

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



TESIS

**RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA
ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON RECUBRIMIENTOS DUROS
MEDIANTE EL PROCESO SMAW. CASO TAMBOPATA-MADRE DE DIOS
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADA POR:

BACH. EDISON WASHINGTON CHANCUAÑA MINGA
BACH. LUIS MIGUEL SALAS VALVERDE

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALÚRGICO**

ASESOR:

ING. ALFREDO TOMÁS BENITO ARAGÓN

CUSCO – PERÚ

2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: "RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON RECUBRIMIENTOS Duros MEDIANTE EL PROCESO MAW. CASO TAMBOPATA - MADRE DE DIOS" (INVESTIGACION TECNOLÓGICA)

presentado por: EDISON WASHINGTON CHANDAJA MINGA con DNI Nro.: 74405777 presentado por: LUIS MIGUEL SALAS VALVERDE con DNI Nro.: 70969147 para optar el título profesional/grado académico de INGENIERO METALÚRGICO

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 1 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, 10 de OCTUBRE de 2024

Firma

Post firma ALFREDO TOMÁS BENITO ARA GÓN

Nro. de DNI 23914405

ORCID del Asesor 0000-0002-5666-4047

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27259:374877428

NOMBRE DEL TRABAJO

TESIS_FINAL-Turnitin_Luis-Edison-8-2024.pdf

AUTOR

LUIS SALAS

RECUENTO DE PALABRAS

34029 Words

RECUENTO DE CARACTERES

194454 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

179 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

5.5MB

FECHA DE ENTREGA

Aug 7, 2024 7:14 AM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Aug 7, 2024 7:15 AM GMT-5

● 2% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 1% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 1% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

Presentación

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Señores integrantes de la Comisión Dictaminadora, de acuerdo a los lineamientos del Reglamento de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, con la finalidad de optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico; ponemos a vuestra consideración la tesis colectiva intitulada:

**“RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA
CENTRÍFUGA ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON
RECUBRIMIENTOS DUROS MEDIANTE EL PROCESO SMAW.
CASO TAMBOPATA-MADRE DE DIOS.”**

(Investigación Tecnológica)

La presente investigación es de nivel correlacional, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. El estudio considera los resultados de las pruebas experimentales las cuales tienen relación con el problema objeto de investigación, vinculado a la resistencia al desgaste de los impulsores presentes en las bombas centrífugas elaboradas artesanalmente, las cuales son empleadas para el transporte de grava en la minería aluvial aurífera de la región Madre de Dios. Se determinó que los aceros Chronit T1 400 y Hardox 450 recubiertas con electrodos; OK 83.58 Plus y Citodur 1000 mediante el proceso SMAW presentan buena resistencia al desgaste y mayor vida útil en el trabajo solicitado.

Bach. CHANCUAÑA MINGA, Edison Washington

Bach. SALAS VALVERDE, Luis Miguel

Dedicatoria

A mis padres, Lucia y Julio, quienes me han guiado y sostenido en cada paso de mi vida, por su constante apoyo. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo y la dedicación.

A mis hermanos, por cada risa compartida y cada momento de apoyo incondicional. Gracias por estar siempre ahí, en los momentos de alegría y en los de desafío, brindándome su compañía y aliento.

A mi asesor Ing. Alfredo T. Benito Aragón por su sabiduría y paciencia, por inspirarme a alcanzar más allá de lo que creía posible.

Finalmente, a mis docentes, a mis amigos y todas las personas que han sido parte de este viaje académico, les dedico este trabajo con profundo agradecimiento y cariño.

Con todo mi aprecio y gratitud;

Edison Washington Chancuaña Minga.

Dedicatoria

Mi más profundo agradecimiento a mis queridos padres Tomás y Presi, quienes fueron mi fuente de inspiración, quienes guían mi camino día a día con su amor incondicional, por el sacrificio y dedicación que pusieron en mí para desarrollarme en la persona que soy.

Mi más sincero agradecimiento a mis hermanos, Saida, Ciro, Frans, Huber, Susy, Rosaura y Marco por su apoyo incondicional, sus muestras de cariño durante este proceso. Sus palabras de aliento y su presencia han sido motivo y fortaleza en cada paso de este logro.

Mi agradecimiento a todos los familiares por su apoyo y por hacerme sentir querido y respaldado. Este logro es también de ustedes.

Mi agradecimiento para todos los docentes que impartieron sus conocimientos y experiencias con mi persona. En especial al Ingeniero Alfredo T. Benito Aragón, por su inestimable orientación, paciencia y dedicación. Sus consejos y su experiencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Con todo mi cariño;

Luis Miguel Salas Valverde.

Resumen

Los componentes que conforman una bomba centrífuga están sometidas a mecanismos de desgaste exigentes, por lo que es necesario que las piezas posean propiedades mecánicas adecuadas, de tal forma sean capaces de soportar los esfuerzos mecánicos a los que están sometidos y cumplan con lo requerido durante su ciclo de trabajo. El presente estudio abordó la problemática del desgaste de las piezas de acero que conforman el impulsor de bombas centrífugas artesanales. El objetivo de esta investigación es evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales. Para el diseño experimental se empleó el diseño factorial completo (2^3) con dos réplicas. Éstas involucraron muestras de aceros antiabrasivos revestidos con los electrodos duros con uno y dos pases de recubrimiento, con tales consideraciones se evaluó la resistencia al desgaste mediante el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65, ensayo de dureza HRC y análisis metalográfico. Se determinó que el tipo de electrodo es el factor más significativo en la variable dependiente, logrando una mejor resistencia al desgaste por abrasión con la aplicación del electrodo Citodur 1000 con dos pases de recubrimiento, además de mostrar una microestructura con presencia de carburos de cromo hexagonales en una matriz de austenita retenida y martensita, mostrando un comportamiento sinérgico favorable frente al desgaste abrasivo. El modelo matemático que explica la pérdida de volumen por desgaste por abrasión en función de las variables independientes es:

$$Y = 0.05016 - 0.00834 X_1 - 0.03177 X_2 - 0.00579 X_3 + 0.01287 X_1 * X_2 + 0.00408 X_1 * X_3 - 0.00123 X_2 * X_3 - 0.00564 X_1 * X_2 * X_3$$

Palabras Claves: Bombas centrífugas, resistencia al desgaste, aceros antiabrasivos, recubrimientos duros, SMAW, ASTM G65, dureza, microestructura

Abstract

The components that make up a centrifugal pump are subjected to demanding wear mechanisms, so it is necessary that the parts have adequate mechanical properties, so that they are able to withstand the mechanical stresses to which they are subjected and meet the requirements during their work cycle. This study addressed the problem of wear of the steel parts that make up the impeller of handmade centrifugal pumps. The objective of this research is to evaluate the abrasion wear resistance of OK 83.58 Plus and Citodur 1000 hard coatings applied by the SMAW process on Chronit T1 400 and Hardox 450 antiabrasive steels used in impellers of handmade centrifugal pumps. A full factorial design (23) with two replicates was used for the experimental design. These involved samples of antiabrasive steels coated with the hard electrodes with one and two coating passes, with such considerations the wear resistance was evaluated by abrasion wear test according to ASTM G65, HRC hardness test and metallographic analysis. It was determined that the type of electrode is the most significant factor in the dependent variable, achieving a better resistance to abrasive wear with the application of the Citodur 1000 electrode with two coating passes, besides showing a microstructure with the presence of hexagonal chromium carbides in a matrix of retained austenite and martensite, showing a favorable synergic behavior against abrasive wear. The mathematical model that explains the volume loss due to abrasive wear as a function of the independent variables is:

$$Y = 0.05016 - 0.00834 X_1 - 0.03177 X_2 - 0.00579 X_3 + 0.01287 X_1 * X_2 + 0.00408 X_1 * X_3 - 0.00123 X_2 * X_3 - 0.00564 X_1 * X_2 * X_3$$

Keywords: Centrifugal pumps, wear resistance, antiabrasive steels, hard coatings, SMAW, ASTM G65, hardness, microstructure.

