al 0.035%, aunque las últimas investigaciones han demostrado que, en muchas aplicaciones, porcentajes de hasta 0.08% no son dañinos. Sin embargo, los porcentajes mayores producen fragilidad en frío, dada su tendencia a originar estructuras groseras y segregadas. El fósforo aumenta la dureza, pero disminuye la ductilidad y la tenacidad.

### **c) Cromo**

Adicionando a aceros con un contenido de carbono de 1.15%C, tanto el cromo como el molibdeno incrementan el esfuerzo de fluencia del material (ver figura 12). Aumentos muy significativos de cromo por encima del 2% reducen la ductilidad debido al incremento en la fracción en volumen de los carburos en la microestructura. El cromo provee resistencia a la corrosión atmosférica y al desgaste, sin embargo, el efecto no siempre es consistente y depende de aplicaciones individuales. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234)

### **Figura 12**

*Influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas*



Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 235).

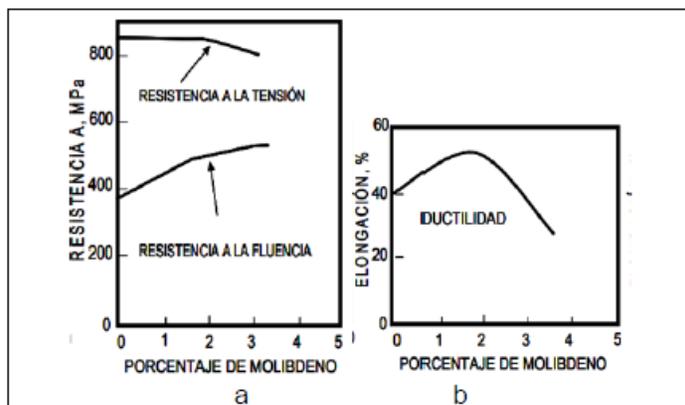
Debido al efecto estabilizante del cromo sobre los carburos de hierro, se deben utilizar temperaturas más altas durante los tratamientos térmicos con el fin de disolver los carburos previamente formados antes del temple en agua, en la figura 2.58 se observa la influencia del cromo sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15%C. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007)

#### d) Molibdeno

Adiciones, usualmente de 0.5 a 2%Mo, son hechas para mejorar la dureza y resistencia al agrietamiento de aleaciones en condición de colada, además, sirve para aumentar el esfuerzo de fluencia (y posiblemente la dureza) de secciones sometidas a tratamientos térmicos.. El molibdeno en solución efectivamente suprime la formación de carburos fragilizantes y de la perlita, aun cuando la austenita está expuesta a temperaturas por encima de 275°C durante la soldadura en servicio. El molibdeno en carburos primarios tiende a cambiar la morfología (ver figura 13), desde las dendritas de austenita a una forma nodular menos perjudicial, especialmente cuando el molibdeno excede el 1.5%Mo. (Fabián, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 235)

### Figura 13

*Influencia del molibdeno sobre las propiedades mecánicas*



Fuente: (Higuera, Tristancho, & Florez, 2007, pág. 235)

La adición de molibdeno en cantidades mayores al 1% puede incrementar la susceptibilidad de los aceros al manganeso a la fusión incipiente durante el tratamiento térmico. La fusión incipiente se refiere al fenómeno de licuefacción que ocurre debido a la presencia de constituyentes con bajo punto de fusión en áreas interdendríticas, esto puede ocurrir tanto dentro de los granos como a lo largo de los límites de grano. Esta tendencia es agravada por mayores niveles de fósforo ( $\%P > 0.05\%$ ), altas temperaturas (la cual promueve la segregación en la fundición) y altos niveles de carbono ( $\%C > 1.3\%$ ) en el acero.

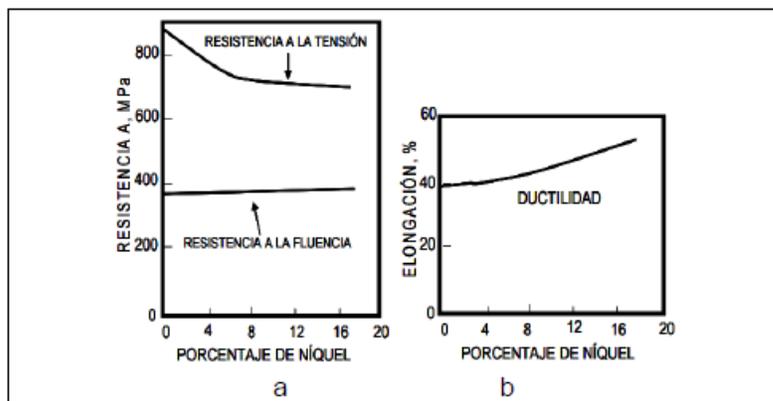
#### e) Níquel

En cantidades superiores al 4%, el níquel estabiliza la austenita debido a que es retenida en solución sólida. El níquel es particularmente efectivo para suprimir la precipitación de carburos laminares, los cuales se pueden formar entre 300 y 550°C. Por lo tanto, la presencia de níquel ayuda a retener las cualidades magnéticas en el acero, especialmente en las capas superficiales carburadas. Adiciones de níquel incrementan la ductilidad, disminuyen ligeramente el esfuerzo de fluencia y disminuye la resistencia a la abrasión de los aceros al manganeso. En la figura 14, se

observa la influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas de un acero austenítico al manganeso con un contenido de carbono de 1.15% C. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234)

### Figura 14

*Influencia del níquel sobre las propiedades mecánicas*



Fuente: (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 235).

### f) Vanadio

Es un fuerte formador de carburos y su adición a los aceros al manganeso incrementa sustancialmente el esfuerzo de fluencia pero con su correspondiente decrecimiento de la ductilidad. El vanadio es usado en aceros al manganeso endurecibles por precipitación en cantidades de 0.5 a 2%. Debido a la estabilidad de los carbonitruros de vanadio, se recomienda utilizar temperaturas de austenización mayores 1120°C a 1175°C antes del envejecimiento (usualmente entre 500°C a 650°C).

### g) Cobre

Como el níquel, el cobre en cantidades de 1 a 5% ha sido usado en aceros austeníticos al manganeso para estabilizar la austenita. El efecto del cobre sobre las propiedades mecánicas no ha

sido claramente establecido. Algunos reportes indican que puede tener efectos fragilizantes el cual puede ser debido a la limitada solubilidad del cobre en la austenita. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007, pág. 234)

#### **h) Bismuto**

Mejora la maquinabilidad de los aceros austeníticos al manganeso especialmente cuando el acero presenta niveles de manganeso superiores al 13%.

#### **i) Titanio**

Puede reducir el contenido de carbono en la austenita por la formación de carburos muy estables. El titanio puede también neutralizar un poco el efecto del fósforo. Altos niveles de este elemento pueden resultar en severas pérdidas de ductilidad.

#### **j) Azufre**

El contenido de azufre en los aceros al manganeso raramente influye en sus propiedades mecánicas debido a que el manganeso elimina el azufre en forma de inclusiones. Sin embargo, se recomienda mantener el azufre lo más bajo posible para minimizar el número de inclusiones en la microestructura que serán sitios potenciales para la nucleación de grietas por fatiga en servicio. (Higuera, Trisancho, & Florez, 2007).

### **2.4.4 Aplicaciones del Acero Astm A128**

El acero Hadfield se utiliza en los campos de movimiento de tierra, minería, perforación de pozos, siderurgia, trituradoras de roca, molinos, dientes de pala y bombas para manejar grava. También tiene usos militares en vehículos blindados, en piñones, engranajes, ruedas, cintas transportadoras, placas de desgaste y zapatas.

Entre las posibilidades de fabricación de piezas, repuestos, y recubrimiento de equipos tenemos: Conos y Mantos de Chancadoras, Recubrimientos de Equipos Pesados, Muelas, Tolvas, canales de transportación, Martillos y Platos de Trituradoras, Placas y Guías de desgastes, Vías de Ferrocarril, Carros Mineros, Secciones de Transición, Revestimientos de Molinos de alto impacto, Cargadores Frontales, Retroexcavadoras.

Sin embargo, la fabricación de mantos de chancadora cónica (Bowl – Mantle) han adquirido vital importancia, por su uso en la conminución de minerales; ya que las exigencias son mayores y las condiciones de chancado cada día son más extremas, necesitando que se manufacturen piezas de fundición de acero al manganeso de la más alta calidad, para un eficiente desempeño.

## **2.5 Características de los Revestimiento de los Molinos de Bola de la Empresa de Servicios**

### **Mineros Dharmain Investment SAC - Arequipa S.A.A.**

- Estándar: AISI, ASTM, BS, DIN, GB, JIS
- Grado: Q235/Q345+revestimiento de acero Hadfield
- Nombre de la marca: WALDUN
- Tipo: Placa de acero, acero bimetálico resistente al desgaste.
- Técnica: Recargue duro, soldadura por arco abierto, soldadura por arco sumergido
- Tratamiento de superficie: revestimiento duro, superposición.
- Aplicación: Minería, Acero, Cemento, Energía, Vidrio, Carbón, Azúcar, etc.
- Uso especial: Acero resistente al desgaste
- Ancho: 1400 mm, 2100 mm.
- Longitud: 3000 mm, 3400 mm, 3500 mm.
- Espesor: 16.7 mm

- Servicio de procesamiento: Doblado, Soldadura, Corte, Punzonado
- Nombre del producto: revestimiento de desgaste de revestimiento duro de acero Hadfield.
- Resistencia al desgaste: alta resistencia a la abrasión
- Dureza: 58-65 HRC

## **2.6 Soldadura de Revestimientos Duros y Recuperación de Piezas**

El recubrimiento y recuperación de piezas consiste en la aplicación de un material de aleación especial sobre una pieza metálica mediante diversos procesos de soldadura, con el fin de mejorar la resistencia al desgaste y/o recuperar las dimensiones apropiadas.

La propiedad que generalmente se quiere mejorar es la resistencia al desgaste producto de la abrasión, impacto, adhesión (desgaste metal-metal), calor, corrosión o una combinación de cualquiera de estos factores. Existe una amplia gama de aleaciones de recubrimiento aplicadas para casi cualquier pieza metálica. Algunas aleaciones son muy

duras, otras son más suaves con partículas dispersas de alta resistencia a la abrasión. Algunas aleaciones están diseñadas para llevar una pieza hasta una dimensión determinada (Buildup), mientras que otras están diseñadas para obtener una capa antidesgaste que proteja la superficie de trabajo. El recubrimiento y la recuperación de piezas se utilizan básicamente en dos áreas.

### ***2.6.1 La Recuperación de Piezas Devolviéndoles sus Dimensiones Originales***

Esto se logra mediante la aplicación sólo de capas de relleno o bien de relleno (Build-Up) y de recubrimiento antidesgaste (Overlay). En ambos casos, las propiedades de la pieza reacondicionada, son generalmente superiores a las de la pieza original. Por otro lado las piezas

metálicas que permanecen en buen estado pueden volver a ser recuperadas una y otra vez, si se siguen los procedimientos adecuados.

### ***2.6.2 La Protección Contra el Desgaste de Piezas Metálicas Nuevas***

La capa de recubrimiento antidesgaste (Overlay), se utiliza tanto en piezas nuevas como también en usadas, en aquellas zonas donde las piezas son más susceptibles de desgaste. La capa final de alta aleación ofrece una resistencia superior al desgaste en comparación con la resistencia del material base original. Esto a menudo duplica o triplica la vida útil del componente en relación a una pieza que no ha sido recubierta. En algunos casos el recubrimiento puede aumentar el valor del equipo, pero esto se compensa empleando materiales base a menor costo.

### ***2.6.3 Ventajas y Aplicaciones del Recargue***

La diferencia entre un componente o pieza nueva y una usada y desgastada, puede expresarse mediante la diferencia de peso entre ambas, o bien, mediante la diferencia entre sus dimensiones.

Una diferencia de apenas un pequeño porcentaje causa, a veces, que deba tirarse el componente usado a la chatarra habiendo perdido casi todo su valor.

La lucha contra el desgaste es muy importante y se han desarrollado muchas técnicas para aumentar la vida de los componentes expuestos a tal desgaste.

Una de las primeras técnicas que se desarrollaron fue el recargue mediante soldadura. Las aplicaciones realizadas con éxito durante más de 40 años han demostrado que esta técnica permite importantes ahorros, no sólo porque puede recuperarse el componente desgastado, sino que además, en algunas ocasiones, si la reparación se ha realizado correctamente, es posible obtener

una pieza recuperada con una superficie más resistente al desgaste que la averió que una pieza original.

Aumentar la vida de servicio de un componente tiene las siguientes ventajas:

- ✓ Se aumenta la eficacia y el rendimiento
- ✓ Se reduce el tiempo de paradas improductivo para reparaciones.
- ✓ Se reduce el coste de montar y desmontar las piezas.
- ✓ Posiblemente se reduce también el coste de producción ya que se reduce el coste de los equipos de producción.
- ✓ Se reduce el stock de piezas de recambio.

Si se utilizasen equipos formados por componentes de diferentes materiales, siendo cada uno de ellos el más óptimo para resistir el tipo de desgaste a que esté sometido, dicho equipo sería normalmente muy caro. En cambio, pueden utilizarse equipos con componentes de materiales más económicos, y recargarlos, bien cuando están nuevos, o a medida que vayan desgastándose, con los materiales de mayor resistencia al tipo de desgaste que sufren, con lo que se obtendrá finalmente un equipo de una larga durabilidad a un precio mucho más económico.

La técnica de revestimiento duro se desarrolla principalmente por dos razones: restauración dimensional y resistencia al desgaste/abrasión. Se utiliza ampliamente en la industria petroquímica y química, minería, industria siderúrgica, plantas de energía, ingeniería de válvulas e industria marina. El revestimiento duro se aplica normalmente para controlar el desgaste abrasivo, como el que encuentran los martillos de molino, herramientas de excavación, tornillos de extrusión, cizallas de corte, piezas de equipos de movimiento de tierras, molinos de bolas, piezas de trituradoras, pulverizadores de roca/carbón, superficies de asiento de válvulas, piezas del tren de rodaje de

tractores. , cojinetes de alto rendimiento, hélices de barrena, dientes de pala, brocas para perforación de roca, troqueles y rodillos en la industria siderúrgica y piezas de bombas.

## **2.7 Materiales que Pueden ser Recargados Mediante Soldadura**

Los metales féreos, no-féreos y algunas fundiciones pueden ser recargados mediante soldadura. La gran mayoría de componentes sometidos a desgaste que se emplean en la industria son de acero (de diferentes calidades) y este es el material más común para recargar mediante soldadura.

### **2.7.1 Aceros de Bajo y Medio Contenido de Carbono, (DE 0.10 A 0.25 %. Y DE 0.25 A 0.55 %)**

Pueden ser revestidos sin mayor dificultad, usando todos los procesos de soldadura. Se utilizan en vehículos, tuberías, elementos estructurales, se emplean también en piezas de ingeniería que requieren una alta resistencia mecánica y al desgaste.

Pre-Pos calentamiento, no es generalmente requerido a no ser que se trabaje en piezas muy grandes, deben ser evitadas fisuras en la superficie.

### **2.7.2 Aceros de Alto Contenido de Alto Contenido de Carbono (0.55% y mas)**

Pueden ser revestidos con todos los procesos de soldadura, es aconsejable realizar un Pre y Pos calentamiento. Las piezas endurecidas con tratamiento térmico, deben ser revenidas (eliminada su dureza) antes de soldar. Estos aceros se emplean principalmente en herramientas.

### **2.7.3 Aceros de Baja Aleación**

Pueden ser revestidos usando los mismos procesos y cuidados que con los aceros de alto carbono, y por tener alta resistencia son una buena base para el revestimiento. Ejemplo, los vagones de tren, en la actualidad se construyen muchos edificios con estructuras de aceros de baja aleación.