Índice

Presentación	II
Dedicatoria.....	III
Resumen.....	V
Abstract.....	VI
Índice.....	VII
Índice de Figuras.....	XIV
Índice de Tablas	XVIII
Lista de abreviaturas	XX
Introducción	XXII
1. Capítulo I: Planteamiento del Problema	24
1.1. Situación problemática.	24
1.2. Formulación del problema.....	25
1.2.1. Problema general.....	25
1.2.2. Problemas específicos.	25
1.3. Justificación de la investigación.....	26
1.3.1. Justificación tecnológica.	26
1.3.2. Justificación económica.	26
1.3.3. Justificación ambiental.....	26
1.3.4. Contribución al conocimiento.....	26

1.4.	Objetivos de la investigación.....	27
1.4.1.	Objetivo general.....	27
1.4.2.	Objetivos específicos.....	27
2.	Capítulo II: Marco Teórico	28
2.1.	Antecedentes.....	28
2.1.1.	Antecedentes internacionales.....	28
2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	31
2.2.	Bombas centrífugas.....	32
2.2.1.	Clasificación de bombas centrífugas.....	33
2.2.2.	Partes constitutivas de una bomba centrífuga.....	34
2.2.3.	Eficiencia de una bomba centrífuga de tipo horizontal.....	38
2.3.	Tribología	39
2.3.1.	Fricción.....	39
2.3.2.	Lubricación.....	39
2.3.3.	Desgaste	40
2.4.	Desgaste de metales.....	40
2.4.1.	Desgaste abrasivo.....	42
2.4.2.	Desgaste adhesivo.....	46
2.4.3.	Desgaste por fatiga.....	47
2.4.4.	Desgaste por impacto.....	47

2.5.	Recubrimientos duros.....	48
2.5.1.	Metales de aporte.....	49
2.5.2.	Normas AWS de electrodos para aceros de baja aleación.....	50
2.6.	El acero.....	51
2.6.1.	Aceros simples.....	52
2.6.2.	Aceros de baja aleación.....	52
2.6.3.	Aceros de alta aleación.....	52
2.6.4.	Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA).....	53
2.7.	Metalurgia de la soldadura.....	54
2.7.1.	La zona de fusión.....	54
2.7.2.	Zona afectada por el calor.....	55
2.7.3.	La zona parcialmente fundida.....	58
2.7.4.	Diagrama hierro – carburo de hierro.....	59
2.7.5.	Soldabilidad.....	68
2.7.6.	Carbono Equivalente.....	70
2.7.7.	Defectos metalúrgicos.....	72
2.8.	Soldadura por arco de metal protegido (SMAW).....	75
2.8.1.	Tensión del arco.....	76
2.8.2.	Intensidad de corriente.....	77
2.8.3.	Corrientes de la soldadura.....	77

2.9.	Ensayo de desgaste por abrasiónASTM G-65.....	79
2.10.	Dureza.....	81
2.10.1.	Escalas de dureza.	82
2.11.	Microestructuras resistentes al desgaste.....	85
2.11.1.	Martensita.....	88
2.11.2.	Austenita.....	89
2.11.3.	Carburos.	89
2.12.	Relación de microestructura, dureza y desgaste abrasivo.	90
2.12.1.	Formación y microestructura de los carburos hipereutéticos.....	91
3.	Capítulo III: Hipótesis y Variables.....	92
3.1.	Hipótesis.....	92
3.1.1.	Hipótesis general.....	92
3.1.2.	Hipótesis específicas.	92
3.2.	Variables.....	92
3.2.1.	Identificación de variables.	92
3.2.2.	Operacionalización de variables.....	93
4.	Capítulo IV: Metodología.....	94
4.1.	Diseño de la Investigación.....	94
4.1.1.	Nivel de investigación.....	94
4.1.2.	Tipo de investigación.	94

4.1.3.	Delimitación de la investigación.	95
4.2.	Población.	97
4.3.	Diseño experimental.	97
4.4.	Tamaño de la muestra.	97
4.5.	Técnicas de recolección de información.	97
4.6.	Técnica de análisis de datos.	98
4.7.	Programa experimental.	98
5.	Capítulo V: Desarrollo Experimental.	99
5.1.	Procedimiento experimental.	99
5.2.	Materiales utilizados en la investigación.	100
5.2.1.	Selección del metal base y material de aporte.	100
5.3.	Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la investigación.	102
5.3.1.	Fuente de poder.	102
5.3.2.	Microscopio óptico.	104
5.3.3.	Durómetro.	105
5.3.4.	Desbastador.	106
5.4.	Procedimiento de soldadura.	108
5.4.1.	Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).	108
5.4.2.	Cálculo de carbono equivalente.	108
5.4.3.	Preparación de probetas.	109

5.4.4.	Aplicación de recubrimientos duros mediante soldadura SMAW.....	111
5.5.	Ensayo de desgaste por abrasión de arena seca / rueda de goma – Norma ASTM G65 – 16(2021).....	118
5.5.1.	Parámetros del ensayo de desgaste por abrasión.....	118
5.5.2.	Control de masa inicial y final.	119
5.5.3.	Determinación de la pérdida de volumen por desgaste abrasivo según norma ASTM G65	121
5.6.	Análisis metalográfico.....	122
5.7.	Ensayo de dureza HRC.....	125
5.8.	Cálculos de soldadura.....	126
5.8.1.	Aporte de calor neto	126
5.9.	Rendimiento de una bomba centrífuga artesanal de tipo horizontal.	127
5.9.1.	Eficiencia de una bomba.	128
6.	Capítulo VI: Resultados y Discusión	131
6.1.	Resultados de las pruebas de desgaste por abrasión de arena seca según la norma ASTM G65-16.....	131
6.1.1.	Diseño factorial completo 2^3	133
6.2.	Resultados de la caracterización metalográfica mediante observación microscópica.	148
6.3.	Resultados de medición de la dureza.....	156
6.4.	Correlación entre desgaste y dureza.	160

6.5. Análisis de costos y beneficios.....	162
Conclusiones.....	166
Recomendaciones	168
Bibliografía	169
ANEXOS	173

Índice de Figuras

Figura 1 Clasificación de bombas centrífugas.....	33
Figura 2 Partes principales de una bomba centrífuga.....	34
Figura 3 Impulsores según el diseño mecánico.....	35
Figura 4 Impulsores según el tipo de succión.....	36
Figura 5 Impulsores según el tipo flujo.....	36
Figura 6 Desgaste por abrasión en el impulsor y la carcasa de una bomba centrífuga artesanal.....	41
Figura 7 Desgaste abrasivo.....	43
Figura 8 Desgaste por abrasión según el tipo de contacto.....	44
Figura 9 Mecanismos de desgaste abrasivo según el contorno de contacto.....	45
Figura 10 Denominación de electrodos según la AWS.....	51
Figura 11 Regiones de una soldadura.....	55
Figura 12 Microestructura de la ZAC en aceros.....	58
Figura 13 Separación de impurezas y elementos de aleación a lo largo de los límites del grano.....	59
Figura 14 Diagrama hierro - carburo de hierro.....	60
Figura 15 Diagrama de hierro -carburo de hierro simplificado.....	62
Figura 16 Formación de martensita, a partir del enfriamiento rápido de la austenita.	63
Figura 17 Diagrama simple de transformación tiempo-temperatura (TTT) con diferentes velocidades de enfriamiento superpuestas.....	65
Figura 18 Diagrama CCT para un acero hipoeutectoide.....	66
Figura 19 Enfriamiento del proceso soldadura y tratamiento térmico del acero.....	67

Figura 20 Diagrama de Graville	72
Figura 21 Difusión de hidrógeno del metal de soldadura a la ZAC en la soldadura.	73
Figura 22 La soldadura por arco de metal protegido.	76
Figura 23 Corriente continua de electrodo negativo, polaridad directa.....	77
Figura 24 Corriente continua de electrodo positivo, polaridad inversa.	78
Figura 25 Corriente alterna.	79
Figura 26 Tribómetro de ensayo de desgaste por abrasión según norma ASTM G65.....	80
Figura 27 Ensayo de dureza mediante un Penetrador.....	81
Figura 28 Ensayo de dureza Rockwell	84
Figura 29 Designación de recubrimientos según su microestructura	86
Figura 30 Microestructuras de recubrimientos base Fe según % de C del electrodo.	87
Figura 31 Microestructura de Aceros resistentes al desgaste (Martensita)	88
Figura 32 Microestructura de Aceros resistentes al desgaste (Carburos).....	89
Figura 33 Relación de dureza, microestructura y desgaste.....	90
Figura 34 Representación esquemática de la transformación de una soldadura a partir la fase líquida de un acero hipereutéctica	91
Figura 35 Identificación de variables.....	93
Figura 36 Diagrama de flujo del procedimiento experimental.	99
Figura 37 Equipo de soldeo MILLER XMT 304 CC/CV.....	103
Figura 38 Microscopio PETIP.....	104
Figura 39 Durómetro LECO.....	105
Figura 40 Desbastador.	106

Figura 41 Aceros antiabrasivos Chronit 400, Hardox450 y metales de aporte OK 83.58 y Citodur 1000.	112
Figura 42 Aplicación de recubrimientos duros mediante soldadura SMAW.	112
Figura 43 Medición de Voltaje y Amperaje.	113
Figura 44 Limpieza de cordones de soldadura d revestimiento entre cada pasada.	114
Figura 45 Esquema de cortes	115
Figura 46 Cupones revestidos delimitadas para corte.	116
Figura 47 Corte de cupones y medición de temperatura.	116
Figura 48 Desbaste de las superficies de revestimiento de las probetas.....	117
Figura 49 Probetas preparadas para análisis experimental.	117
Figura 50 Equipo de desgaste por abrasión de arena seca, rueda de caucho.	120
Figura 51 Procedimiento de ensayo de desgaste abrasivo.....	120
Figura 52 Probetas sometidas al ensayo de desgaste por abrasión ASTM G65.	121
Figura 53 Desbaste de probetas	122
Figura 54 Probetas pulidas para ataque químico	123
Figura 55 Ataque químico.....	124
Figura 56 Observación de la metalografía en el microscopio PETIP.	124
Figura 57 Ensayo de dureza Rockwell C.....	125
Figura 58 Pérdida de volumen de la Serie 1 y Serie 2 con una capa de recargue.....	132
Figura 59 Pérdida de volumen de la Serie 1 y Serie 2 con 2 capas de recargue.....	132
Figura 60 Gráfica normal de efectos estandarizados.	142
Figura 61 Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.....	143
Figura 62 Gráfica de residuos.....	143

Figura 63 Gráfica de efectos principales.	145
Figura 64 Gráfica de interacción	146
Figura 65 Gráfica de cubos.....	147
Figura 66 Diagrama de la relación del contenido de carbono y dureza.....	156
Figura 67 Material de aporte vs. dureza.	158
Figura 68 Comparación de durezas promedios para cada material de aporte.	159
Figura 69 Correlación entre desgaste y dureza.....	160

Índice de Tablas

Tabla 1 Metales de aporte y sus respectivas especificaciones AWS-ASTM.....	49
Tabla 2 Fórmulas para calcular la dureza Rockwell basada en la escala utilizada.	85
Tabla 3 Datos del derecho minero.....	95
Tabla 4 Programa experimental.	98
Tabla 5 Aceros Chronit T1 400, Hardox 450.	100
Tabla 6 Composición química del acero Chronit T1 – 400 y Hardox450.....	101
Tabla 7 Propiedades mecánicas del acero Chronit T1 400 y Chronit TI 500.....	101
Tabla 8 Composición química de los metales de aporte.	102
Tabla 9 Características del equipo de soldeo.	103
Tabla 10 Características del microscopio PETIP.	104
Tabla 11 Características del durómetro LECO.....	106
Tabla 12 Características del desbastador metalográfico.	107
Tabla 13 Herramientas e instrumentos.	107
Tabla 14 Matriz de diseño experimental.	110
Tabla 15 Diseño experimental.....	110
Tabla 16 Dimensiones de las probetas para ensayo de desgaste abrasivo.	118
Tabla 17 Parámetros del ensayo de desgaste abrasivo.	119
Tabla 18 Resultados del ensayo de desgaste.	131
Tabla 19 Resumen del diseño.....	134
Tabla 20 Tabla de diseño.	134
Tabla 21 Tabla de efectos y coeficientes.	136
Tabla 22 Resumen del modelo.	139

Tabla 23 Análisis de Varianza.	139
Tabla 24 Resumen de las fases presentes de acuerdo al reconocimiento microscópico.	148
Tabla 25 Metalográfica: Chronit T1 400 + OK 83.58 +1 capa de revestimiento.....	149
Tabla 26 Metalográfica: Hardox 450 + OK 83.58 + 1 capa de recubrimiento.....	150
Tabla 27 Metalográfica: Chronit T1 400+Citodur 1000+ 1 capa de recubrimiento.....	151
Tabla 28 Metalográfica: Hardox 450 + Citodur 1000+1 capa de recubrimiento.	151
Tabla 29 Metalográfica: Chronit T1 400 + OK 83.58+ 2 capas de recubrimiento.	152
Tabla 30 Metalográfica: Hardox 450 + OK 83.58 + 2 capas de recubrimiento.	153
Tabla 31 Metalográfica: Chronit T1 400+Citodur 1000+2 capas de recubrimiento	153
Tabla 32 Metalográfica: Hardox 450 + Citodur 1000+2 capas de recubrimiento.....	154
Tabla 33 Microestructura del metal base del acero Hardox 450 y Chronit T1 400.	155
Tabla 34 Resultados de medición de durezas Rockwell C.....	157
Tabla 35 Costos de producción del impulsor con acero ASTM A36.	162
Tabla 36 Costo de materiales para el impulsor propuesto.....	162
Tabla 37 Costos de producción combinación de acero y recubrimiento.....	164

Lista de abreviaturas

ASTM:	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales
AWS:	Sociedad Americana de Soldadura
BCC:	Cúbica centrada en el cuerpo
BCT:	Tetragonal centrada en el cuerpo
CCT:	Transformación de enfriamiento continuo
CE:	Carbono Equivalente
DCEN:	Corriente Continua de Electrodo Negativo
DCEP:	Corriente continua de electrodo positivo
DIN:	Instituto Alemán de Normalización
DOE:	Diseño de experimentos
FCC:	Cúbica centrada en las caras
GMAW:	Soldadura por arco metálico con gas
HSLA:	Aceros de alta resistencia y baja aleación
HB:	Dureza Brinell
HBW:	Dureza Brinell con bola de carburo de tungsteno
HBN:	Dureza Brinell con bola de acero endurecido
HR:	Dureza Rockwell
HRC:	Dureza Rockwell medida en la escala C
HRB:	Dureza Rockwell medida en la escala B
HV:	Dureza Vickers
IIW:	Instituto Internacional de Soldadura
OFW:	Soldadura oxiacetilénica

Pcm:	Parámetro crítico de soldadura
SMAW:	Soldadura por arco metálico revestido
SAE:	Sociedad de Ingenieros de Automoción
TTT:	Tiempo, temperatura, transformación
SAW:	Soldadura por arco sumergido
WPS:	Especificación del procedimiento de soldadura)
WGS:	Sistema geodésico mundial
ZAC:	Zona afectada por el calor

Introducción

En muchas industrias es importante que los elementos de una máquina sean resistentes al desgaste, principalmente en aquellas donde el equipo se expone a situaciones extremas de abrasión, por ejemplo, las bombas centrífugas para transporte de fluidos. Esta investigación tiene como objetivo evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales, las cuales son utilizadas para el bombeo y transporte de grava en la minería aluvial de la región de Madre de Dios.