#### **2.7.4 Aceros al Manganeso (de 11 A 14% Mn)**

Se recomienda, el proceso de arco abierto, (sin gas, ni flux). Para asegurar un más adecuado control de la temperatura, la que debe ser lo más baja posible, haciendo cordones cortos, angostos, y alternados. La refrigeración de la pieza base, es también aconsejada, además el martilleo cuando el acero está caliente también ayuda, a aliviar tensiones. Empleándose principalmente, para cruzamientos de vías, mordazas de maquinas trituradoras, excavadoras, etc.

#### **2.7.5 Aceros Inoxidables (Serie 300)**

En general no presentan ninguna dificultad, aunque su tendencia a la deformación, obliga a evitar todo exceso de calor posible. Ejemplo utensilios y equipo para uso doméstico, hospitalario y en la industria alimentaria, tanques, tuberías, etc. Ejemplo AISI 301,304, 308, 312, 316, 316L, etc.

#### **2.7.6 Níquel y sus Aleaciones**

Los procesos que usan gases inertes, como el argón, se debe evitar en extremo la concentración de calor, para evitar porosidades del material base. Ejemplo en motores marinos e industria química, baterías recargables, acuñación de moneda, etc.

#### **2.7.7 Hierro Fundido**

Por su extrema tendencia a las fisuras, los revestimientos sobre este material no son recomendados, pero, para piezas sometidas a servicios de alta abrasión, si se han logrado revestimientos duros muy eficientes.

En general se requiere pre-calentamiento, a temperaturas entre los 1.200 y 1.400° F. y un enfriamiento lento, también es requerido luego de revestir un ligero martilleo que ayuda a liberar tensiones. Ejemplo guías de laminadoras, molinos de bolas y boquillas de extrusión.

## **2.8 Recargues Aplicados a cada Tipo de Desgaste**

### **2.8.1 *Recubrimientos Antiabrasión***

Para piezas que sufren abrasión, en general, se emplean aportes de elevada dureza. Debemos de tener presente que la dureza no es la única referencia para evaluar la resistencia a la abrasión de un determinado recubrimiento. Esto se ve claramente si comparamos el rendimiento en trabajo de un acero altamente aleado y de otro acero simple al carbono, teniendo ambos una dureza de 60 RC. El acero aleado resiste las condiciones de trabajo en mucha mejor forma que un acero sin alear. Esto se debe a que los elementos de aleación presentan características antidesgaste muy superior.

Para obtener los mejores resultados se recomienda aplicar el recubrimiento directamente sobre el metal base, siempre que se trate de un acero semi duro o de baja aleación, si se requiere un relleno muy grueso, debe usarse una base blanda más o menos plástica. En aceros templables o aceros al manganeso, es conveniente disponer una base plástica para evitar desprendimiento del recubrimiento.

### **2.8.2 *Recubrimientos Anti Erosión***

Como se ha visto, la erosión puede ser considerada como una forma combinada de abrasión e impacto, causada por materiales de grano fino y distribuidos de manera homogénea en un fluido. De acuerdo a estas características y teniendo en cuenta el efecto del fluido se recomienda recubrimientos de una dureza homogénea y superior a la del material que arrastra el fluido, pero que no sean tan rígidos para que soporten mejor el efecto de micrografía causada por la erosión.

### **2.8.3 *Recubrimientos Contra la Cavitación***

La cavitación produce micro fatiga. Los recubrimientos que mejor se acomodan a este tipo de desgaste son los de comportamiento plástico. Otros factores a considerar son la homogeneidad de la dureza y la uniformidad de la superficie, características que disminuyen el desgaste por cavitación. El emplear un recubrimiento duro es ventajoso si el fluido arrastra partículas abrasivas como es frecuente que suceda.

### **2.8.4 *Recubrimientos Anti Fricción***

Se deben aplicar recubrimientos que permitan obtener superficies de contacto muy pulidas, cuyas crestas y valles sean menos pronunciadas. Las partículas de óxido que se desprenden de las superficies en contacto puede ser de tipo refractario (óxido de fierro) en cuyo caso el desgaste se acelera o pueden actuar como medio lubricante, (óxidos de níquel, de cobre).

Se recomienda el uso de aceros inoxidable o aleaciones de alto contenido de níquel así como de cobre y sus aleaciones. En los trabajos de fricción debemos tener presente que si una de las superficies en contacto es más blanda, se desgastará más rápido. Esto es beneficioso si queremos proteger del desgaste a una de las piezas por ser su precio comparativo muy elevado o por algún otro motivo.

### **2.8.5 *Recubrimiento Contra la Corrosión***

Para proteger contra la corrosión, es decir, contra el ataque químico directo, se emplean aceros inoxidable, aleaciones en base a níquel, a cobalto y en base a cobre. La aleación se escoge de acuerdo al medio corrosivo. En el caso de la corrosión galvánica, la mejor precaución es soldar con materiales cuya composición sea similar a la del metal base.

### **2.8.6 *Recubrimiento Contra los Efectos Térmicos***

Se emplean aleaciones que trabajen a la más alta temperatura posible sin sufrir alteraciones estructurales o cambio de sus propiedades en forma significativa. Además, especialmente en el caso de las piezas que estén sometidas a ciclos térmicos se requiere soldaduras del tipo plástico o de elevado índice de elongación que acepten las dilataciones-contracciones que se presentan, como por ejemplo la soldadura a base de níquel.

## **2.9 Soldadura**

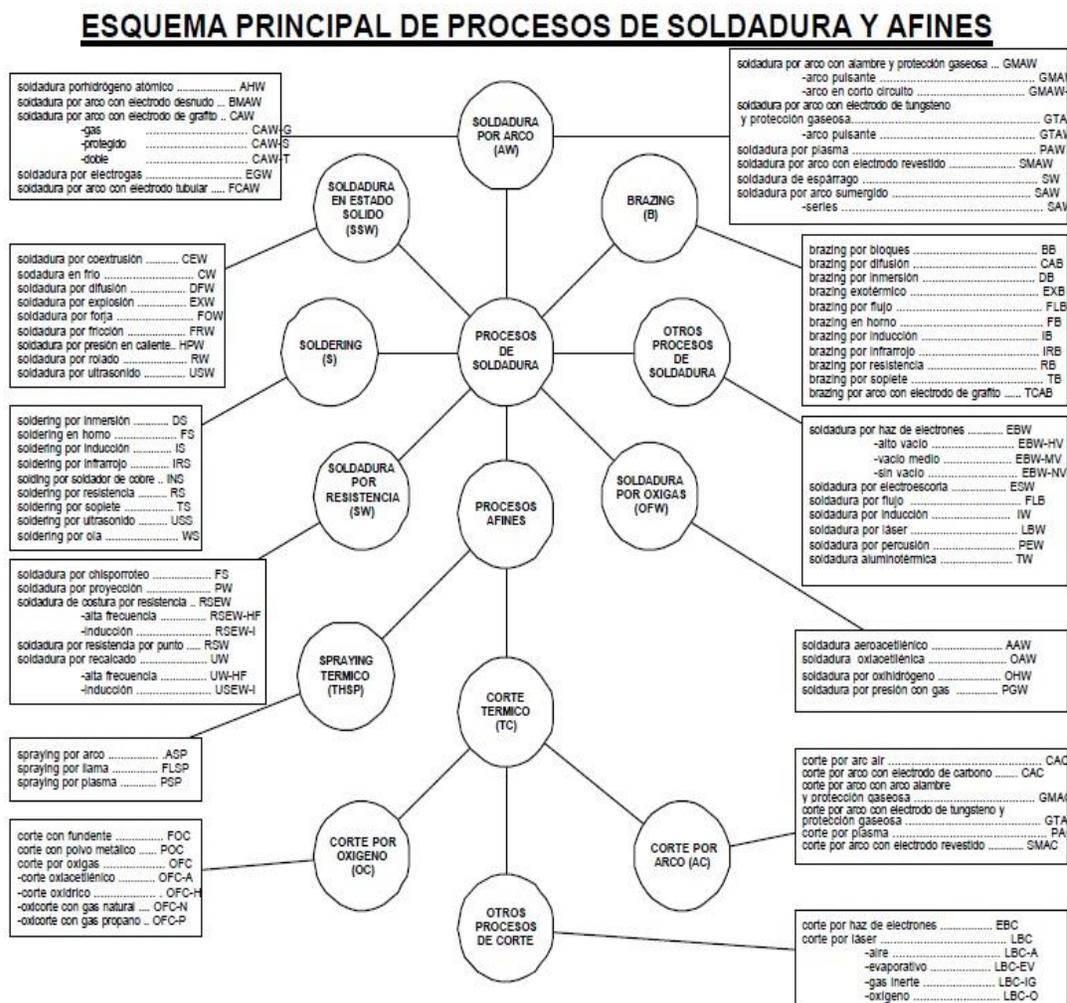
La Sociedad Americana de Soldadura (AWS) define la soldadura como: “una coalescencia localizada de metales o no metales producida mediante el calentamiento de los materiales a las temperaturas de soldadura requeridas. Con o sin la aplicación de presión, o mediante la aplicación de presión sola y con o sin el uso de metal de aportación”. En lenguaje menos técnico, una soldadura se produce cuando las piezas separadas de material que se van a unir se combinan y forman una pieza al ser calentadas a una temperatura lo suficientemente alta como para causar ablandamiento o fusión y fluyen juntas (Jeffus, 2009, pág. 14). La soldadura no es sólo un proceso de unión, sino también, es un proceso de mantenimiento, reparación y corte de piezas, (Rodríguez Pérez, 2013, pág. 15). El material de aportación y/o los electrodos raramente tienen la misma o parecida composición química que el material base.

### 2.9.1 Clasificación de los Procesos de Soldadura

El número de procesos de soldadura ha crecido en los últimos años. Estos procesos se diferencian principalmente en el modo en que se aplican el calor, la presión o ambas cosas y en el tipo de equipo utilizado. En la figura 15 se muestra una clasificación general de los procesos de soldadura (American Welding Society R. L, 2008)

Figura 15

Esquema principal de procesos de soldadura



Fuente: Horwitz, H. (1990). *Soldadura: Aplicaciones y prácticas*. México: Alfaomega. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/389085266/Soldadura-Aplicaciones-y-Practica-Horwitz>

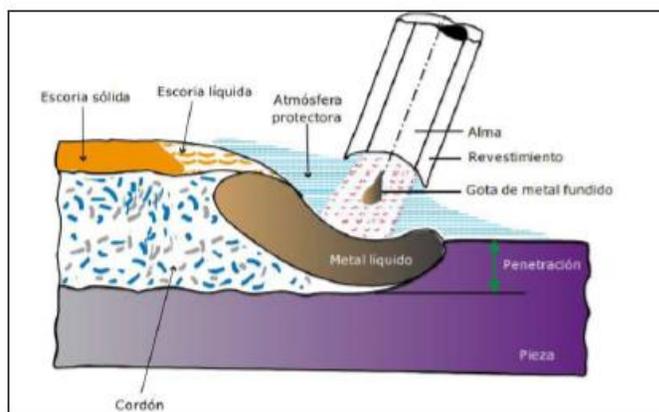
## 2.9.2 Soldadura Por Arco con Electrodo Revestido (SMAW)

### 2.9.2.1 Definición y antecedentes.

Según la AWS este proceso es denominado como SMAW, La soldadura manual es el más extendido entre todos los procedimientos de soldadura. La soldadura por arco eléctrico manual con electrodo revestido o simplemente “soldadura eléctrica”, como la conocemos en nuestro medio, es un proceso de unión por fusión de piezas metálicas. Mediante el establecimiento de un circuito eléctrico cerrado al poner en contacto la pinza porta electrodos, conectada a un generador de corriente con el metal base. En la figura 16 se observa la soldadura por arco con electrodo revestido y el resto de sus componentes. (Alonso, 2012)

### Figura 16

#### *Soldadura por arco con electrodo revestido*



Fuente: (Alonso, 2012, pág. 39)

### 2.9.2.2 Ventajas y limitaciones del soldeo por arco con electrodos revestidos (smaw).

En el soldeo manual por arco con electrodos revestidos se pueden soldar no solo acero al carbono sino también, aceros aleados, aceros inoxidables, fundiciones de hierro y algunos metales más como aluminio, cobre, níquel.

- **Ventajas:**

- ✓ Sirven tanto para soldadura en espacios abiertos (siempre que no llueva o haga viento fuerte) como para naves cerradas o talleres.
- ✓ Los equipos necesarios no son tan caros y se fabrican tan pequeños que son muy cómodos de utilizar, comparados con los otros procesos manuales.
- ✓ Con la protección del revestimiento se puede prescindir de gases y otros sistemas auxiliares. El avance en las prestaciones del electrodo permite que se utilice en soldaduras de más alto nivel como el de recipiente y tuberías de alta presión.
- ✓ Se puede utilizar con espesores desde 1,5-2mm y es productivo hasta algo más de 30mm.
- ✓ Proceso versátil debido a la disponibilidad y variedad de electrodos.
- ✓ Se puede emplear en cualquier posición, en locales abiertos y en locales cerrados, incluso con restricciones de espacio. No requiere conducciones de agua de refrigeración, ni tuberías o botellas de gases de protección, por lo que puede emplearse en lugares relativamente alejados de la fuente de energía. (society, 2012)

- **Limitaciones:**

- ✓ No es posible soldar metales de alta sensibilidad al oxígeno ya que los gases que desprende el revestimiento son insuficientes para su protección. Algunos de ellos titanio, circonio, tántalo, etc.
- ✓ No es posible soldar metales de bajo punto de fusión (con electrodo) como: plomo, estaño, zinc, etc.
- ✓ Es un proceso lento, por la baja tasa de deposición y por la necesidad de retirar la escoria, por lo que en determinadas aplicaciones ha sido desplazado por otros procesos.
- ✓ Requiere gran habilidad por parte del soldador.

- ✓ No es aplicable a espesores inferiores a 1.5 mm
- ✓ La tasa de deposición es inferior a la obtenida por los procesos que utilizan electrodo continuo, como el soldeo con alambre tubular o soldeo MIG / MAG. Esto se debe a que el electrodo solo puede consumirse hasta una longitud mínima (unos 50 *mm*), cuando se llega a dicha longitud el soldador tiene que retirar la colilla del electrodo no consumida e insertar un nuevo electrodo.
- ✓ Aunque en teoría se puede soldar cualquier espesor por encima de 1.5 *mm* en el proceso (society, 2012)

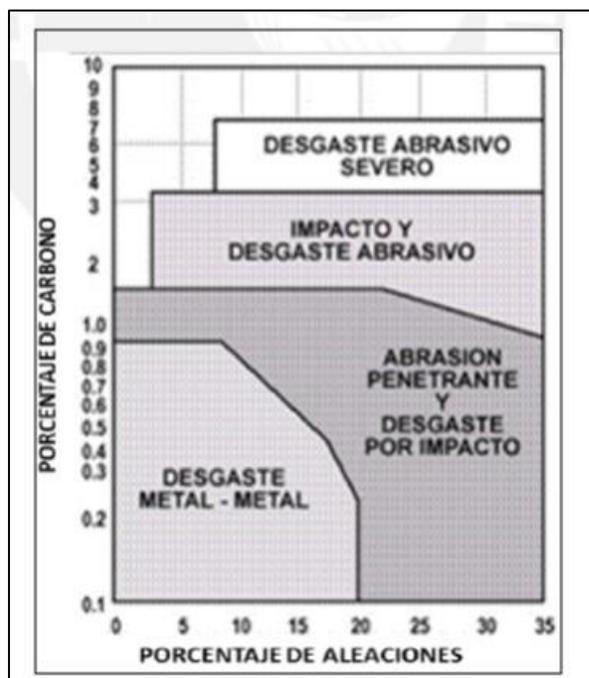
## **2.10 Denominación de Recubrimientos Duros y Microestructuras Características**

Los recubrimientos duros pueden contener o estar formados por una gran cantidad de aleaciones (Cr, Mn, Si, Mo, Ni, Nb, V, W o Ti), la selección de un determinado tipo de electrodo protector no es una tarea fácil; sin embargo de cierta manera esto se facilita ya que las aleaciones depositadas como capas de soldadura poseen ciertas características que determinan su comportamiento y propiedades frente a un determinado mecanismo de desgaste.

Según las condiciones de trabajo es posible identificar la capa de recubrimiento más adecuada y que pueda aminorar las pérdidas producidas por el desgaste. En la Figura 17 se puede apreciar una relación entre la composición química del recargue con los diferentes mecanismos de desgaste.

**Figura 17**

*Comportamiento de recubrimientos en base Fe ante un mecanismo de desgaste según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes*



Fuente: Funvesa, (2018). «Funvesa Fundición Ventanilla S.A - Molino SAG,» [En línea]. Available: <https://www.funvesa.com.pe/es/ver-productos/1-molienda/3-molino-sag>.

A diferencia de los electrodos utilizados para la unión de piezas, los electrodos de recubrimiento son aleaciones frecuentemente desarrolladas cuidadosamente por cada empresa. Muy pocos de ellos se clasifican según la AWS (American Welding Society); pero en general los recubrimientos se pueden clasificar en cuatro categorías:

**a) Aleaciones base Hierro:**

Son las recargas más utilizados e incluyen una gran gama de aleaciones. Estos van desde los aceros de baja aleación que contienen entre 2-12 % de elementos de aleación, y los de alta aleación con contenidos entre 12-50% de elementos de aleación.

**b) Aleaciones base Níquel:**

Contienen entre un 70-80% de níquel, cromo 11-17%, 2,5-3,5% de boro, y 0,30-4,5% de silicio. Es una característica la formación de carburos y boruros en la matriz, lo cual le aporta una gran resistencia al desgaste abrasivo a bajas temperaturas. Estas aleaciones son ideales para el desgaste metal con metal.

**c) Aleaciones base Cobalto:**

Las aleaciones base cobalto contienen 45-63% de cobalto, cromo 24-29%, 5,50-13,5% de tungsteno y 1,10-3,20% de carbono. Estas aleaciones son las más versátiles pues son resistentes al calor, corrosión, abrasión, bajas cargas de impacto y desgaste metal con metal.

**d) Aleaciones base Tungsteno:**

Las aleaciones de tungsteno producen la mayor resistencia contra el desgaste. Se componen de granos de carburos de tungsteno distribuidos en una matriz de hierro, acero al carbono, aleaciones de cobalto, aleaciones de níquel.

Las aleaciones menos costosas son las que tienen base Hierro y conforme se mejoran características mecánicas se cumple la siguiente relación en costos:

$$A.Tungsteno > A.Cobalto > A.Niquel > A.Hierro$$

En general un recubrimiento de soldadura según ISO/TC44/SC3 se designa según el tipo de electrodo que se utiliza, la aplicación, el elemento base de las aleaciones y el tipo de microestructura que lo caracteriza,

En el alcance de este trabajo se incluye solo recubrimientos duros base Fe, la mayoría de estos se pueden clasificar dentro de 17 categorías (ver tabla 3).

**Tabla 3***Designación de recubrimientos según su microestructura*

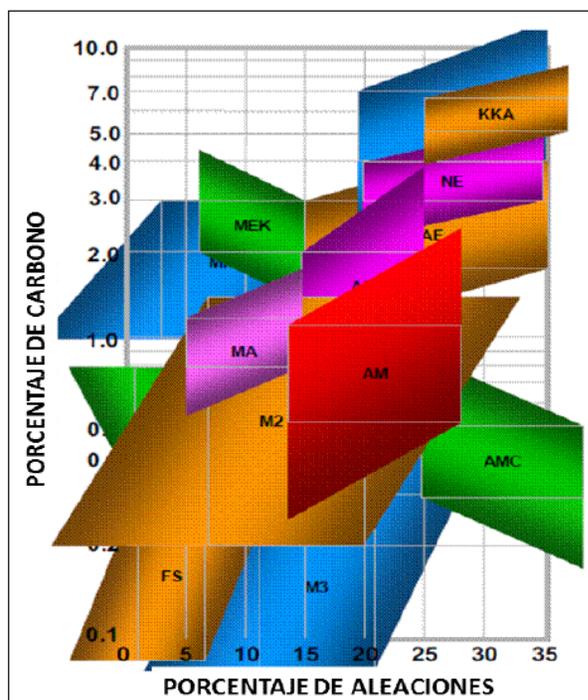
	Microestructura	Composición Química	Dureza HV
Fe-FS	Mayor presencia de ferrita con fase secundaria	• Carbono: Hasta 0.3% • E. Aleantes (%): Hasta 6%	De 200 a 400
Fe-M1	Acero martensítico de baja aleación	• Carbono: Desde 0.3% hasta 0.8% • E. Aleantes: hasta 6%	De 446 a 697
Fe-M2	Martensita con endurecimiento secundario	• Carbono: Desde 0.2% hasta 1.5% • E. Aleantes: Desde 7% hasta 20%	De 446 a 697
Fe-M3	Inoxidable martensítico	• Carbono: Desde 0.05% hasta 0.6% • E. Aleantes: Desde 10% hasta 20%	De 302 a 595
Fe-M4	Martensita con envejecimiento	• Carbono : 0.02 % • E. Aleantes : 17% Ni, 4% Mo,9% Co, 0.5% Ti + V	De 302 a 392 (STT) De 513 a 595 (CTT)
Fe-MA	Aproximadamente igual cantidad de martensita y austenita	• Carbono: Desde 0.8% hasta 1.5% • E. Aleantes: Desde 10% hasta 20%	De 392 a 697
Fe-MK	Martensita con carburos	• Carbono: Desde 1% hasta 3% • E. Aleantes: Mínimo 13%	De 513 a 595
Fe-MEK	Martensita con mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 2% hasta 3% • E. Aleantes: Desde 6% hasta 15%	De 446 a 697
Fe-A	Inoxidable austenítico con bajo contenido de ferrita	• Carbono: Desde 0.02% hasta 0.15% • E. Aleantes: Mínimo 40%	De 188 a 263
Fe-AF	Inoxidable austenítico con alto contenido de ferrita	• Carbono: Desde 0.05% hasta 0.15% • E. Aleantes: Mínimo 40%	De 213 a 294HV
Fe-AM	Acero austenítico al manganeso con bajo contenido de cromo	• Carbono: Desde 0.5% hasta 1.12% • E. Aleantes: Mínimo 30%	aprox. 318 HV
Fe-AMC	Acero austenítico al manganeso con similar contenido de cromo y manganeso	• Carbono: Desde 0.3% hasta 0.5%. • E. Aleantes: Desde 25% hasta 40%. Principalmente Mn y Cr en iguales proporciones.	aprox. 294 HV
Fe-AK	Acero austenítico al manganeso con presencia de carburos	• Carbono: Desde 1% hasta 2%. • E. Aleantes: Desde 15% hasta 25%. Principalmente Mn además de fuertes formadores de carburos como Ti o Nb.	De 302 a 492
Fe-PAE	Austenita primaria con mezcla eutéctica austenita-carburos	• Carbono: Desde 2% hasta 3% • E. Aleantes: Desde 15% hasta 35%. Principalmente: Cr y Mo.	De 392 a 595
Fe-NE	Mezcla eutéctica austenita-carburos	• Carbono: Desde 3% hasta 4% • E. Aleantes: Desde 20% hasta 35%. Principalmente Cr y Mo.	De 560 a 653
Fe-PKE	Carburos de cromo primario con mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 4% • E. Aleantes: Desde 20% hasta 35%. Principalmente: Cr.	De 653 a 832
Fe-KKA	Carburos de cromo primario con presencia de carburos y mezcla eutéctica (austenita-carburos)	• Carbono: Desde 5%. • E. Aleantes: Desde 25% hasta 40%. Principalmente Cr.	De 653 a 940

Fuente: (Turpo Cari, 2018)

De manera similar a la Figura 8, los tipos de microestructuras referidos en la tabla 3 se pueden predecir según el contenido de carbono y de elementos de aleación que existan en el recargue, tal como se muestra en la Figura 18.

**Figura 18**

*Microestructuras de recubrimientos base Fe según el porcentaje de carbono y de elementos aleantes*



Fuente: Funvesa, (2018). «Funvesa Fundición Ventanilla S.A - Molino SAG,» [En línea]. Available: <https://www.funvesa.com.pe/es/ver-productos/1-molienda/3-molino-sag>.

Cada uno de los recubrimientos descritos en la tabla 3 presentan una microestructura característica principalmente dependiente de su composición química, esto define sus propiedades mecánicas y su aplicación.

### **2.11 Características Específicas (efectos) de Algunos Elementos de Aleación**

El contenido de elementos aleantes es tan importante como el metal base; la microestructura final no solo depende del comportamiento que caracteriza a un determinado elemento de aleación de manera independiente, sino que es necesario conocer su influencia sobre la microestructura final del material del recubrimiento duro.

En la Tabla 4 se puede apreciar que para el caso específico de los aceros la mayoría de los elementos aleantes indicados, son comúnmente formadores de carburos o forman soluciones sólidas.

**Tabla 4**

*Comportamiento de los elementos de aleación más utilizados*

ELEMENTO DE ALEACIÓN	GRUPO 1 DISUELTO EN FERRITA	GRUPO 2 COMBINADO EN CARBURO
Níquel	Ni	
Silicio	Si	
Aluminio	Al	
Cobre	Cu	
Manganeso	Mn	↔ Mn
Cromo	Cr	↔ Cr
Tungsteno	W	↔ W
Molibdeno	Mo	↔ Mo
Vanadio	V	↔ V
Titanio	Ti	↔ Ti

Fuente: Tomado de, (Turpo Cari, 2018)

Los elementos formadores de carburos están en proporciones mayores que cuando se encuentran como fase carburos, la cantidad de carburos estará limitada por el contenido de carbono, el resto entra en solución sólida con la ferrita lo cual propicia su endurecimiento, el manganeso por ejemplo tiene una gran tendencia a disolverse en la ferrita y endurecer la matriz puesto que todo elemento que forma solución sólida con el hierro afecta la dureza de la ferrita (ASTM 2019).

#### **a) Efectos del Molibdeno**

El molibdeno es un potente formador de carburos, no se oxida con facilidad y con respecto a las propiedades mecánicas se puede mencionar que aumenta la resistencia a la tracción, la

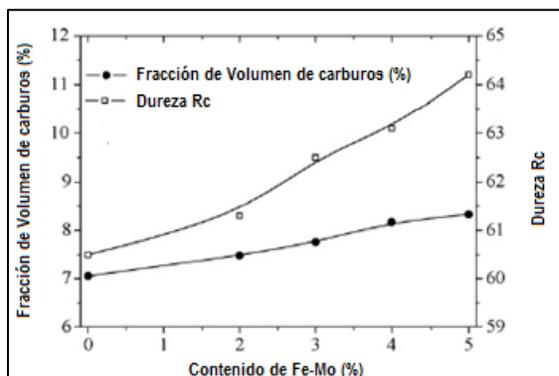
resistencia mecánica en caliente, la resistencia a la fatiga, el límite elástico, la dureza, la resiliencia, la templabilidad, la resistencia al desgaste, etc. Pero disminuye la soldabilidad de un acero.

El contenido de molibdeno que está presente en el recubrimiento duro se incrementa conforme se aumenta el porcentaje de Fe-Mo presente en el electrodo, esto no se da necesariamente con el titanio y vanadio que tienen una alta afinidad con el oxígeno y tienden a la formación de óxidos durante el proceso de soldeo.

Por otro lado, la dureza y la fracción en volumen de los carburos en la capa de revestimiento se incrementan conforme aumenta la presencia de molibdeno, además el efecto que este produce se ve reflejado en la considerable disminución del volumen desgastado de una aleación Fe-Mo (Ver Figura 19)

### Figura 19

*Fe-Mo vs. Fracción de volumen de carburos y Fe-Mo vs. Dureza*



Fuente: (ASTM International, 2018)

### b) Efectos del Titanio y Vanadio

Al igual que el molibdeno, el titanio y el vanadio son fuertes formadores de carburos, contribuyen al afinamiento de granos y disminuye la tendencia a las segregaciones.

La microestructura es el factor más importante que influye sobre las propiedades mecánicas de un material, el desgaste es un efecto que puede ser atenuado principalmente incrementando la dureza de la microestructura sometida a estas condiciones.

## **2.12 Selección de Proceso de Soldadura**

La mayoría de los procesos de recubrimiento y relleno involucran fusión por soldadura, donde el metal de relleno y la superficie del metal base funden juntos y solidifican y luego resolidifican. Los procesos oxiacetilénicos producen calentamiento y enfriamientos lentos, lo cual requiere tener un buen control del trabajo a realizar. Los equipos son muy portables y menos costosos que los de arco eléctrico. Por otro lado, los procesos de arco eléctrico son más rápidos y más baratos si ha de realizarse una gran cantidad de trabajo y no requiere una habilidad especial para realizarlos, tal como los procesos de soldadura por gas. Los ciclos de calentamiento y enfriamiento son más rápidos por arco eléctrico, lo que significa que las tensiones térmicas sobre el metal base y el recubrimiento son muchos mayores, por lo tanto, son más susceptibles a fisuramiento. En la selección de procesos de soldadura es necesario tener en cuenta los criterios mostrados en la figura 20. (Maury R, Niebles N, & Torres S, 2009)

**Figura 20**

*Factores que Inciden en la selección del proceso de soldadura*



Fuente: (Maury R, Niebles N, & Torres S, 2009).

Para trabajos pequeños y uso en el campo, la elección suele ser entre procesos oxiacetilénicos o electrodos por arco eléctrico. Para usos en plantas de producción es preferible utilizar procesos automáticos o semiautomáticos como MIG y MAG (Metal gas inerte/Metal gas activo) o proceso por arco sumergido. En la mayoría de los trabajos se presentan más de uno de los tipos de desgaste, y por tal motivo la selección correcta de un electrodo de recubrimiento protector debe hacerse con criterio de la importancia e influencia de cada factor en el proceso de desgaste o deterioro de la pieza.

### **2.13 Defectos más Comunes Presentes en la Aplicación de Recubrimiento**

Aparte de las tensiones residuales y la distorsión en la superficie final, pueden ocurrir otros defectos en la soldadura de recubrimiento, (Netexplora.com, 2024)

- **Cuartheaduras Internas y superficiales**

Las cuartheaduras son interrupciones tipo fractura en la soldadura misma o en el metal base antecedente a la soldadura. Este tipo es tal vez el defecto de soldadura más serio debido a que constituye una discontinuidad en el metal, que produce una importante reducción en la resistencia de la soldadura. Las grietas en la soldadura se originan porque la soldadura o el metal base o ambos son frágiles o tienen baja ductilidad combinadas con una alta limitación durante la contracción (Echevarria, 2002)

- **Cavidades Internas entre capas**

Estas incluyen diversos efectos de porosidad y contracción. La porosidad consiste en pequeños defectos en el metal de la soldadura, formados por gases atrapados durante la solidificación de las capas de recubrimiento. Los defectos pueden tener forma esférica (huecos en forma de burbuja) o alargada (huecos en forma de gusano). Los defectos de contracción son cavidades formadas por el encogimiento durante la solidificación. Estos dos tipos de defectos tipo cavidad son semejantes a los defectos que se encuentran en la fundición y ponen de manifiesto la similitud entre esta y la soldadura (Echevarria, 2002).