La metalurgia se enfrenta constantemente al desafío de mejorar la resistencia al desgaste. Para abordar este problema, diferentes investigaciones han analizado distintas técnicas de recubrimiento a fin de optimizar el rendimiento del acero. No obstante, se requiere un análisis más exhaustivo debido a la variabilidad en las condiciones operativas y la complejidad de las interacciones entre materiales y recubrimientos. Estudios como los de Kumar & Verma (2017) y Jauja (2014) han demostrado que la resistencia al desgaste está influenciada principalmente por la microestructura del depósito del recubrimiento conformada por carburos, además del número de capas de recubrimiento.

A pesar de los avances tecnológicos, la elección del recubrimiento adecuado para maximizar la resistencia al desgaste sigue siendo una tarea compleja y específica para cada aplicación. La pregunta que guía esta investigación y representan un problema relevante tanto para la teoría como para la práctica es: ¿Como influirá la aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en la resistencia al desgaste del impulsor de una bomba centrífuga artesanal elaborada en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450?

Esta investigación es de vital importancia para mejorar la vida útil de los componentes industriales como para disminuir los gastos en mantenimiento y aumentar la eficiencia operativa en sectores críticos. El estudio podría tener implicaciones importantes para la elección de materiales en aplicaciones donde es crucial contar con resistencia al desgaste.

La estructura de esta tesis de investigación está organizada en cinco capítulos. El capítulo I, aborda el planteamiento del problema, explica la situación problemática, formulación del problema, justificación y los objetivos de la investigación. El capítulo II, proporciona información relevante del marco teórico señalando el estado del arte, así mismo las bases teóricas de la investigación. El capítulo III, describe la hipótesis general y las hipótesis específicas, como también, la contextualización de las variables dependientes e independientes. El capítulo IV, detalla la metodología de investigación, de acuerdo al nivel correlacional, se estima alcanzar un entendimiento integral de las variables en estudio, proporcionar información válida que oriente la selección de los materiales en el diseño y la manufactura de impulsores de bombas con propiedades adecuadas resistentes al desgaste. El capítulo V, brinda información referente al desarrollo experimental donde se detalla el procedimiento experimental, los materiales, equipos usados y los ensayos realizados. El capítulo VI, expone los resultados de las pruebas experimentales; ensayo de desgaste abrasivo ASTM G65, ensayo de dureza HRC y análisis metalográfico. Finalmente, las conclusiones con las principales contribuciones de la investigación y las recomendaciones que sugieren direcciones para futuras investigaciones.

Capítulo I:

Planteamiento del Problema

1.1. Situación problemática.

En aplicaciones industriales, las bombas centrífugas que sufren desgaste por abrasión han sido objeto de amplia investigación debido a los retos que presenta. Es ampliamente conocido que los impulsores de bombas centrífugas, especialmente aquellos que manejan fluidos con sólidos en suspensión, sufren frecuentemente abrasiones que resultan en fallos. Estos componentes clave se ven afectados en gran medida por la abrasión causado por partículas sólidas, lo que reduce tanto su rendimiento como su vida útil. Krüger, Martin, & Dupontb (2010). En un estudio de campo realizado en la minería aluvial de la región de Madre de Dios, se evidenció el uso extensivo de bombas centrífugas elaboradas de manera artesanal para la manipulación de grava. Estas bombas debido a su función, operación continua y las fuerzas de abrasión a las que están sometidas, tienden a desgastarse con mayor rapidez. Las deficiencias tecnológicas incluyen el uso de materiales como el acero estructural ASTM A36, que presenta propiedades mecánicas limitadas frente al desgaste por abrasión y la falta de recubrimientos avanzados que puedan mejorar la durabilidad de los impulsores.

Aunque la durabilidad de los impulsores es muy importante, se desconoce en gran medida cómo afectan diferentes materiales y métodos de fabricación artesanal a su resistencia al desgaste por abrasión. En ese sentido, es necesario una evaluación exhaustiva acerca de cómo las composiciones químicas y la aplicación de recubrimientos duros en aceros antiabrasivos a través de la soldadura por arco eléctrico afectan la formación de microestructuras, y por ende, influyen las propiedades de dureza y resistencia al desgaste.

Es fundamental conocer estos aspectos para enfrentar de manera efectiva el problema del desgaste abrasivo, porque permitirá prologar la vida útil de los impulsores, reducir los costos de mantenimiento y mejorar la eficiencia operativa de las bombas, lo que es esencial para mantener la rentabilidad y sostenibilidad en la minería aluvial.

Para abordar el problema del desgaste por abrasión, se propone la aplicación de soluciones tecnológicas, la cual incluye el uso de aceros antiabrasivos, como Chronit T1 400 y Hardox 450 para la fabricación de los impulsores de las bombas con la aplicación de recubrimientos duros como OK 83.58 plus y Citodur 1000 mediante soldadura por arco eléctrico (SMAW), la cual posibilita una alternativa de solución tecnológica para incrementar la resistencia al desgaste por abrasión, lo que implica un mejor performance de las bombas durante su operación.

1.2. Formulación del problema.

1.2.1. Problema general.

¿Cómo influirá la aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en la resistencia al desgaste del impulsor de una bomba centrífuga artesanal elaborada en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450?

1.2.2. Problemas específicos.

- **PE1:** ¿Influirá el material de aporte OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?
- **PE2:** ¿Influirá el número de pases de recubrimiento de 1 capa y 2 capas en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?
- **PE3:** ¿Influirá el tipo de acero antiabrasivo Chronit T1 400 y Hardox 450 en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?

1.3. Justificación de la investigación.

1.3.1. Justificación tecnológica.

La búsqueda de nuevas alternativas para reforzar las propiedades mecánicas de un material o mejorar el rendimiento de equipos conlleva a proponer soluciones tecnológicas que garanticen el buen funcionamiento de los componentes de una bomba centrífuga artesanal. De ahí nace la idea de aplicar recubrimientos duros en la superficie del impulsor de bombas centrífugas para mejorar la resistencia al desgaste por abrasión y compensar sus propiedades mecánicas sin comprometer el funcionamiento y la productividad.

1.3.2. Justificación económica.

La aplicación de recubrimientos duros incrementa la resistencia al desgaste por abrasión, lo que hace que el impulsor de la bomba centrífuga artesanal amplíe su ciclo de servicio reduciendo los costos de mantenimiento por fallas mecánicas y costos de recuperación ocasionadas por las fuerzas de abrasión a las que están sometidas durante su funcionamiento.

1.3.3. Justificación ambiental.

Al minimizar la frecuencia de mantenimiento por fallas mecánicas y de renovación, se reducen los residuos metálicos producidos por los procedimientos aplicados, además del ahorro de energía eléctrica y la reducción del uso de combustibles como el petróleo y la emisión de óxidos de carbono al ecosistema. El uso de materiales duraderos contribuye a prácticas más ecológicas al disminuir la necesidad de recursos para fabricar nuevos componentes y reducir la generación de residuos.

1.3.4. Contribución al conocimiento.

Al proporcionar datos sobre la eficacia relativa de diferentes recubrimientos duros aplicados a aceros antiabrasivos, este estudio contribuirá a aumentar el conocimiento actual. Los

resultados esperados podrán ayudar a identificar los recubrimientos más eficientes en distintas condiciones de desgaste, lo que podría orientar las investigaciones y avances futuros en este ámbito.