- **Fusión Incompleta**

Un defecto conocido como carencia de fusión es simplemente una gota de soldadura en la cual no tuvo la fusión completa sobre la capa de la sección transversal de la que se recubre la soldadura. Una carencia de penetración significa que la fusión no penetró lo suficiente en la superficie del recubrimiento en relación con las normas especificadas. presencia de esfuerzos multidireccionales localizados que en algún punto rebasan la resistencia máxima del metal. Cuando se abren grietas durante la soldadura o como resultado de ésta, generalmente solo es

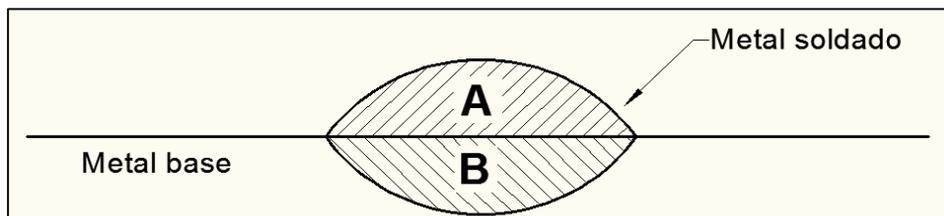
El metal base no se funden en forma integral en la raíz de la soldadura. Puede ser ocasionada porque la cara de la raíz de la soldadura de ranura no alcance la temperatura de fusión a toda su altura, o porque el metal de la soldadura no llegue a la raíz de una soldadura y deje el hueco ocasionado por el punteo del metal de la soldadura sobre la superficie (Echevarria, 2002).

## 2.14 Dilución

Durante la soldadura por fusión, el metal de cada una de las partes a unir y el aporte (si se utiliza) se funden conjuntamente formando el baño de fusión o metal de soldadura. Tras la posterior solidificación, el metal de soldadura resultante tendrá una sola fase o una mezcla de dos fases. Para cualquier composición de metal de aporte dada, los cambios en el procedimiento de soldadura pueden causar variaciones en la dilución. En la figura 21, se muestra esquemáticamente las zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución (Fosca, 2007)

**Figura 21**

*Zonas de un depósito de soldadura para el cálculo de la dilución*



Fuente: (Fosca, 2007)

El grado de dilución se puede estimar de acuerdo a la siguiente ecuación 1 y 2.

$$\% \text{ dilucion} = \frac{B}{A+B} \times 100 \quad \text{Ec. 1}$$

$$\% \text{ Dilución} = \frac{\text{Área sombreada}}{\text{Área total del cordón de soldadura}} \times 100 \quad \text{Ec. 2}$$

En la tabla 5, se muestran los niveles de dilución para diferentes procesos de soldadura.

**Tabla 5***Niveles de dilución de los procesos de soldadura*

Proceso	Dilución (%)	Observaciones
Electro escoria	100	El metal base contribuye con la zona fundida-
Soldadura por haz de electrones	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Soldadura laser	100	Excepto si se emplea hilo de aporte
Arco eléctrico manual (SMAW)	20 – 30	En general
	30 – 40	Pasada de raíz
	10 - 20	En depósitos (overlay)
Arco sumergido	25-50	En general
	10 - 15	En depósitos (overlay)
MIG/MAG (GMAW)	25 – 50	Arco “spray”
	15 - 30	Arco “Arco cortocuito”
TIG (GTAW)	20 – 50	
	100	Sin material de aporte

Fuente: (Fosca, 2007)

**2.14.1 Variables de Soldadura que Afectan la Dilución**

Gran cantidad de depósitos se realiza con los procesos de soldadura por arco eléctrico. Debido a la importancia de la dilución, es necesario conocer el efecto de cada variable. Las mismas son (Fosca, 2007):

**a) Amperaje**

Incrementando el amperaje (densidad de corriente) aumenta la dilución. El arco es más caliente y rígido, la penetración es más profunda y mayor es la fusión del metal base.

**b) Polaridad**

Con corriente directa con polo negativo al electrodo (CDEN) da menos penetración y, por lo tanto, menor dilución que con el electrodo al polo positivo (CDEP). Alternando las corrientes da diluciones intermedias a ambas.

**c) Diámetro del electrodo**

Diámetros pequeños de electrodo significan menores amperajes y por lo tanto menor dilución. En soldadura por arco bajo protección gaseosa, para un dado amperaje, diámetros grandes de electrodo (y bajas densidades de corriente) dan diluciones más bajas si el mayor diámetro resulta en transferencia globular; mientras que los diámetros más pequeños resultan en transferencia de rocío. Con otros procesos de soldadura el resultado puede variar.

**d) Extensión del electrodo**

Un electrodo largo disminuye la dilución (para procesos con electrodo consumible) por incremento en la velocidad de fusión del electrodo (calor) y la difusión de la energía del arco mientras ésta afecte sobre el metal base. A la inversa, un electrodo corto incrementa la dilución, dentro de ciertos límites.

**e) Paso o separación de cordones**

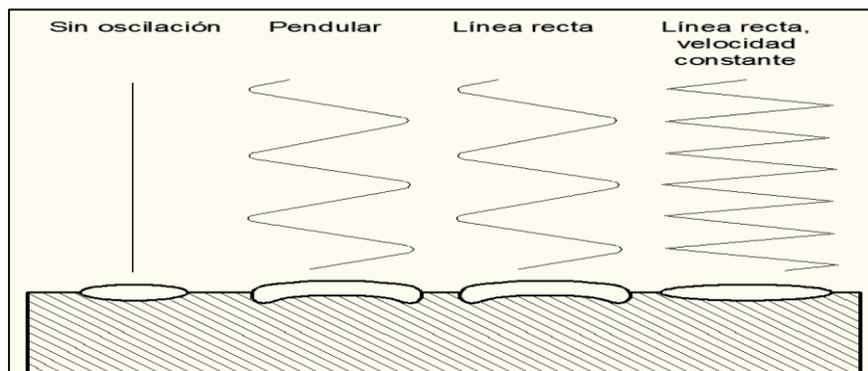
Una ajustada separación entre cordones (mayor superposición) reduce la dilución debido a que mayor cantidad de cordones previos y menor material base se refunden e incorporan a la pileta líquida. Una amplia separación de cordones (menor sobreposición) incrementa la dilución.

**f) Oscilación del electrodo**

Cuando se oscila ampliamente el electrodo, se obtienen cordones anchos y de menor penetración, por lo que es menor la dilución; los cordones finos, estirados, producen máxima dilución. La frecuencia de oscilación también afecta la dilución, como regla se puede indicar que a mayor frecuencia de oscilación existirá menor dilución. En la figura 22, se puede observar el efecto que tiene el tipo de oscilación en el depósito.

## Figura 22

*Tipos de oscilación y su efecto en el cordón de soldadura*



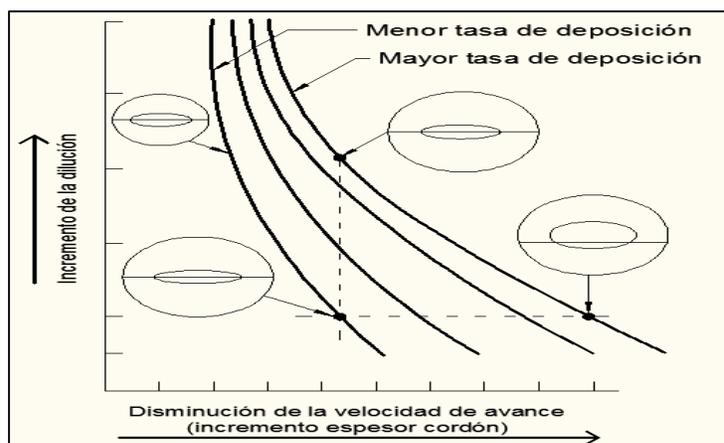
Fuente: Tomado de (Gualco, 2011)

### g) Velocidad de avance

En la figura 23, se muestra el efecto de la velocidad de avance en la dilución. Un decaimiento en la velocidad de avance disminuye la cantidad de metal fundido por unidad de tiempo (t) y/o distancia e incrementa la cantidad de recargue agregado: esto reduce la dilución. Esta reducción se genera por el cambio de forma del cordón y el espesor y por el hecho de que la fuerza del arco es ejercida sobre la pileta líquida más que sobre el metal base.

## Figura 23

*Efecto de la velocidad de avance sobre la dilución*



Fuente: Tomado de (Gualco, 2011)

#### **h) Posición de soldadura e inclinación de la pieza de trabajo.**

Este efecto tiene una importante influencia sobre la dilución. Dependera de la posición o la inclinación de la pieza de trabajo.

### **2.15 Composición Química del Cordón de Soldadura**

Las propiedades mecánicas son aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas, estas dependen de la composición química y de la estructura cristalina que tenga. El carbono afecta notablemente el comportamiento de los aceros; en principio, influye sobre la dureza y la morfología de la estructura martensítica.

La temperatura disminuye con el aumento del contenido de carbono y, por lo tanto, también lo hace la probabilidad de autorevenido durante el temple que surge a través del calor aportado en la soldadura.

Los aceros al carbono están constituidos en su mayoría por aleaciones complejas, teniendo como constituyentes fundamentales, además del hierro carbono, también el manganeso y el silicio, y como impurezas el fósforo y el azufre.

- **El Manganeso.** – Su principal característica es que aumenta la desoxidación, aportando a su vez más endurecimiento al elemento final. Este metal está presente en el intervalo de 0.03 a 1.00%. Cuando existe una cantidad de Mn mayor que la requerida para formar MnS, el exceso se combina con carbono para formar el compuesto (Mn<sub>3</sub>C) que se asocia con el carburo de hierro (Fe<sub>3</sub>C) en cementita. El manganeso también promueve la solidez de las piezas fundidas al acero a través de su acción de desoxidación en acero líquido.
- **El silicio.** – Este elemento aparece en todo el acero, lo mismo que el manganeso, porque se añade intencionalmente durante el proceso de fabricación. Se emplea como elemento

desoxidante complementario del manganeso con objeto de evitar que aparezcan en el acero los poros y otros defectos internos. Los aceros pueden tener porcentajes variables de 0.20 a 0.40% de Si. Promueve la desoxidación del acero líquido a través de la formación de dióxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ , tendiendo así a dar mayor solidez en la pieza fundida, mejora ligeramente la templabilidad y la resistencia de los aceros a disminuir la tenacidad.

- **El fósforo.** - El contenido de fósforo se mantiene por debajo del 0.04%, cantidad que tiende a disolverse en ferrita, aumentando ligeramente la resistencia y la dureza. En algunos aceros, una cantidad de fósforo entre el 0.07 y el 0.12%, parece mejorar las propiedades del corte. En mayores proporciones, el fósforo reduce la ductilidad, aumentando con ello la tendencia del acero a agrietarse cuando se trabaja en frío.
- **El azufre.** - En los aceros comerciales, el azufre se mantiene generalmente por debajo del 0.05%. Este metaloide se combina con el hierro para formar sulfuro de hierro ( $\text{FeS}$ ), el cual forma, a su vez, una aleación eutéctica de bajo punto de fusión, con hierro que tiende a concentrarse en las fronteras de grano. Cuando el acero se forja o lamina a altas temperaturas, se hace frágil debido a la fusión del eutéctico sulfuro de hierro, que impide la cohesión de los granos permitiendo que se desarrollen grietas. En presencia de manganeso, el azufre tiende a formar sulfuro de manganeso ( $\text{MnS}$ ), en vez de sulfuro de hierro. El  $\text{MnS}$  suele permanecer como inclusiones bien distribuidas por toda la estructura. Así pues, la presencia del Mn es un inhibidor del efecto que produce el azufre. Con la presencia del azufre se mejora la maquinabilidad, esto se debe a la presencia de inclusiones sulfurosas más numerosas, que hacen pedazos las rebabas, reduciendo de esta manera el desgaste de la herramienta.

Para el control de la composición química en la soldadura de una sola pasada de cordón de soldadura se emplea la ecuación 3.

$$X_w = (DT) (X_A) + (1-DT) (X_f) \dots \dots \dots (Ec. 3)$$

Donde:

$X_w$  = Porcentaje medio del elemento X en el depósito (composición del metal base).

$X_A$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal base A.

$X_f$  = Porcentaje medio del elemento X en el metal de aporte (a determinar)

$DT$  = Porcentaje de dilución del metal base A expresado como un decimal.

En la soldadura multipase, la composición de cada cordón de soldadura debe ser relativamente uniforme. La composición media de todo el metal de soldadura puede ser calculada cuando se conocen dos cosas: (1) la relación de los volúmenes de metales de base fundidos con el volumen de metal de soldadura entero, y (2) las composiciones de los metales base y de aporte. La dilución puede basarse en mediciones de área de sección transversal a través de una soldadura de prueba. La figura N° 2.15 ilustra cómo determinar la dilución por dos metales comunes, A y B, al soldar con un material de aporte F. El porcentaje promedio de un elemento de aleación específico en el metal de soldadura diluido puede ser calculado usando la ecuación 4.

$$X_w = (D_A) (X_A) + (D_B)(X_B)(1-DT) (X_F) \dots \dots \dots (Ec. 4)$$

Donde:

$X_w$  = Es el porcentaje promedio del elemento X en el metal de soldadura.

$X_A$  = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base A.

$X_B$  = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base B.

$X_F$  = Es el porcentaje promedio del elemento X en el material base F.

DA= Es el porcentaje de dilución por el material base A, expresado como decimal.

DB= Es el porcentaje de dilución por el material base B, expresado como decimal.

DT= Es el porcentaje de dilución total por los materiales base A y B, expresado como decimal.

## 2.16 Factores que influyen en los cambios de temperatura durante la soldadura por arco.

Los factores que influyen son:

### a) Aporte de calor (heat input).

“El input térmico es la energía aportada por un proceso de soldadura cuando se realiza un cordón por unidad de longitud, es expresado en Joules por milímetro (J/mm). Para procesos de soldadura por arco eléctrico, el input térmico es estimado por la ecuación 5.” (Fosca, 2007)

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \quad (\text{Ec. 5})$$

Donde:

Hnet = Calor suministrado (j/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

La ecuación 1 permite conocer la energía bruta aportada por la máquina (H). Sin embargo, parte de ésta se pierde antes de llegar a la soldadura, debido a procesos de radiación, convección y conducción en el arco y en la pieza (A.Garcia, 2010). En ese sentido, es de interés el cálculo de

la energía neta aportada ( $H_{net}$ ), que es el producto del input térmico bruto por el rendimiento del proceso de soldadura, como se muestra en la ecuación 6 (Fosca, 2007).

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

f: Eficiencia térmica

La eficiencia térmica de los diferentes procesos se detalla en la Tabla 6.

**Tabla 6**

*Eficiencia térmica de los procesos de arco.*

Proceso	Eficiencia
GTAW	20 – 50 %
GMAW	70 – 85 %
SMAW	70-80 %
SAW	90 – 99 %

Fuente: (A.García, 2010, pág. 84)

**b) Temperatura inicial de la chapa (o temperatura de precalentamiento)**

Es la temperatura a la cual el metal ha de ser precalentado antes de soldar.

**c) Geometría de la soldadura.**

La geometría de la soldadura se refiere al espesor de la pieza, la forma y dimensión del depósito de soldadura y el ángulo entre las piezas a unir.

**d) Características térmicas del material.**

Está relacionado con la conductividad térmica del material.

- Cuanto más baja sea la conductividad térmica, más pronunciada será la distribución de temperaturas máximas. En otras palabras, la zona afectada térmicamente será menor.

- Cuanta más alta sea la conductividad térmica del metal, más rápido se enfriará después de la soldadura.
- Cuanta más alta sea la conductividad térmica, más corto será el tiempo de exposición a elevada temperatura

**e) Diámetro del electrodo.**

Para un diámetro mayor de electrodo se requerirá, mayor aporte de calor para fundirlo.

Este factor es de poca importancia, pero influye en el tamaño de la fuente de calor.

Finalmente, se debe tener en cuenta que determinados rangos de temperatura provocan en el metal transformaciones microestructurales que afectan las propiedades mecánicas de la unión soldada. Generalmente, para el caso de los aceros, los cambios metalúrgicos se producen tras la exposición a temperaturas entre la crítica inferior ( $723\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y la temperatura de fusión ( $1480^{\circ}\text{C}$ ). Cuando se realiza una soldadura, las regiones de la pieza que alcancen valores entre los límites arriba indicados, experimentarán cambios significativos en su microestructura y por lo tanto en las propiedades mecánicas (Fosca, 2007).

## **2.17 Control de Calidad del Recubrimiento Duro**

Los ensayos destructivos y no destructivos son cruciales para evaluar la calidad y las propiedades de los recubrimientos duros. Aquí tienes algunos ejemplos de cada tipo:

### ***2.17.1 Ensayos Destructivos***

- **Microdureza o Dureza Vickers:** Este ensayo mide la dureza del recubrimiento utilizando una pirámide de diamante. La prueba deja una pequeña marca en el recubrimiento.

- **Ensayo de Adhesión (Despegue):** Utiliza una máquina de tracción para medir la fuerza necesaria para desprender el recubrimiento del sustrato.
- **Ensayo de Desgaste (Pin-on-Disk o ASTM G99):** Mide la resistencia al desgaste del recubrimiento sometiéndolo a un contacto constante con un material abrasivo.
- **Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) y Análisis de Composición:** Puede implicar la sección transversal del recubrimiento para analizar su estructura y composición.

### *2.17.2 Ensayos No Destructivos*

- **Microscopía Óptica:** Permite observar la superficie del recubrimiento sin dañarlo para detectar defectos o imperfecciones.
- **Medición de Espesor por Ultrasonido:** Utiliza ondas ultrasónicas para medir el espesor del recubrimiento sin dañarlo.
- **Ensayo de Dureza Superficial (Rockwell):** Evalúa la dureza superficial sin dañar significativamente el recubrimiento.
- **Espectroscopia de Energía Dispersiva (EDS):** Utilizada junto con el SEM, puede analizar la composición del recubrimiento sin necesidad de seccionar el material.

### **2.18 Evaluación del Factor de Recuperación (R)**

La determinación del valor de “R” (Factor de recuperación), permite conocer si la pieza es posible recuperar por soldadura o desecharse esta opción, para lo cual se calcula algunos parámetros mostrados en la tabla 7.

**Tabla 7***Costos en Recuperación de Piezas*

	Componente nuevo	Componente desgastado	Componente Recuperado con Soldadura
Costo de adquisición de un componente nuevo	C (\$)	C (\$)	
Valor como chatarra del componente gastado	CH (\$)	CH (\$)	
Peso del componente	P (kg)		
Peso del metal aprovechado o peso del metal recuperado por soldadura		Pa (kg)	Pa (Kg)
Costo de la recuperación			Cs (\$)
Duración	D (horas)		Ds (horas)
	Costo unitario (Cu) \$/kg	Costo de metal aprovechado (Ca) \$/kg	Costo de metal repuesto (Cr) \$/kg
	$Cu = \frac{C - CH}{P}$	$Ca = \frac{C - CH}{Pa}$	$Cr = \frac{Cs}{Pa}$

Fuente: Sexto Encuentro Nacional de Soldadura. 1999.

Factor de recuperación (R):

$$R = \frac{C_a}{C_r} \times \frac{D_s}{D}$$

Si:

$R < 1$  = Conviene adquirir un componente nuevo

$R = 1$  = Es indiferente

$R > 1$  = Indiscutiblemente es conveniente recuperar por soldadura el componente

## CAPITULO III

### PROCEDIMIENTO METODOLOGICO Y EXPERIMENTAL

#### 3.1 Metodología

##### 3.1.1 Alcance del estudio

El estudio se centra en la aplicación del recubrimiento metálico en los forros de molino de bolas en la empresa de servicios mineros Dharmain Investment S.A.A. Esto implica que los resultados y conclusiones son relevantes y aplicables directamente a la operación de esta empresa.

##### 3.1.2 Tipo de investigación

Investigación Aplicada: Se centra en resolver un problema práctico específico en la empresa Dharmain Investment S.A.A., buscando mejorar la durabilidad y reducir los costos de mantenimiento de los forros de molino de bolas.

##### 3.1.3 Nivel de investigación

- Descriptiva: Describe el proceso de recubrimiento y sus características.
- Explicativa: Busca entender las relaciones entre diferentes variables, como la selección del material de aporte y los parámetros de soldadura, y su impacto en la durabilidad del recubrimiento.

##### 3.1.4 Diseño de la investigación

Se utiliza un diseño experimental, ya que se realizan pruebas prácticas para evaluar la viabilidad del recubrimiento de los forros mediante el proceso SMAW, manipulando variables y observando sus efectos.

### **3.1.5 Metodología de investigación**

Método Cuantitativo: Se emplea un enfoque cuantitativo, utilizando métodos matemáticos y pruebas de dureza para evaluar la efectividad del proceso SMAW y recopilando datos numéricos para analizar los resultados.

### **3.1.6 Población y muestra**

#### **3.1.6.1 Población**

La población principal son los forros de molino de bolas utilizados en la empresa Dharmain Investment S.A.A. Estos forros son componentes críticos que sufren desgaste durante el proceso de molienda en la industria minera. Se utilizaron probetas obtenidas de los forros desgastados para realizar los ensayos de soldadura y evaluar la efectividad del recubrimiento mediante el proceso SMAW.

#### **3.1.6.2 Muestra**

Si se realizó un muestreo específico de forros o probetas para el estudio, esa sería la muestra de la población. En este caso, se mencionan "4 pares de probetas" que fueron evaluadas, lo que indica que se tomó una muestra representativa de la población de forros de molino de bolas. Las probetas fueron determinadas de manera no estadística .

### **3.2 Determinación del Factor de Recuperación (R)**

Se ha tomado una probeta de 200x200x9.2 mm del forro desgastado, con el cual se hizo los cálculos para determinar si es posible la recuperación por recubrimiento duro. En la tabla 8, se observa el resultado del factor de recuperación.

**Tabla 8***Cálculo del factor de recuperación.*

	Componente nuevo	Componente desgastado	Componente Recuperado con Soldadura
Costo de adquisición de un componente nuevo	56.5 USD	30 (\$)	
Valor como chatarra del componente gastado	22,50 (\$)	22.50 (\$)	
Peso del componente	10 (kg)		
Peso del metal aprovechado o peso del metal recuperado por soldadura		12.5 (kg)	14 (KG)
Costo de la recuperación			8.00 (\$)
Duración	1200 (horas)		1350 (horas)
	Costo unitario (Cu) \$/kg	Costo de metal aprovechado (Ca) \$/kg	Costo de metal repuesto (Cr) \$/kg
	$C_u = \frac{C - CH}{P}$	$C_a = \frac{C - CH}{P_a}$	$C_r = \frac{C_s}{P_a}$

$$C_u = 56.50 - 22.50 / 10 = 3.4 \text{ USD/kg}$$

$$C_a = 56.50 - 22.5 / 1.5 = 22.6 \text{ USD/kg}$$

$$C_r = 25 / 14 = 1.78 \text{ USD/kg.}$$

$$R = \frac{3.4}{1.78} \times \frac{1400}{1100} = 2.43$$

De los cálculos realizados, el factor de recuperación tiene el valor de 2.43, lo que implica que la pieza objeto de estudio es posible recuperar.

### 3.3 Maquinaria, Equipos, Herramientas

#### 3.3.1 Máquina de Soldar

Para la soldabilidad de las probetas, se hizo uso de la fuente de poder del taller de soldadura de la Carrera Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

### Características:

- ✓ Marca: MILLER
- ✓ Modelo: XMT 304 CC.
- ✓ Salida nominal de corriente : 300 Amperios
- ✓ Gama de Voltaje : 10 – 35 Voltios.
- ✓ Gama de Amperage : 5 - 400
- ✓ Máx Voltaje de circuito abierto CD: 90 V.
- ✓ KVA : 12.4
- ✓ KW : 11.5

En la figura 24, se observa la fuente de poder usada.

### Figura 24

*Fuente de poder.*



Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

### 3.3.2 *Probador de Dureza*

Este probador se encuentra en el laboratorio de Metalurgia física de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica.

### **Características:**

Modelo: LCR-500, serie LR tipo Rockwell, pantalla táctil, automático, conversión de dureza de acuerdo con ASTM E – 140 y SAE J-417b, posee lectura directa de la dureza.

El durómetro utilizado, es un equipo diseñado para cuando se desea un durómetro simple pero completo y para piezas relativamente pequeñas. Métodos de dureza que mide son: Rockwell, Brinell y Vickers

En la figura 25 se observa el equipo. Para el cálculo de la dureza se utilizó la escala Brinell.

### ***Figura 25***

*Durómetro.*



Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

### ***3.3.3 Desbastador Metalográfico***

Esta máquina (ver figura 26) se encuentra en el laboratorio de Metalurgia Física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Sus características se detallan en la tabla 9.

**Figura 26***Desbastador metalográfico*

Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

**Tabla 9***Características técnicas del desbastador metalográfico*

Características	Valor
Especificación	Desbastadora de dos platos
Diámetro de plato (mm)	240
Velocidad (rpm)	450
Motor	370 W
Dimensiones externas (mm)	700X630X320
Conexión	220V, C.A. 50Hz

### **3.3.4 Pulidor Metalográfico**

Esta máquina (ver figura 27) se encuentra en el laboratorio de Metalurgia Física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica.

**Figura 27***Pulidor Metalográfico*

Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

Sus características se detallan en la tabla 10.

**Tabla 10***Características técnicas del pulidor metalográfico*

Características	Valor
Especificación	Pulidor metalográfico
Conexión	220V,C.A,50Hz
Tipo	De plato
Velocidad (rpm)	290
Diámetro de plato (mm)	600
Motor	400 W
Dimensiones externas	650x500x280

**3.4 Materiales para la Investigación****3.4.1 Material Base**

Para la investigación se obtuvieron probetas de los forros con desgaste del molino de bolas, estos forros son de acero ASTM A128 E1.

La composición química del acero ASTM A 128 E1 se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Composición química ( en %) del acero ASTM A 128 E1*

Grado	C	Mn	Mo	Si (max.)	P (Max.)
E1	1.0	12.75	1.05	1.0	0.07

Fuente: (ASM Handbook, 1990)

En la figura 28, se muestra las probetas objeto de investigación

**Figura 28**

*Probeta de acero austenítico al manganeso ASTM A 128 E1*



Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

Las propiedades mecánicas del revestimiento o forros del molino de acero ASTM A 128 E1, se detallan en la tabla 12.

**Tabla 12**

*Propiedades mecánicas y microestructura*

Dureza (HB)	Resistencia a la tracción (MPa)	Energía de impacto (J)	Elongación (%)	Tenacidad (MPa.m <sup>1/2</sup> )
170-220	280-470	136	20-40	120

### 3.4.2 *Material de Aporte*

Para la presente experimentación se han utilizado los consumibles E-7818 y EFeCr-A8. En la figura 29 se observa los dos tipos de electrodos, el de color gris oscuro es el EFeCr-A8 y el gris claro, es el E-7018.

#### **Figura 29**

##### *Consumibles*



Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

Se describen las características de dichos consumibles:

- **E-7018**

Es un electrodo revestido de tipo básico, de bajo hidrógeno con extraordinarias características mecánicas y de soldabilidad. Presenta un arco muy suave, bajo nivel de salpicaduras y la escoria es de muy fácil remoción. El contenido de hierro en polvo mejora su tasa de depósito. Dentro de su categoría es el producto que presenta los mejores niveles de resistencia a la tracción.

El análisis químico de metal depositado, se muestra en la tabla 13 y sus propiedades mecánicas en la tabla 14.

**Tabla 13**

*Análisis químico de metal depositado (%).*

C	Mn	Si	P	S
0.05	1.00	0.60	Max. 0.020	Max. 0.020

Fuente: Soldexa. (2015). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos* (séptima edición ed.). México.

**Tabla 14**

*Propiedades mecánicas*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia MPa (psi)	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]
Sin tratamiento	520 – 610 75 400 – 88 450	Min. 400 (58000)	Min. 23	[-30 °C (-22 °F)] min. 70 (57)

Fuente: Soldexa. (2015). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos* (séptima edición ed.). México.

• **Aplicaciones:**

- ✓ Para aceros de mediano a alto contenido de carbono, alta resistencia y baja aleación.
- ✓ Para aceros de alto contenido de azufre y fácil fresado.
- ✓ Para aceros laminados al frío.
- ✓ Por sus características de resistencia y su fácil manejo, especialmente adecuado para:  
Soldaduras de tuberías de vapor, calderas de alta presión, piezas de maquinaria pesada, instalaciones de la industria petrolera, petroquímica y minera.

• **EFeCr-A8 (Citodur 1000)**

Es un electrodo para recargue, posee gran resistencia a la corrosión oxidación y abrasión severa. El depósito de soldadura es una fundición blanca con alto contenido de cromo (36%), por lo que, se recomienda aplicar dos pases para que el relleno no se desprenda. En la mayoría de los casos, para obtener las características deseadas, es recomendable usar una cama cojín

amortiguador apropiada en función a las características del material base o los desgastes presentes. Gracias a su alto contenido de carburos de cromo, el depósito conserva la resistencia a la abrasión severa aún a temperaturas elevadas (hasta 1000°C). Los cordones que deposita son perfectamente lisos, libres de poros, sin salpicaduras ni inclusiones de escoria. El material de aporte es no maquinable, pero puede ser forjado y templado.

El Análisis químico de metal depositado, se muestra en la tabla 15 y sus propiedades mecánicas en la tabla 16

**Tabla 15**

*Análisis químico de metal depositado (%).*

C	Mn	Si	P	S	Cr
4.00	1.10	0.60	Max. 0.020	Max. 0.020	36.00

Fuente: Catalogo de productos (2019). Oerlikon. Lima

**Tabla 16**

*Propiedades mecánicas del metal depositado.*

Tratamiento Térmico	Resistencia a la Tracción [MPa (psi)]	Límite de Fluencia MPa (psi)	Elongación en 2" [%]	Energía Absorbida ISO-V [°C (°F)] [J (Ft-Lbf)]	Dureza (HRC)
Sin tratamiento				[-30 °C (-22 °F)] min. 70 (57)	58-62

Fuente: Catalogo de productos (2019). Oerlikon. Lima

• **Aplicaciones:**

- ✓ Para recuperar y recubrir piezas que están expuestas a desgaste por abrasión severa y bajo impacto.
- ✓ Usado en la industria minera, siderúrgica, construcción, ladrillera, cementera, agrícola y todos aquellos sectores donde los materiales están expuestos a desgaste abrasivo severo.

- ✓ Ideal para la recuperación y protección de dientes, cucharas, baldes y cubos de draga, sinfines de transporte, paletas de mezcladoras, uñas de palas, bombas de arena, aletas de ventiladores, etc.
- ✓ Para ollas, moldes y bordes de cucharas de fundición, que sufren desgaste por abrasión o erosión de escorias o metal líquido a temperaturas elevadas

### 3.5 Soldadura de las Probetas

#### 3.5.1 Características de las Probetas

Las probetas tienen las siguientes medidas:

- Ancho: 200 mm
- Longitud: 200 mm
- Espesor: 9.2 mm

Las probetas objeto de recuperación tienen un desgaste de  $(20.5\text{mm} - 9.2\text{mm})$  11.3 mm.

En la figura 30, se observa algunas probetas utilizadas.

#### Figura 30

*Cupones de prueba.*



Fuente: Fotografía de Abel Caballero (Laboratorio de Metalurgia Física de Ing. Metalúrgica, UNSAAC, 2023)

### **3.5.2 Preparación de las Probetas**

Previo al soldeo de las probetas, se realizó las siguientes operaciones:

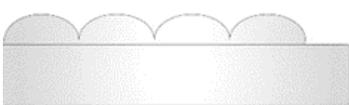
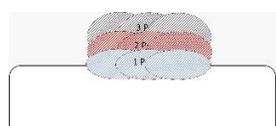
#### **a) Limpieza de las probetas**

Los oxidos atrapados en la superficie de las probetas fueron eliminados primeramente con una escobilla de acero para luego concluir con una limpieza utilizando un disolvente químico (thinner).