1.4. Objetivos de la investigación.

1.4.1. Objetivo general.

Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.

1.4.2. Objetivos específicos.

- OE1: Determinar la influencia del material de aporte: OK 83.58 Plus y Citodur 1000, de acuerdo a la pérdida de volumen, la microestructura y la dureza del recubrimiento; aplicado mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.
- OE2: Determinar el efecto del número de pases de recubrimiento basado en la pérdida de volumen, la microestructura y la dureza del recubrimiento; aplicado mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.
- OE3: Determinar la influencia del tipo de acero antiabrasivo; Chronit T1 400 y Hardox 450, en la resistencia al desgaste del recubrimiento del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.

Capítulo II:

Marco Teórico

2.1. Antecedentes.

2.1.1. Antecedentes internacionales.

Kumar & Verma, (2017). *“Effect of multilayer hardfacing on metallurgical and wear behaviour of mild steel using SMAW process”* [Efecto del recargue multicapa sobre el comportamiento metalúrgico y de desgaste del acero dulce mediante proceso SMAW]. Este estudio tuvo como objetivo examinar los efectos de la aplicación de múltiples capas de recubrimiento en el comportamiento metalúrgico y la resistencia al desgaste de las aleaciones reforzadas con carburos complejos. Las aleaciones de recubrimiento resistente fueron depositadas en placas de acero al carbono ASTM A36 en tres capas distintas, variando el número de pasadas en cada una. Las pruebas de resistencia al desgaste por adherencia se llevaron a cabo utilizando una máquina de desgaste pin-on-disc según los procedimientos estandarizados en las normas ASTM G99. Se realizaron análisis detallados de la estructura microscópica y la microdureza, junto con análisis espectrales utilizando un espectrómetro de emisión óptica. Los resultados indicaron que tanto la resistencia al desgaste como la dureza están influenciadas por factores como forma, tamaño y composición química de los carburos, además de la microestructura de la matriz compuesta por martensita y austenita retenida. Los autores concluyen que en la tercera capa la resistencia al desgaste, la dureza y la presencia de carburos eran más altas. Sin embargo, estas diferencias no eran considerablemente superiores a las observadas en la segunda capa. Además, se notó que la segunda capa experimentó un incremento significativo en comparación con la primera capa de cobertura.

Ramakesavulu, (2017). “*Study of wear characteristics of hardfaced layers made by E430 and E410 electrodes using SMAW process*” [Estudio de las características de desgaste de las capas de recargue realizadas con electrodos E430 y E410 mediante proceso SMAW]. En esta investigación, el recargue multicapa de acero dulce se realizó mediante la soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW) utilizando dos electrodos diferentes con el fin de comparar el rendimiento de las capas recargadas. Se seleccionó el proceso SMAW por ser el más versátil. En este estudio, también se centró en la influencia de las variaciones de cromo en el desgaste, la templabilidad y el efecto en la microestructura, etc. El objetivo principal del recargue elegido aquí fue reparar, mejorar y prolongar el ciclo de vida de los equipos industriales compuestos de acero dulce de forma económica y proporcionar una excelente resistencia al desgaste. Se realizaron ensayos de desgaste y otras pruebas, que se complementaron con un estudio detallado de la dureza. El comportamiento al desgaste del material de revestimiento duro se ensayó utilizando una máquina de pernos y discos. Se estudió el efecto de la aleación multicapa y superficial sobre la dureza, la microestructura y el comportamiento al desgaste del acero dulce. Se comprobó que el recargue de triple capa presenta buenas propiedades de resistencia al desgaste, seguido del recargue de capa simple y doble. Finalmente, el autor concluye que, entre los dos electrodos, los depósitos del electrodo E430 presentan una buena resistencia al desgaste que los depósitos del electrodo E410. También se observó que, conforme se incrementa el contenido de cromo y martensita en su microestructura del metal revestido se contribuye a mejorar la resistencia al desgaste.

Vidal & Hoyos, (2017). “*Resistencia al desgaste abrasivo de un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido*”. Tesis de investigación. Universidad de Córdoba, (Colombia). El objetivo de esta investigación fue estudiar la resistencia a la abrasión con material de aporte WESTHARD 70, realizando tres pasadas de revestimiento en dos probetas de

acero ASTM A36. Las pruebas de evaluación experimental para calcular la resistencia al desgaste se realizaron de acuerdo al ensayo de la norma ASTM G65, pruebas de ensayo de dureza, análisis microestructural, observación microscópica y difracción de rayos X. A partir de las pruebas realizadas se evaluó la resistencia a la abrasión mediante el análisis de las relaciones de pérdida de masa y microestructura, contrastando los resultados con los obtenidos para el acero AISI D2. El aporte de esta investigación según los resultados obtenidos indica que la resistencia al desgaste del acero ASTM A36 con tres capas de recubrimiento duro es tres veces mayor que el acero de herramienta AISI D2.

Carbajal et al., (2014). *“Influencia del tipo de electrodo y número de pases de soldadura sobre la resistencia al desgaste por abrasión en el proceso de Hardfacing”*. Tesis de Investigación. Universidad Libre, (Colombia). Este estudio tuvo como objetivo principal seleccionar el metal de aporte y el número de capas de soldeo que proporcionen mejores propiedades al ser expuestas a cargas que producen desgastes abrasivos. La prueba de desgaste se efectuó según la norma ASTM G65 con el procedimiento B. Asimismo, ensayos de microdureza y microscopia convencional; con los resultados de pérdida de masa de las placas se determinó el coeficiente de desgaste, el cual fue comparado con la composición química de cada material de aporte (Overlay 60®, Overlay 62® y Oversugar®) y la cantidad de capas de recargue. El autor de esta investigación menciona que la dureza no siempre es un indicador de la resistencia al desgaste, sino que depende del número de pasadas y la composición química del electrodo. El autor concluye que el electrodo de recubrimiento duro Overlay 62® con dos capas de soldeo es más eficiente para trabajos con presencia de abrasión severa debido a un factor menor del coeficiente de desgaste y menor pérdida de masa.

2.1.2. *Antecedentes nacionales.*

Jauja, (2014). “*Estudio experimental de la resistencia al desgaste abrasivo para depósitos con recubrimiento protector de soldadura, empleando el electrodo E6-UM-60 (Clasificación DIN 8555), Proceso SMAW*”. Tesis de investigación. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, (Arequipa). Este estudio se propuso como objetivo llevar a cabo una evaluación del desgaste por abrasión de depósitos de revestimiento aplicados con el electrodo revestido E6-UM-60. Así mismo, analizar la influencia de la dureza y la microestructura con respecto a la resistencia al desgaste de los recargues. Para tal efecto, se siguió el diseño factorial 2^3 , tomando en cuenta como variables seleccionadas el amperaje, la cantidad de capas de recubrimiento y la temperatura de precalentamiento. Al concluir el estudio, se llegó a la conclusión, que para la obtención de una buena resistencia al desgaste por abrasión es necesario realizar depósitos con tres pasadas de recubrimiento protector obteniendo una microestructura martensítica. Además, el autor concluye que el amperaje aplicado durante el proceso de soldadura de recubrimiento no establece con mucha relevancia la obtención de alta resistencia al desgaste abrasivo.