### **3.6 Especificación del Procedimiento de Soldadura (WPS) para los Cupones de Experimentación**

En los formatos WPS para cada probeta, se detallan las condiciones de soldabilidad de las probetas.

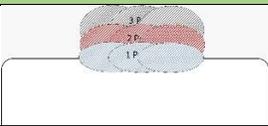
## a) Probeta 1

Especificación del procedimiento de soldadura		WPS -1						
Institución	Particular	Identificación N°:	Probeta 1					
Proceso de soldadura	SMAW	Soporte PQR N°:	PQR – 01					
Tipo	Manual	X Automático	Semiautomático					
Revisión	Fecha:	12 /01/2024	Revisado por:					
			Abel Caballero Lovon					
Diseño de la junta.		Posición						
Tipo de junta:		Ranura:	Filete:					
Tipo de soldadura:	Recubrimiento	Plancha:	1G					
Abertura de raíz:		Características eléctricas						
Angulo de ranura:		DC	x AC					
Soporte:	No	Corriente: Corriente continua						
Material de aporte:	E 7018 - EFeCr-A8	DC :	DCEP					
Limpieza de la raíz:			DCEN					
Metal base		Técnica						
Especificación	ASTM A 128	Limpieza en pases						
Grado:	E1	Pre calentamiento						
Espesor:	9,2 mm	Temperatura de pre calentamiento:						
Largo	200.00 mm	Temperatura interpase:						
Ancho	20.00	Temperatura:	Tiempo:					
Metal de aporte		Protección						
Especificación:	A5.13	Fundente:	Gas:					
Calificación AWS:	A5.13	Composición	Composición					
Marca:	SOLDEXA		Vel. Flujo					
Tamaño de alambre:								
Procedimiento de soldadura								
N° de pase	Proceso	Material de aporte		Corriente			Vel. de desplazamiento. (mm/seg)	Paso o separacion de cordones
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (v)		
1	SMAW	E 7018	5/32"	DC+	140	22	3.4	Sin superposicion
2	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	140	22	3.4	¼ superposicion
3	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	140	22	3.4	< ¼ superposicion
Detalles del recubrimiento								
								
Elaborado por:	Abel Caballero L.	Fecha.	12/10/2023					
Revisado por:	Ing. Víctor M. Dueñas Aquisé	Institución:	UNSAAC					

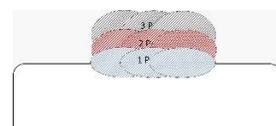
## b) Probeta 2

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia.										
		Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica								
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS -1		
Institución	Particular				Identificación N°:		Probeta 2			
Proceso de soldadura		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR - 02			
Tipo	Manual	X	Automático	Semiautomático			Maquina		Miller-XMT 304 CC	
Revisión:	Fecha:		12 /01/2024		Revisado por:		Abel Caballero Lovon			
Diseño de la junta.				Posición						
Tipo de junta:				Ranura:				Filete:		
Tipo de soldadura:		Recubrimiento		Plancha:		1G		Tubería:		
Abertura de raíz:				Características eléctricas						
Angulo de ranura:				DC		x		AC		
Soporte:		No		Corriente: Corriente continua						
Material de aporte:		E 7018 - EFeCr-A8		DC :				DCEP		X
Limpieza de la raíz:								DCEN		
Metal base				Técnica						
Especificación	ASTM A 128			Limpieza en pases						
Grado:	E1			Pre calentamiento						
Esesor:	9,2 mm			Temperatura de pre calentamiento:						
Largo	200.00 mm			Temperatura interpase:						
Ancho	200.00			Temperatura:				Tiempo:		
Metal de aporte				Protección						
Especificación:	A5.13			Fundente:				Gas:		
Calificación AWS:	A5.13			Composición				Composición		
Marca:	SOLDEXA							Vel. Flujo		
Tamaño de alambre:										
Procedimiento de soldadura										
N° de pase	Proceso	Material de aporte		Corriente			Vel. de desplazamiento. (mm/seg)	Paso o separación de cordones		
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (v)				
1	SMAW	E 7018	5/32"	DC+	160	22	3.4	Sin superposición		
2	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	150	22	3.4	¼ superposición		
3	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	140	22	3.4	< ¼ superposición		
Detalles del recubrimiento										
										
Elaborado por:	Abel Caballero L.		Fecha.		12/10/2023					
Revisado por:	Ing. Víctor M. Dueñas Aquisé		Institución:		UNSAAC					

## c) Probeta 3

Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia.									
		Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica							
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS -1	
Institución	Particular				Identificación N°:		Probeta 3		
Proceso de soldadura		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR - 03		
Tipo	Manual	X	Automático	Semiautomático			Maquina Miller-XMT 304 CC		
Revisión:	Fecha:		12 /01/2024		Revisado por:		Abel Caballero Lovon		
Diseño de la junta.				Posición					
Tipo de junta:				Ranura:				Filete:	
Tipo de soldadura:		Recubrimiento		Plancha:		1G		Tubería:	
Abertura de raíz:				Características eléctricas					
Angulo de ranura:				DC		x		AC	
Soporte:		No		Corriente: Corriente continua					
Material de aporte:		E 7018 - EFeCr-A8		DC :				DCEP X	
Limpieza de la raíz:						DCEN			
Metal base				Técnica					
Especificación	ASTM A 128			Limpieza en pases					
Grado:	E1			Pre calentamiento					
Espesor:	9,2 mm			Temperatura de pre calentamiento:					
Largo	200.00 mm			Temperatura interpase:					
Ancho	200.00			Temperatura:				Tiempo:	
Metal de aporte				Protección					
Especificación:	A5.13			Fundente:				Gas:	
Calificación AWS:	A5.13			Composición				Composición	
Marca:	SOLDEXA							Vel. Flujo	
Tamaño de alambre:									
Procedimiento de soldadura									
N° de pase	Proceso	Material de aporte		Corriente			Vel. de desplazamiento. (mm/seg)	Paso o separación de cordones	
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (v)			
1	SMAW	E 7018	5/32"	DC+	170	22	3.4	Sin superposición	
2	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	160	22	3.4	¼ superposición	
3	SMAW	EFeCr-A8	5/32"	DC+	150	22	3.4	< ¼ superposición	
Detalles de la junta soldada									
									
Elaborado por:	Abel Caballero L.		Fecha.		12/10/2023				
Revisado por:	Ing. Víctor M. Dueñas Aquisé		Institución:		UNSAAC				

## d) Probeta 4

 									
Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalurgia.									
Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica									
Especificación del procedimiento de soldadura								WPS -1	
Institución	Particular				Identificación N°:		Probeta 4		
Proceso de soldadura		SMAW			Soporte PQR N°:		PQR - 04		
Tipo	Manual	X	Automático	Semiautomático			Maquina		Miller-XMT 304 CC
Revisión:	Fecha:		12 /01/2024		Revisado por:		Abel Caballero Lovon		
Diseño de la junta.					Posición				
Tipo de junta:					Ranura:		Filete:		
Tipo de soldadura:		Recubrimiento			Plancha:		1G		Tubería:
Abertura de raíz:					Características eléctricas				
Angulo de ranura:					DC		x	AC	
Soporte:		No			Corriente: Corriente continua				
Material de aporte:		E 7018 - EFe3			DC :		DCEP		X
Limpieza de la raíz:							DCEN		
Metal base					Técnica				
Especificación	ASTM A 128			Limpieza en pases					
Grado:	E1			Precalentamiento					
Esesor:	9,2 mm			Temperatura de precalentamiento:					
Largo	200.00 mm			Temperatura interfase:					
Ancho	200.00			Temperatura:		Tiempo:			
Metal de aporte					Protección				
Especificación:	A5.13			Fundente:		Gas:			
Calificación AWS:	A5.13			Composición		Composición			
Marca:	SOLDEXA					Vel. Flujo			
Tamaño de alambre:									
Procedimiento de soldadura									
N° de pase	Proceso	Material de aporte		Corriente			Vel. de desplazamiento. (mm/seg)	Paso o separación de cordones	
		Clase	Diámetro	Tipo de Polaridad	Amperaje (A)	Voltaje (v)			
1	SMAW	E 7018	5/32"	DC+	190	22	3.4	Sin superposición	
2	SMAW	Efe3	5/32"	DC+	160	22	3.4	1/4 superposición	
3	SMAW	Efe3	5/32"	DC+	150	22	3.4	< 1/4 superposición	
Detalles de la junta soldada									
									
Elaborado por:	Abel Caballero L.		Fecha:		12/10/2023				
Revisado por:	Ing. Víctor M. Dueñas Aquisé		Institución:		UNSAAC				

En la figura 31, se observa las probetas recubiertas.

### **Figura 31**

*Probeta con recubrimiento duro.*



### **3.7 Cálculo del Calor Neto Aportado**

Tomando en cuenta los valores que se indican en los WPS y haciendo uso de la ecuación seis, se calculó el calor neto aportado, en J/mm mediante la ecuación 5 dichos valores que se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17***Calor neto aportado.*

	Consumible	Amperaje (A)	Voltaje (v)	Velocidad de soldadura (mm/seg)	Calor neto aportado J/mm
Probeta 1					
Primer pase	E7018	140	22	3.4	724.71
Segundo pase	EFeCr-A8	140	22	3.4	724.71
Tercer pase	EFeCr-A8	140	22	3.4	724.71
Probeta 2					
Primer pase	E7018	160	23	3.4	865.88
Segundo pase	EFeCr-A8	150	23	3.4	811.76
Tercer pase	EFeCr-A8	140	24	3.4	790.59
Probeta 3					
Primer pase	E7018	170	24	3.4	960.00
Segundo pase	EFeCr-A8	160	23	3.4	865.88
Tercer pase	EFeCr-A8	160	23	3.4	865.88
Probeta 4					
Primer pase	E7018	190	25	3.4	1117.65
Segundo pase	EFeCr-A8	160	23	3.4	865.88
Tercer pase	EFeCr-A8	150	25	3.4	882.35

### 3.8 Cálculo de la Dilución

En la tabla 18, se detallan las áreas en mm<sup>2</sup> del metal base y del metal de aporte que participan en la unión soldada y sirve para el cálculo de la dilución.

**Tabla 18***Cálculo de dilución*

	Calor neto aportado	Área de metal Base (mm <sup>2</sup> )	Área de metal depositado (mm <sup>2</sup> )	Dilución (%)
Probeta 1				
Primer pase	724.71	13.00	22.00	37.00
Segundo pase	724.71	13.0	21.00	38.23
Tercer pase	724.71	12.00	21.00	36.36
Probeta 2				
Primer pase	865.88	11.00	23.00	32.35
Segundo pase	811.76	15.00	41.00	26.78
Tercer pase	790.59	13.00	44.00	22.80
Probeta 3				
Primer pase	960.00	12	24	33.33
Segundo pase	865.88	12	32	27.27
Tercer pase	865.88	10	31	24.39
Probeta 4				
Primer pase	1117.65	22	45	32.83
Segundo pase	865.88	12	32	27.27
Tercer pase	882.35	10	32	23.8

### 3.9 Determinación de la composición química

Con los resultados de dilución, se determinó la composición química de cada depósito.

La composición química calculamos con la ecuación 3:

- **Primer pase:**

En base a la composición química del metal de aporte y material base, mostrada en la tabla 19, se calcula la composición química.

**Tabla 19**

*Composición química del material base y material de aporte para el primer pase.*

Componente	ASTM A128	Metal de aporte E7018
Carbono (C)	1.0%	0.05%
Manganeso (Mn)	12.75%	1.0%
Molibdeno (Mo)	1.05%	-----
Fosforo (P)	0,07%	0.020%
Silicio (Si)	1.00%	0.60%

Fuente: Elaboración propia

**Probeta 1:**

$$\begin{aligned} \%C &= 0.37(1) + (1-0.37)(0.05) = 0.40\% \\ \%Mn &= 0.37(12.75) + (1-0.37)(1.0) = 5.34\% \\ \%Si &= 0.37(1) + (1-0.37)(0.60) = 0.74\% \\ \%Mo &= 0.37(1.05) + (1-0.37)(0) = 0.39\% \\ \%P &= 0.37(0.07) + (1-0.37)(0.02) = 0.025\% \end{aligned}$$

**Probeta 2:**

$$\begin{aligned} \%C &= 0.32(1.0) + (1-0.32)(0.05) = 0.354\% \\ \%Mn &= 0.32(12.75) + (1-0.32)(1.0) = 4.76\% \\ \%Si &= 0.32(1) + (1-0.32)(0.60) = 0.728\% \\ \%Mo &= 0.32(1.05) + (1-0.32)(0) = 0.336\% \\ \%P &= 0.32(0.07) + (1-0.32)(0.02) = 0.036\% \end{aligned}$$

**Probeta 3:**

$$\begin{aligned} \%C &= 0.33(1.0) + (1-0.33)(0.05) = 0.3635\% \\ \%Mn &= 0.33(12.75) + (1-0.33)(1.0) = 4.87\% \\ \%Si &= 0.33(1) + (1-0.33)(0.60) = 0.732\% \\ \%Mo &= 0.33(1.05) + (1-0.33) = 0.347\% \\ \%P &= 0.33(0.07) + (1-0.33)(0.02) = 0.036\% \end{aligned}$$

**Probeta 4**

$$\%C = 0.33(1.0) + (1-0.33)(0.05) = 0.3635\%$$

$$\%Mn = 0.33(12.75) + (1-0.33)(1.0) = 4.87\%$$

$$\%Si = 0.33(1) + (1-0.33)(0.60) = 0.732\%$$

$$\%Mo = 0.33(1.05) + (1-0.33)(0) = 0.35\%$$

$$\%P = 0.33(0.07) + (1-0.33)(0.02) = 0.036\%$$

- **Segundo pase:**

Para el recubrimiento del segundo pase se utiliza el electrodo EFeCr-A8 , cuya composición química se muestra en la tabla 20.

**Tabla 20**

*Composición química del electrodo EFeCr-A8.*

C	Mn	Si	P	S	Cr
4.00 %	1.10 %	0.60%	0.020%	0.020%	36.00%

**Probeta 1:**

*La composición química del primer deposito:*

C	Mn	Si	P	Mo
0.40%	5.34%	0.74%	0.025%	0.39 %

$$\%C = 0.3823(0.40) + (1-0.3823)(4.0) = 2.620\%$$

$$\%Mn = 0.3823(5.34) + (1-0.3823)(1.10) = 0.962\%$$

$$\%Si = 0.3823(0.74) + (1-0.3823)(0.60) = 0.653\%$$

$$\%Mo = 0.3823(0.39) + (1-0.3823)(0) = 0.150\%$$

$$\%P = 0.3823(0.025) + (1-0.3823)(0.020) = 0.022\%$$

$$\%S = (1-0.3823)(0.020) = 0.012$$

$$\%Cr = (1-0.3823)(36.0) = 22.24\%$$

**Probeta 2**

C	Mn	Si	P	Mo
0.354 %	4.76 %	0.728 %	0.036%	0.336 %

$$\begin{aligned} \%C &= \frac{0.2678(0.354) + (1-0.2678) (4.0)}{4.0} = 3.02\% \\ \%Mn &= 0.2678 (4.76) + (1-0.2678) (1.10) = 2.08\% \\ \%Si &= 0.2678(0.728) + (1-0.2678) (0.60) = 0.63 \% \\ \%Mo &= 0.2678(0.336) + (1-0.2678) (0) = 0.09 \% \\ \%P &= 0.2678(0.036) + (1-0.2678) (0.020) = 0.024\% \\ \%S &= (1-0.2678)(0.020) = 0.015 \\ \%Cr &= (1-0.2678) (36.0) = 26.35 \% \end{aligned}$$

**Probeta 3:**

La composición química del primer deposito:

C	Mn	Si	P	Mo
0.3635 %	4.87 %	0.732 %	0.036%	0.347 %

$$\begin{aligned} \%C &= \frac{0.2727(0.3635) + (1-0.2727) (4.0)}{4.0} = 3.01 \text{ 0.}\% \\ \%Mn &= 0.2727 (4.87) + (1-0.2727) (1.10) = 2.12\% \\ \%Si &= 0.2727(0.732) + (1-0.2727) (0.60) = 0.64 \% \\ \%Mo &= 0.2727(0.347) + (1-0.2727) (0) = 0.09\% \\ \%P &= 0.2727(0.036) + (1-0.2727) (0.020) = 0,024\% \\ \%S &= (1-0.2727)(0.020) = 0.015 \\ \%Cr &= (1-0.2727) (36.0) = 26.18 \% \end{aligned}$$

**Probeta 4:**

C	Mn	Si	P	Mo
0.3635 %	4.87 %	0.732 %	0.036%	0.35 %

$$\%C = \frac{0.2727(0.3635) + (1-0.2727) (4.0)}{1} = 3.01\%$$

$$\%Mn = \frac{0.2727 (4.87) + (1-0.2727) (1.10)}{1} = 2.12\%$$

$$\%Si = \frac{0.2727(0.732) + (1-0.2727) (0.60)}{1} = 0.64 \%$$

$$\%Mo = \frac{0.2727(0.35) + (1-0.2727) (0)}{1} = 0.09 \%$$

$$\%P = \frac{0.2727(0.036) + (1-0.2727) (0.020)}{1} = 0,024\%$$

$$\%S = (1-0.2727)(0.020) = 0.015$$

$$\%Cr = (1-0.2727) (36.0) = 26,18 \%$$

**- Tercer pase:****Probeta 1:**

C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr
2.62 %	0.962 %	0.653 %	0.150 %	0.022%	0.012%	22.24

$$\%C = \frac{0.3283(2.60) + (1-0.3283) (4.0)}{1} = 3.54 \text{ 0.}\%$$

$$\%Mn = \frac{0.3283 (0.96) + (1-0.3283) (1.10)}{1} = 1.05 \%$$

$$\%Si = \frac{0.3283(0.65) + (1-0.3283) (0.60)}{1} = 0.61 \%$$

$$\%Mo = \frac{0.3283(0.15) + (1-0.3283) (0)}{1} = 0.05 \%$$

$$\%P = \frac{0.3283(0.022) + (1-0.3283) (0.020)}{1} = 0.020\%$$

$$\%S = \frac{0.3283(0.012) + (1-0.3283) (0.020)}{1} = 0.017\%$$

$$\%Cr = \frac{0.3283(22.24) + (1-0.3283) (36.0)}{1} = 31.48\%$$

**Probeta 2:**

C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr
3.02%	2.08 %	0.63 %	0.09 %	0.024%	0.015%	26.35 %

$$\begin{aligned} \%C &= 0.2280(3.02) + (1-0.2280) (4.0) = 3.74 \text{ 0. \%} \\ \%Mn &= 0.2280 (2.08) + (1-0.2280) (1.10) = 1.36 \text{ \%} \\ \%Si &= 0.2280 (0.63) + (1-0.2280)(0.60) = 0.61 \text{ \%} \\ \%Mo &= 0.2280 (0.09) + (1-0.2280) (0) = 0.42 \text{ \%} \\ \%P &= 0.2280 (0.024) + (1-0.2280) (0.020) = 0.021\% \\ \%S &= 0.2280 (0.015) + (1-0.2280) (0.020) = 0.018\% \\ \%Cr &= 0.2280 (26.35) + (1-0.2280) (36.0) = 33.42 \text{ \%} \end{aligned}$$

**Probeta 3:**

C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr
3.01 %	2.12 %	0.64 %	0.09%	0,024%	0.015%	26.18 %

$$\begin{aligned} \%C &= 0.2439(3.01) + (1-0.2439) (4.0) = 3.76 \text{ \%} \\ \%Mn &= 0.2439 (2.12) + (1-0.2439) (1.10) = 1.35 \text{ \%} \\ \%Si &= 0.2439 (0.64) + (1-0.2439) (0.60) = 0.61 \text{ \%} \\ \%Mo &= 0.2439 (0.09) + (1-0.2439) (0) = 0.22 \text{ \%} \\ \%P &= 0.2439 (0.024) + (1-0.2439) (0.020) = 0.021 \text{ \%} \\ \%S &= 0.2439 (0.015) + (1-0.2439) (0.020) = 0.019 \text{ \%} \\ \%Cr &= 0.2439 (26.18) + (1-0.2439) (36.0) = 33.60 \text{ \%} \end{aligned}$$

**Probeta 4:**

C	Mn	Si	Mo	P	S	Cr
3.01 %	2.12 %	0.64 %	0.09	0.024%	0.015%	26.18%

$$\begin{aligned} \%C &= 0.238(3.01) + (1-0.238) (4.0) = 3.76 \text{ 0. \%} \\ \%Mn &= 0.238 (2.12) + (1-0.238) (1.10) = 1.34 \text{ \%} \\ \%Si &= 0.238 (0.064) + (1-0.238) (0.60) = 0.47 \text{ \%} \\ \%Mo &= 0.238 (0.09) + (1-0.238) (0) = 0.21 \text{ \%} \\ \%P &= 0.238 (0.024) + (1-0.238) (0.020) = 0.21 \text{ \%} \\ \%S &= 0.238(0.015)+ (1-0.238) (0.020) = 0.019 \text{ \%} \\ \%Cr &= 0.238 (26.18) + (1-0.238) (36.0) = 33.66 \text{ \%} \end{aligned}$$

En la tabla 21, se muestra la composición química del tercer deposito.

**Tabla 21**

*Composición química del tercer deposito.*

Probeta	Composición química						
	%C	%Mn	%Si	%Mo	%P	%S	%Cr
Probeta 1	3.54	1.05	0.61	0.05	0.020	0.017	31.48
Probeta 2	3.74	1.36	0.61	0.42	0.021	0.018	33.42
Probeta 3	3.76	1.35	0.61	0.22	0.021	0.019	33.60
Probeta 4	3.76	1.34	0.47	0.21	0.21	0.019	33.66

### 3.10 Control de Calidad de las Probetas

Los ensayos destructivos y no destructivos son cruciales para evaluar la calidad y las propiedades de los recubrimientos duros.

#### 3.10.1 Ensayo no Destructivo

##### 3.10.1.1 Inspección visual de los cupones.

Una vez ejecutado los depósitos en las probetas, se realizó la inspección visual de las mismas. La inspección visual se aplica para verificar la calidad del depósito. La inspección visual constituye una parte importante del control de calidad práctico. De manera que la inspección visual es de importancia primordial.

En la tabla 22 se detallan los resultados del examen visual.

**Tabla 22***Resultados del examen visual.*

Probeta	Discontinuidad	Observación
1	Ninguna	Aceptado
2	Ninguna	Aceptado
3	Ninguna	Aceptado
4	Ninguna	Aceptado

### **3.10.1.2 Ensayos de dureza.**

Los ensayos de dureza se realizaron en el laboratorio de Metalurgia física de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica. En los PQR, se presenta el reporte de las mediciones de durezas de las probetas de investigación.

En el Registro de calificación del procedimiento (PQR), se detallan los resultados de la prueba de dureza del tercer deposito.

## Probeta 1.

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b>					
		<b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>					
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>						<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>							
<b>Proceso de soldado</b>	SMA W	<b>Amperaje (A)</b>	120	<b>Voltaje (V)</b>	22	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	3.4
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio			<b>Identificación de la probeta:</b>		01	
<b>Norma aplicable :</b>	ASTM E18			<b>Fecha de elaboración:</b>		17/01/2024	
<b>Realizado por:</b>	Abel Caballero Lovon.			<b>Asesor de tesis:</b>		Ing. Mg. Víctor Dueñas Aquise	
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Metalurgia Física de la E. P. de Ing. Metalúrgica - UNSAAC.						
<b>Responsable del laboratorio</b>	Mgt. Ing. José Julio Farfán Yépez						
<b>Espesor de la probeta:</b>	20.5 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>			200 mm		
<b>Material de aporte</b>	EFeCr-A8	<b>Metal base</b>			ASTM A 128		
<b>RESULTADO</b>							
Probeta	<b>Numero de medidas</b>				<b>Promedio de dureza (HRC)</b>		
	1	2	3				
<b>A</b>	50.2	54	57.5	53.8			
<b>B</b>	51.7	51.6	55.5	52.9			
<b>C</b>	39.2	52.1	53.3	48.2			
			Promedio	51.6			

## Probeta 2.

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>					
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>						<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>							
<b>Proceso de soldado</b>	SMA W	<b>Amperaje (A)</b>	140	<b>Voltaje (V)</b>	24	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	3.4
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio			<b>Identificación de la probeta:</b>		02	
<b>Norma aplicable :</b>	ASTM E18			<b>Fecha de elaboración:</b>		17/01/2024	
<b>Realizado por:</b>	Abel Caballero Lovon.			<b>Asesor de tesis:</b>		Ing. Mg. Víctor Dueñas Aquise	
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Metalurgia Física de la E. P. de Ing. Metalúrgica - UNSAAC.						
<b>Responsable del laboratorio</b>	Mgt. Ing. José Julio Farfán Yépez						
<b>Espesor de la probeta:</b>	20.5 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>			200 mm		
<b>Material de aporte</b>	EFeCr-A8	<b>Metal base</b>			ASTM A 128		
<b>RESULTADO</b>							
Probeta	<b>Numero de medidas</b>				<b>Promedio de dureza (HRC)</b>		
	1	2	3				
<b>A</b>	56.9	56.9	60.8	58.20			
<b>B</b>	60.5	58.9	55.1	58.17			
<b>C</b>	52.4	51.8	52.1	52.1			
			Promedio	56.16			

### Probeta 3

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>					
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>						<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>							
<b>Proceso de soldado</b>	SMA W	<b>Amperaje (A)</b>	160	<b>Voltaje (V)</b>	23	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	3.4
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio			<b>Identificación de la probeta:</b>		03	
<b>Norma aplicable:</b>	ASTM E18			<b>Fecha de elaboración:</b>		17/01/2024	
<b>Realizado por:</b>	Abel Caballero Lovon.			<b>Asesor de tesis:</b>		Ing. Mg. Víctor Dueñas Aquise	
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Metalurgia Física de la E. P. de Ing. Metalúrgica - UNSAAC.						
<b>Responsable del laboratorio</b>	Mgt. Ing. José Julio Farfán Yépez						
<b>Espesor de la probeta:</b>	13.2 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>			200 mm		
<b>Material de aporte</b>	EFeCr-A8	<b>Metal base</b>			ASTM A 128		
<b>RESULTADO</b>							
Probeta	<b>Numero de medidas</b>				<b>Promedio de dureza (HRC)</b>		
	1	2	3				
<b>A</b>	46.4	51	48.2	48.4			
<b>B</b>	41	42.7	46.2	43.3			
<b>C</b>	45.5	41.4	47.7	44.8			
			Promedio	45.53			

### Probeta 4

		<b>FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA, MINAS Y METALURGIA</b> <b>ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA.</b>						
<b>ENSAYO DE DUREZA</b>							<b>PQR</b>	
<b>DATOS INFORMATIVOS DEL ESPECIMEN A ENSAYAR</b>								
<b>Proceso de soldado</b>	SMA W	<b>Amperaje (A)</b>	150	<b>Voltaje (V)</b>	22	<b>Vel. de soldeo (mm/seg)</b>	3.4	
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio			<b>Identificación de la probeta:</b>		04		
<b>Norma aplicable :</b>	ASTM E18			<b>Fecha de elaboración:</b>		17/01/2024		
<b>Realizado por:</b>	Abel Caballero Lovon.			<b>Asesor de tesis:</b>		Ing. Mg. Víctor Dueñas Aquisé		
<b>Centro de estudio y análisis:</b>	Laboratorio de Metalurgia Física de la E. P. de Ing. Metalúrgica - UNSAAC.							
<b>Responsable del laboratorio</b>	Mgt. Ing. José Julio Farfán Yépez							
<b>Espesor de la probeta:</b>	13.2 mm	<b>Longitud de la probeta:</b>			200 mm			
<b>Material de aporte</b>	EFeCr-A8	<b>Metal base</b>			ASTM A 128			
<b>RESULTADO</b>								
Probeta	<b>Numero de medidas</b>				<b>Promedio de dureza (HRC)</b>			
	1	2	3					
<b>A</b>	47.2	56.1	52.7	53.3				
<b>B</b>	41.6	54.8	56.6	50				
<b>C</b>	44.2	53.2	55.7	51.03				
				51.46				

### 3.11 Resultados y Análisis

#### 3.11.1 Cálculo del Calor Neto

En la tabla 23, se observa los valores calculados del calor aportado.

**Tabla 23**

*Valores de calor aportado*

	Consumible	Calor neto aportado (J/mm)
<b>Probeta 1</b>		
Primer pase	E7018	724.71
Segundo pase	EFeCr-A8	724.71
Tercer pase	EFeCr-A8	724.71
<b>Probeta 2</b>		
Primer pase	E7018	865.88
Segundo pase	EFeCr-A8	811.76
Tercer pase	EFeCr-A8	790.59
<b>Probeta 3</b>		
Primer pase	E7018	960.00
Segundo pase	EFeCr-A8	865.88
Tercer pase	EFeCr-A8	865.88
<b>Probeta 4</b>		
Primer pase	E7018	1117.65
Segundo pase	EFeCr-A8	865.88
Tercer pase	EFeCr-A8	882.35

El aporte de calor neto es un parámetro fundamental en la aplicación de recubrimientos con el electrodo EFeCr-A8 sobre acero ASTM A128. Un control preciso de este aporte es esencial para maximizar la dureza y resistencia al desgaste del recubrimiento mientras se minimizan efectos adversos como la dilución excesiva, las tensiones residuales y las transformaciones indeseadas en el sustrato. Mantener un equilibrio adecuado entre la penetración de calor y la preservación de las propiedades del recubrimiento y del acero base es clave para lograr un recubrimiento de alta calidad y durabilidad.

### 3.11.2 Dilución

En la tabla 24, se observa los resultados del coeficiente de dilución calculados en los diferentes depósitos.

**Tabla 24**

*Valores de dilución.*

	Dilución (%)
Probeta 1	
Primer pase	37.00
Segundo pase	38.23
Tercer pase	36.36
Probeta 2	
Primer pase	32.35
Segundo pase	26.78
Tercer pase	22.80
Probeta 3	
Primer pase	33.33
Segundo pase	27.27
Tercer pase	24.39
Probeta 4	
Primer pase	32.83
Segundo pase	27.27
Tercer pase	23.8

La dilución del metal base es afectado por:

Bajo aporte de calor: Con un aporte de calor bajo, la dilución del material base en el recubrimiento es mínima. Esto significa que la mayor parte del recubrimiento estará compuesto por el material depositado desde el electrodo EFeCr-A<sub>8</sub>, que es rico en cromo y carbono. La baja dilución preserva la alta concentración de carburos de cromo ( $Cr_7C_3$  o  $Cr_3C_2$ ), lo que maximiza la dureza y resistencia al desgaste del recubrimiento.

Alto aporte de calor: Un mayor aporte de calor incrementa la dilución, lo que lleva a una mayor mezcla del acero ASTM A128 (un acero al manganeso) con el material del electrodo. Esta

mezcla reduce la concentración de cromo y carbono en el recubrimiento, ya que el manganeso y el hierro del sustrato se mezclan con el depósito. Como resultado, se forman menos carburos de cromo, lo que disminuye la dureza y la resistencia al desgaste del recubrimiento.