Noriega, (2013) “*Resistencia al desgaste abrasivo de recargues duros fabricados con electrodos con 5% de FeTi y contenido variable de FeV*”. Tesis de investigación. Pontificia Universidad Católica del Perú, (Lima). El objetivo de esta investigación fue evaluar el rendimiento de depósitos de recubrimientos duros usando nuevos materiales de aporte. Específicamente estudió el impacto del contenido de Ferro-Vanadio (2.85%, 3.85% y 5.85%) en la metalografía, dureza y resistencia al desgaste mediante el proceso de soldadura por arco con electrodo revestido en probetas de acero ASTM A36 y determinar el electrodo que brinda un recubrimiento con mayor resistencia al desgaste. Finalmente se llegó a los siguientes resultados:

- El número de pases de recubrimiento afecta térmicamente a la capa anterior y como resultado incrementa la dureza del recubrimiento superficial.
- Con una proporción del 5.85 % de FeV en el revestimiento del electrodo se percibió la mayor dureza en la superficie con un promedio de 737 HV.
- La dureza promedio del depósito es directamente proporcional a la resistencia al desgaste, a medida que mejora la dureza del depósito, también incrementa la resistencia.

Esta investigación nos ayuda a deducir que el número de pasadas de recubrimiento determina la dureza y la resistencia al desgaste por abrasión.

2.2. Bombas centrífugas.

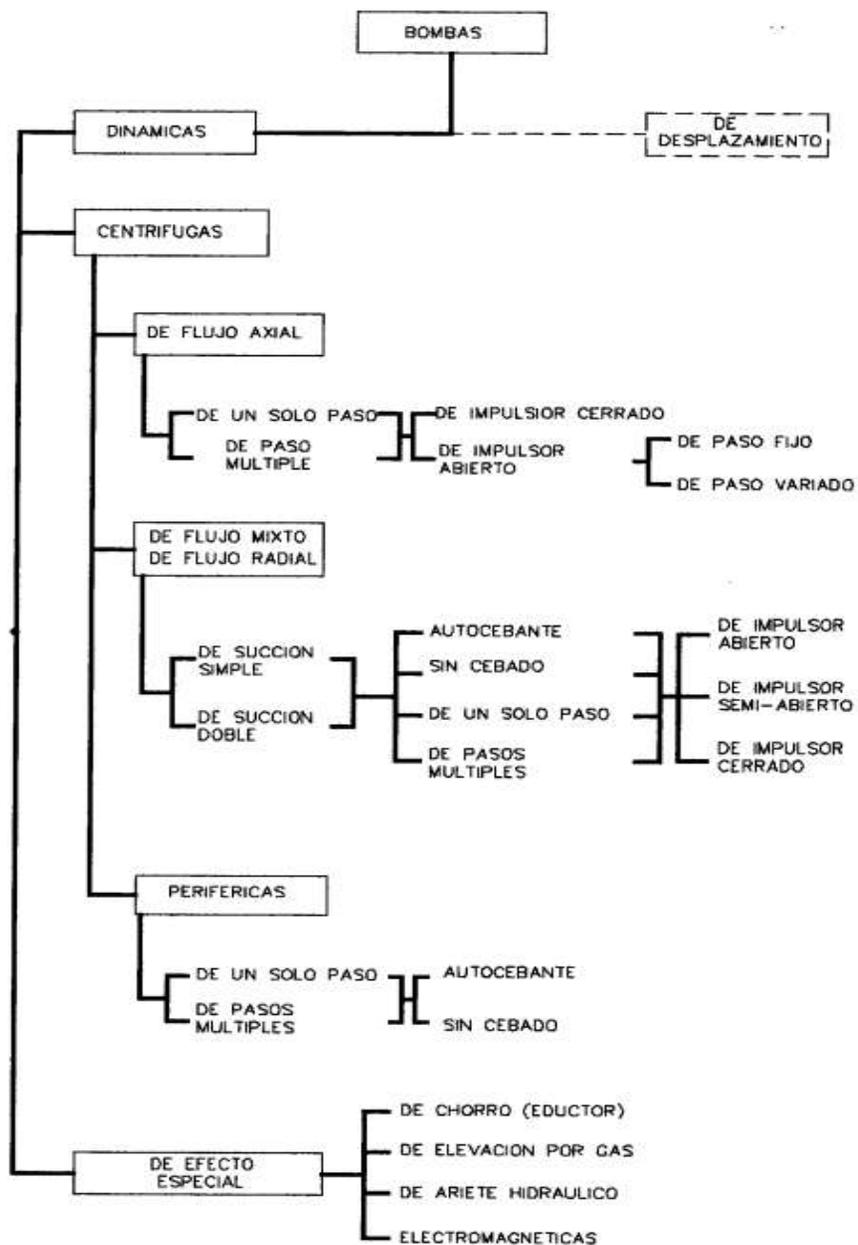
Las bombas centrífugas tienen la función de transportar líquidos mediante la conversión de energía mecánica en energía cinética. Una opción para hacer que el líquido se transporte más fácilmente a través de las tuberías es utilizar una bomba con un impulsor rotativo, ya que este incrementa la velocidad del fluido y genera un aumento en la presión. Según Borrero & Gil (1995) se trata de un equipo hidráulico que opera utilizando flujos de líquidos, el cual absorbe energía mecánica y transfiere al fluido convertida en presión y velocidad. La transferencia de energía concluye cuando el fluyente abandona las aletas del rotor, devolviendo así esta energía hidráulica y generando un aumento en la energía de presión dentro de la carcasa.

De esta manera, contaremos con dispositivos de bombeo empleados para alterar la ubicación de un fluido específico. Un caso ilustrativo es el de una bomba diseñada para pozos profundos, la cual aporta energía para elevar el agua desde las capas subterráneas hasta la superficie. Asimismo, se incluyen las bombas roto-dinámicas o centrífugas utilizadas para manipular lodos. (ver Figura 1) (Zubicaray Viejo, 2000)

2.2.1. Clasificación de bombas centrífugas.

Figura 1

Clasificación de bombas centrífugas.

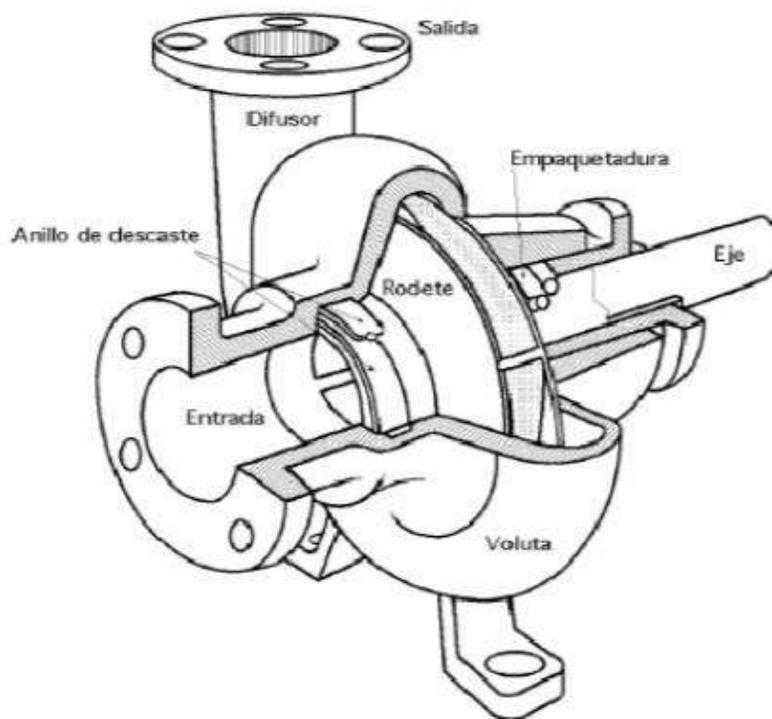


Nota. Un método elemental de categorización comienza por describir el principio mediante el cual se introduce energía al líquido, luego identifica el medio a través del cual se aplica dicho principio y, por último, describe las formas geométricas frecuentemente utilizadas. Obtenido de (Borrero & Gil, 1995)

2.2.2. Partes constitutivas de una bomba centrífuga.

Figura 2

Partes principales de una bomba centrífuga.