### 3.11.3 Composición Química del Recubrimiento Duro (Tercer Deposito)

En la tabla 25, se resume la composición química del recubrimiento duro (tercer deposito)

**Tabla 25**

*Composición química del recubrimiento duro (tercer deposito)*

Probeta	Composición química						
	%C	%Mn	%Si	%Mo	%P	%S	%Cr
Probeta 1	3.54	1.05	0.61	0.05	0.020	0.017	31.48
Probeta 2	3.74	1.36	0.61	0.42	0.021	0.018	33.42
Probeta 3	3.76	1.35	0.61	0.22	0.021	0.019	33.60
Probeta 4	3.76	1.34	0.47	0.21	0.21	0.019	33.66

El aporte de calor es un factor determinante en la composición química del recubrimiento duro cuando se utiliza el electrodo EFeCr-A8 sobre acero ASTM A128. Un mayor aporte de calor aumenta la dilución del material base, lo que reduce la concentración de cromo y carbono en el recubrimiento, afectando negativamente la formación de carburos y, por lo tanto, disminuyendo la dureza y resistencia al desgaste del recubrimiento. Controlar adecuadamente el aporte de calor es esencial para optimizar la composición química y las propiedades mecánicas del recubrimiento final.

El cromo es el elemento clave en el electrodo EFeCr-A8 que forma carburos duros. Con un bajo aporte de calor, la concentración de cromo en el recubrimiento será alta, lo que favorece la formación de carburos de cromo. Sin embargo, con un alto aporte de calor, la dilución con el

sustrato reduce la cantidad de cromo disponible en el recubrimiento, lo que disminuye la formación de carburos y, por ende, su dureza. En la tabla 19, se observa que

#### **3.11.4 Inspección Visual**

En la tabla 26, se presenta los resultados de la inspección visual.

**Tabla 26**

*Resultados de la inspección visual.*

Probeta	Discontinuidad	Observación
1	Ninguna	Aceptado
2	Ninguna	Aceptado
3	Ninguna	Aceptado
4	Ninguna	Aceptado

#### **3.11.5 Ensayo de Dureza**

En la tabla 27, se presenta los resultados promedio del depósito en las probetas de ensayo.

**Tabla 27**

*Dureza promedio del tercer depósito.*

Probeta	Dureza (HRC)
1	51.6
2	56.1
3	45.5
4	51.46

Se puede hacer un análisis tomando en cuenta los dos depósitos:

- **Capa Superior (Segunda Capa):** Generalmente, la segunda capa de recubrimiento puede muestra una dureza ligeramente superior a la primera debido a la menor dilución con el sustrato. La primera capa suele estar más diluida con el acero base, lo que puede reducir la dureza inicial.

- **Capa Inferior (Primera Capa):** Puede presentar una dureza ligeramente inferior debido a la mayor dilución con el sustrato, especialmente si el aporte de calor es alto. Sin embargo, es esencial para asegurar una buena adherencia entre el recubrimiento y el sustrato.

## CONCLUSIONES

**PRIMERA.** La recuperación de los forros del molino de bolas por soldadura es posible, aumentando su vida útil y proporcionando beneficios económicos significativos para la empresa Dharmain Investment S.A.A

**SEGUNDA.** La adecuada selección y aplicación de los materiales de recubrimiento metálico han resultado en una mejora notable de la resistencia al desgaste y una extensión significativa de la vida útil de los forros de molino de bolas, donde se evidencia una dureza inicial de 35 HRC del material base a una dureza final de 58.2 HRC que significa un aumento del 66.29% en la dureza tras el recubrimiento para la empresa Dharmain Investment S.A.A.

**TERCERA.** La evaluación económica ha revelado que el recubrimiento metálico de los forros de molino de bolas es la opción económicamente más viable en comparación del reemplazo de componentes determinado mediante el factor de recuperación con un valor de 2.43 notablemente mayor a 1, lo que evidencia que el recubrimiento es la opción más aceptada en términos de costos de operación para la empresa Dharmain Investment S.A.A.

**CUARTA.** Los parámetros de soldadura en el recubrimiento metálico de forros de molino han afectado considerablemente las características de los cordones de soldadura en relación a los valores de dilución (tabla 24) y cálculo de calor neto (tabla 23), afectando positivamente al proceso de recuperación de los forros de molino para la empresa Dharmain Investment.

**QUINTA.** Las pruebas experimentales realizadas han demostrado que los forros de molino de bolas con recubrimiento metálico presentan una resistencia al desgaste y durabilidad superior en comparación con los forros convencionales en la empresa Dharmain Investment S.A.A.

## RECOMENDACIONES

**PRIMERA.** Capacitación del Personal, es fundamental proporcionar formación continua al personal encargado de la aplicación del proceso SMAW. Esto incluye el manejo adecuado de equipos, selección de materiales y optimización de parámetros de soldadura para asegurar la calidad y durabilidad del recubrimiento.

**SEGUNDA.** Implementar un sistema riguroso de control de calidad que incluya inspecciones visuales y pruebas de dureza. Esto permitirá detectar cualquier defecto en el recubrimiento y garantizar que se cumplan los estándares de resistencia y durabilidad.

**TERCERA.** Realizar estudios periódicos sobre la selección de materiales de aporte, considerando nuevas aleaciones y tecnologías que puedan mejorar aún más la resistencia al desgaste de los forros. Esto ayudará a optimizar el proceso y a prolongar la vida útil de los componentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- A.Garcia, A. J. (2010). Estudio tribologico de aceros austeniticos tipo hadfield, influencia del manganeso en su respuesta frente al desgaste. *Metalurgia*, 46, 47-52. Obtenido de [https://www.academia.edu/11560942/Estudio\\_tribol%C3%B3gico\\_de\\_aceros\\_austen%C3%ADticos\\_tipo\\_Hadfield\\_influencia\\_del\\_manganeso\\_en\\_su\\_respuesta\\_frente\\_al\\_desgaste](https://www.academia.edu/11560942/Estudio_tribol%C3%B3gico_de_aceros_austen%C3%ADticos_tipo_Hadfield_influencia_del_manganeso_en_su_respuesta_frente_al_desgaste)
- Alonso, C. (2012). *Manual de Soldadura por Arco Eléctrico con electrodo recubierto*. Ceysa Ediciones Cano Pina.
- American Welding Society R. L. (2008). *Manual De Soldadura*. Obtenido de pdfcoffee.com: <https://pdfcoffee.com/manual-de-soldadura-vol-1-aws-pdf-free.html>
- ASM Handbook. (1990). *Properties and Selection: Irons, steels and High Performance Alloys*. Obtenido de <https://tajhizkala.ir/doc/ASM/ASM%20Handbook%20Vol%201.pdf>
- ASTM International. (2018). *ASTM A842-11a, Standard Specification for Compacted Graphite*. doi:doi: 10.1520/A0842-11AR18E01.
- Cañizares Silva, C. F., & Quinchuela P, J. C. (2017). *Tecnologías para la recuperacion por soldadura de alabes de turbinas hidraulicas construidas de acero inoxidable ASTM A743 CA-6NM*. Chimborazo.
- Chávez Aparicio, F., Mejía C, R., & Pacheco D, G. (2009). *Metrología geométrica y sus aplicaciones*. México: Grupo Editorial Éxodo,. Obtenido de <https://koha.indo.edu.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=260449>
- COMESA. (22 de Marzo de 1990). *Instrucciones para Instalación Operación y Mantenimiento*. Obtenido de es.scribd.com: <https://es.scribd.com/document/374635595/320931509-Molino-Comesa-pdf>
- Dandotiya, R. (2011). *Decision Support Models for the Maintenance and Design of Mill Liners*. Lulea: Lulea University of Technology.
- Echevarria, R. (2002). *Defectologia*. Universidad Nacional de Comahue, Santiago de Chile, Santiago.
- Fosca, C. (2007). *Introduccion a la metalurgia de la soldadura. Introduccion a la metalurgia de la soldadura*. PUCP, Lima, Peru. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/476338671/Introduccion-a-la-Metalurgia-de-la-Soldadura-Carlos-Fosca-pdf>
- Franke, J., & Lichti, D. (2005). *Mill Liner condition monitoring and mill performance optimization*. Ottawa.
- Fueyo C, L. (2019). *Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación*., Editores: Madrid : Rocas y Minerales, 1999.

Funvesa, (2018). «Funvesa Fundición Ventanilla S.A - Molino SAG,» [En línea]. Available: <https://www.funvesa.com.pe/es/ver-productos/1-molienda/3-molino-sag>.

Gualco, A. (2011). . *Efecto de los parámetros de soldadura sobre la microestructura y la resistencia al desgaste de recargues martensíticos depositados con alambres tubulares metal-cored*. Buenos Aires: Universidad De Buenos Aires - Facultad De Ingeniería. .

Gutierrez G., O. A. (2011). Estudio Para Calibración De Molinos. *Memoria Para Optar Al Título De Ingeniero Civil Mecánico*. Universidad De Chile, Santiago. Obtenido de chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2F repositorio.uchile.cl%2Ftesis%2Fuchile%2F2011%2Fcf-gutierrez\_og%2FpdfAmont%2Fcf-gutierrez\_og.pdf

Higuera, O. F., Tristancho, J. L., & Florez, L. C. (2007). Fundamentos teóricos de los aceros auténticos al manganeso (aceros hadfield). *Scientia Et Technica*, 13(34), 231-236. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/849/84934039.pdf>

Horwitz, H. (1990). *Soldadura: Aplicaciones y prácticas*. México: Alfaomega. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/389085266/Soldadura-Aplicaciones-y-Practica-Horwitz>

Jeffus, L. (2009). *Soldadura. Principios y aplicaciones* (Quinta edición ed.). (E. N. S.A, Ed.) Madrid: Paraninfo. Obtenido de [https://books.google.com.pe/books?id=rHynAxzh0iEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.pe/books?id=rHynAxzh0iEC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Maury R, H., Niebles N, E., & Torres S, J. (2009). *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados*. Editorial Universidad del Norte. Obtenido de <https://editorial.uninorte.edu.co/gpd-diseno-para-la-fabricacion-y-ensamble-de-productos-soldados.html>

Netexplora.com. (05 de mayo de 2024). *Problemas y defectos comunes en la soldadura al arco eléctrico*. Obtenido de [www2.netexplora.com](http://www2.netexplora.com): chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Fwww.redalyc.org%2Fpdf%2F4962%2F496251109012.pdf

Segovia, R. (1997). *Reemplazo optimo de componentes sujetos a desgaste bajo la realización de inspecciones periódicas*. Chile: Pontifica Universidad Catolica de Chile, Escuela de Ingeniería.

Sider Perú. (2020). Catalogo de productos de Sider Perú.

society, A. W. (2012). *Manual de soldadura*. Mexico: Prentice - Hall Hispanoamerica S.A.

Soldexa. (2015). *Manual de Soldadura y Catálogo de Productos* (séptima edición ed.). México.

Turpo Cari, M. (2018). Diseño Y Simulación De Manipulador Para Forros De Acero Aplicados En Molinos Convencionales. *Para Optar Título Profesional de Ingeniero Mecánico*

*Electricista.* Univesidad Nacional del Altiplano, Puno. Obtenido de chrome-extension://mhnlakgilnojmhinhkckjpnpcpbhabphi/pages/pdf/web/viewer.html?file=http%3A%2F%2Frepositorio.unap.edu.pe%2Fbitstream%2Fhandle%2F20.500.14082%2F6907%2FTurpo\_Cari\_Moises.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy

# ANEXOS

## A) MATRIZ DE CONSISTENCIA

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Metodología
<b>Problema general</b>	<b>Objetivo general</b>	<b>Hipótesis general</b>			
¿Será viable el recubrimiento de los forros de molino de bola para su recuperación mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) en cuanto a prolongar su vida útil y reducir los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?	Evaluar la viabilidad de recubrir los forros de molino de bolas mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) en la empresa Dharmain Investment S.A.A. con el fin de prolongar la vida útil y reducir los costos de mantenimiento en comparación al cambio de los forros desgastados	El recubrimiento de los forros del molino de bolas mediante el proceso de soldadura por Arco Eléctrico con electrodo revestido (SMAW) es viable para aumentar la vida útil de los forros y reducir costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A. en comparación al cambio regular de los forros desgastados	VI:  -Selección y aplicación de materiales de recubrimiento o metálico  -Parámetros de soldadura por arco eléctrico	-Tipo de electrodo -Amperaje	<b>Alcance:</b> Descriptivo, Explicativo, <b>Diseño:</b> Experimental  <b>Población y muestra:</b> Forros de molino de bolas utilizados en la empresa Dharmain Investment S.A.A. Muestra específica no estadística de 4 pares de probetas <b>Técnica:</b> Soldadura por arco eléctrico SMAW <b>Instrumento:</b> Ensayos de dureza
<b>Problemas específicos</b>	<b>Objetivos específicos</b>	<b>Hipótesis específicas</b>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Influirá de alguna manera la correcta selección del material de aporte en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?</li> <li>• ¿Cuál será el efecto de la recuperación de forros de molino mediante el proceso de soldadura SMAW en la reducción de costo de mantenimiento en comparación con la compra de nuevos componentes en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Demostrar que la correcta selección del material de aporte influye en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.</li> <li>• Comprobar que la recuperación de los forros de molino en comparación a la compra de nuevos componentes reducirá los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A.</li> <li>• Verificar que los parámetros de soldadura influyen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La correcta selección del material de aporte influye en la resistencia y durabilidad al desgaste del recubrimiento aplicado en los forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.</li> <li>• La recuperación de los forros de molino en comparación a la compra de nuevos componentes reducirá los costos de mantenimiento en la empresa Dharmain Investment S.A.A.</li> <li>• Los parámetros de soldadura influyen significativamente en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de</li> </ul>	VD:  Durabilidad y rendimiento de los forros del molino de bola	-Dureza -Factor de recuperación	

<ul style="list-style-type: none"><li>• ¿Influirá los parámetros de soldadura en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.?</li></ul>	significativamente en las características del cordón de soldadura en el recubrimiento de forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A.	forros de molino de bolas por el proceso SMAW en la empresa Dharmain Investment S.A.A..			
---	---	---	--	--	--

## B) TABLA DE ENSAYO DE LABORATORIO, ENSAYO DE DUREZA



### ENSAYO DE LABORATORIO - PRUEBAS DE DUREZA

Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica  
Laboratorio de Metalurgia Física

Informe:01

Fecha: 17/01/2024

Teslista: Abel Caballero Lovon

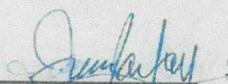
Datos de muestra	
Materiales	Probetas de acero ASTM A128
Número de muestras	12 unid
Descripción	Placas de acero de superficie lisa
Dimensión	4*5 cm

Material de aporte	Amperaje	Probeta	Prueba			Promedio
EfeCr-A8	120 A	a	50.2	54	57.3	53.83
EfeCr-A8	120 A	b	51.7	51.6	55.5	52.93
EfeCr-A8	120 A	c	39.2	52.1	53.3	48.20
						51.66

Material de aporte	Amperaje	Probeta	Prueba			Promedio
EfeCr-A8	140 A	d	56.9	56.9	60.8	58.20
EfeCr-A8	140 A	e	60.5	58.9	55.1	58.17
EfeCr-A8	140 A	f	52.4	51.8	52.1	52.10
						56.16

Material de aporte	Amperaje	Probeta	Prueba			Promedio
EfeCr-A8	160 A	g	46.1	51	48.2	48.43
EfeCr-A8	160 A	h	41	42.7	46.2	43.30
EfeCr-A8	160 A	i	45.5	41.4	47.7	44.87
						45.53

Material de aporte	Amperaje	Probeta	Prueba			Promedio
EfeCr-A8	150 A	j	47.2	56.1	56.7	53.33
EfeCr-A8	150 A	k	41.6	51.8	56.6	50.00
EfeCr-A8	150 A	l	44.2	53.2	55.7	51.03
						51.46

  
Ing. José Julio Parían López  
Jefe de lab. Metalurgia Física

C)

**D) REGISTRO FOTOGRÁFICO DE PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES**