Nota. Partes constitutivas de una bomba centrífuga. Recuperado de <https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>

2.2.2.1. Impulsor o rodete.

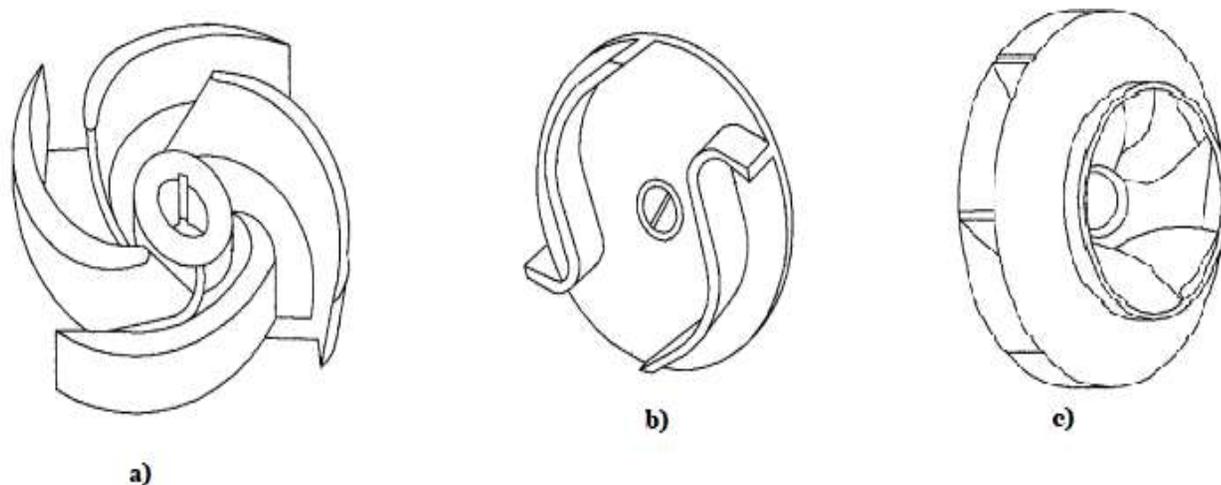
El impulsor es el responsable de transmitir energía al fluido que se está bombeando; en otras palabras, al girar, el rotor comunica un movimiento de giro al líquido, lo que genera un aumento de la presión en la rueda de paletas, esto es una consecuencia directa de la fuerza centrífuga que actúa, (Figura 2). En su diseño, se prioriza la consideración del líquido a manejar, teniendo en cuenta sus propiedades como viscosidad, densidad, presencia de sólidos, entre otras. (Borrero & Gil, 1995)

2.2.2.1.1. Tipo de diseño mecánico.

Como se muestra en la Figura 3; los impulsores de una bomba centrífuga se dividen en: Abierto, Semiabierto y cerrado.

Figura 3

Impulsores según el diseño mecánico.



Nota: a) Impulsor abierto. b) Impulsor semiabierto. c) Impulsor cerrado. Obtenido de (Borrero & Gil, 1995)

2.2.2.1.2. Tipo de succión.

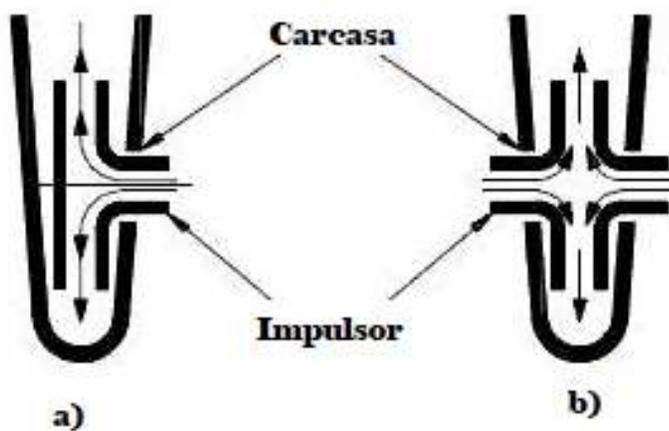
Según el tipo de succión, se dividen en impulsores de simple succión e impulsores de doble succión como se presenta en la Figura 4.

2.2.2.1.3. Dirección de flujo.

El flujo radial se origina cuando el flujo en la salida del rotor sigue una trayectoria perpendicular al eje. El líquido entra al rotor en una dirección axial a través de la boquilla de aspiración y es expulsado radialmente hacia la carcasa. Por otro lado, el flujo axial ocurre cuando el líquido entra y sale del rotor en una dirección paralela al eje. Por último, en el caso del flujo combinado o mixto, el líquido penetra axialmente en el rotor y se descarga en una dirección que se encuentra entre la radial y la axial. (ver figura 5)

Figura 4

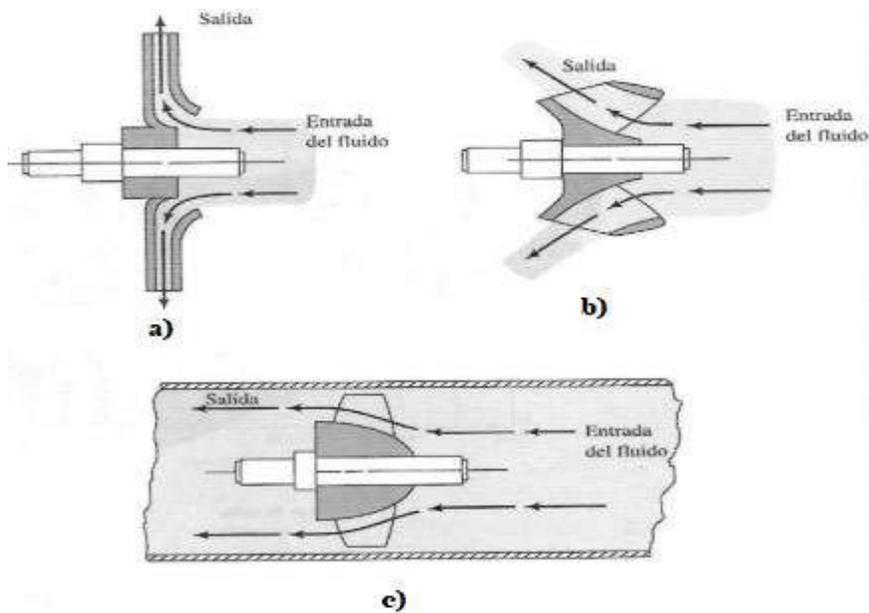
Impulsores según el tipo de succión.



Nota. a) Impulsor de simple succión. b) Impulsor de doble succión. Obtenido de <https://www.fesmex.com.mx/articulo/tipos-de-impulsores/>

Figura 5

Impulsores según el tipo flujo.



Nota. a) Impulsor de flujo radial. b) Impulsor de flujo mixto. c) Impulsor de flujo axial. Recuperado de <https://es.slideshare.net/juansanher/bombas-versin-mejorada>

2.2.2.2. Carcasa.

También conocido como caja espiral, este componente puede ser concebido como un conducto o una guía única que rodea completamente el rotor. Su función es convertir la energía cinética en energía de presión, o una combinación de ambas formas de energía. Debido a la gradual expansión de la carcasa, se generan fuerzas desequilibradas sobre el impulsor. Además, las partículas que se desplazan a lo largo de la capa límite de las paredes laterales de la espiral experimentan resistencia debido a las fuerzas de fricción. Como resultado de esto, se generan variaciones en la presión, lo que da lugar a la formación de flujos secundarios. (Borrero & Gil, 1995)

2.2.2.3. Difusor.

El conjunto del difusor y el rotor se hallan contenidos en una cámara denominada carcasa o cuerpo de la bomba. El difusor está compuesto por aletas fijas que se abren en forma de cono, de manera que, al aumentar el área de la carcasa, la velocidad del fluido disminuirá. Este proceso ayuda a convertir la energía cinética en energía de presión, lo que a su vez mejora la eficiencia de la bomba. También cumple la función de dirigir el líquido hacia la salida del rotor y contribuye a equilibrar la carga radial hidráulica del rotor. (Borrero & Gil, 1995)

En la figura 2, también se pueden apreciar otros componentes tales como la entrada y salida; la primera también denominada como tubería de succión y la salida se identifica como tubería de descarga. El eje desempeña el papel de soporte para el rotor, permitiendo su rotación mediante la fuerza provista por el motor. Este eje constituye una parte esencial de la bomba centrífuga, ya que posibilita el movimiento tanto del propio eje como del rotor, logrando así la circulación del fluido.

2.2.3. Eficiencia de una bomba centrífuga de tipo horizontal

La eficiencia es un parámetro crucial en la evaluación del desempeño de la bomba, ya que una mayor eficiencia implica un uso más óptimo de la energía, asimismo, la eficiencia de una bomba centrífuga horizontal generalmente varía en función de su punto de operación, y es máxima cuando la bomba opera cerca de su punto de diseño, conocido como el punto de mejor eficiencia. La eficiencia de una bomba centrífuga horizontal se define como la relación entre la potencia hidráulica entregada al fluido y la potencia total suministrada a la bomba. (Karassik et al., 2008). En términos matemáticos, la eficiencia (η) se expresa como:

$$\eta = \frac{P_{hidraulica}}{P_m} = \frac{Q * \Delta H * \rho * g}{P_m} \quad (1)$$

Donde:

$P_{hidraulica}$: Es la potencia hidráulica entregada al fluido

P_m : Es la potencia total suministrada del motor

La potencia que es suministrada del motor (**P_m**), también llamada como potencia de entrada, es la cantidad total de energía que el motor proporciona la bomba para realizar su trabajo.

La potencia hidráulica (**$P_{hidráulica}$**), es la cantidad de energía útil transferida al fluido por la bomba, se calcula mediante la fórmula. (Karassik et al., 2008).

$$P_{hidraulica} = Q * \Delta H * \rho * g \quad (2)$$

Donde:

Q : Es el caudal volumétrico (m³/s)

ΔH : Es la altura generada por la bomba (m)

ρ : Densidad del fluido (kg/m³)

g : Aceleración natural de la gravedad (m/s²)

2.3. Tribología

La tribología es el campo científico dedicado a la investigación de la fricción, la lubricación y el desgaste de los fenómenos que suceden cuando dos superficies interactúan al deslizarse entre sí. En esta disciplina, los elementos clave son, como mínimo, dos superficies en contacto y su movimiento relativo. (American Society for Metals, 1992)

El objetivo fundamental de la investigación en tribología consiste en minimizar y en última instancia eliminar, las pérdidas de material derivadas de la fricción y el desgaste en todos los aspectos de la tecnología en los que la interacción de superficies desempeña un papel crucial. Los resultados de la investigación tribológica se traducen en mejoras en la eficiencia de las instalaciones, un rendimiento más óptimo, una disminución de las fallas y, en última instancia, en ahorros sustanciales. (Bhushan, 2013)

2.3.1. Fricción

La fricción se define como la oposición que se presenta al intentar mover un objeto sólido a lo largo de otro con el cual está en contacto. Esta resistencia se manifiesta como una fuerza tangencial que actúa en sentido contrario a la dirección del movimiento, y es conocida como fuerza de resistencia por fricción. (Bhushan, 2013). Los objetos involucrados pueden ser un gas y un sólido, lo que se denomina fricción aerodinámica; o también, un líquido y un sólido, conocido como fricción líquida. También puede ocurrir fricción debido a procesos internos de disipación de energía dentro de un cuerpo, denominándose esto fricción interna. (American Society for Metals, 1992)

2.3.2. Lubricación

La lubricación implica la introducción de un lubricante, que puede ser en forma de gas, líquido o sólido, entre dos superficies sólidas que se deslizan una sobre la otra. Este proceso tiene

como objetivo principal reducir la fricción y el desgaste, así como disipar el calor y los residuos que se generan durante el deslizamiento. La forma en que se lleva a cabo la lubricación puede variar significativamente, diversos elementos como la forma de los objetos en contacto, la rugosidad y textura de las superficies, la carga aplicada, la presión y la temperatura, las velocidades de deslizamiento y rodadura, las condiciones ambientales, las propiedades físicas y químicas del lubricante, la composición del material y las características de la capa superficial.(Ammerican Society for Metals, 1992)

2.3.3. *Desgaste*

El desgaste se define como el deterioro superficial o la remoción de material en una o ambas superficies sólidas mientras se desplazan, ruedan o impactan entre sí. En la mayor parte de los casos, el desgaste surge debido a interacciones en las irregularidades superficiales. Durante el movimiento, es posible que el material en la superficie de contacto se reorganice, modificando así las propiedades del sólido, al menos en la superficie o en las zonas cercanas. Sin embargo, en realidad, se pierde una cantidad mínima o nula de material.(Bhushan, 2013)

2.4. *Desgaste de metales.*

El desgaste de metales se puede describir como el deterioro de una superficie sólida debido a la remoción o desplazamiento de material causado por la interacción mecánica con otro sólido, líquido o gas en contacto. Este proceso puede provocar daños significativos en la superficie, y por lo general, se caracteriza como una forma de degradación progresiva del material y la disminución de las dimensiones debido a la acción mecánica. De esa forma el desgaste de metales surge como consecuencia de la deformación plástica y la separación de materiales con el transcurso del tiempo. (Maleque & Salit, 2013).

Figura 6

Desgaste por abrasión en el impulsor y la carcasa de una bomba centrífuga artesanal.



Nota. Obtenido de registro fotográfico, Madre de Dios (2024).

La calidad de los productos de metal depende en gran medida del estado de sus superficies. El desgaste que estas superficies experimentan durante el uso es un factor fundamental a considerar. Este declive también posee una relevancia significativa en el ámbito de la ingeniería, ya que a menudo constituye el factor principal que restringe tanto la vida útil como el rendimiento de los componentes de una máquina. Entre las fuerzas más perjudiciales a las que se encuentran expuestos los metales, el desgaste destaca como una de las más destructivas. (Avner, 1974).

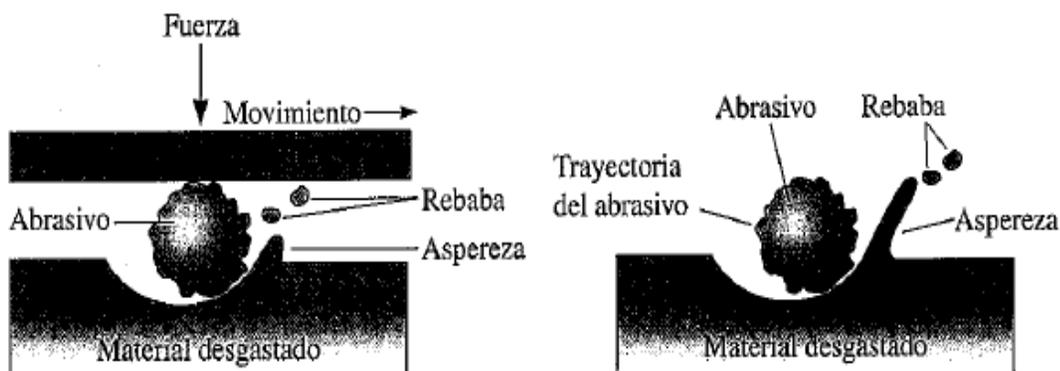
Según Schey, el desgaste implica la disminución gradual de la sustancia en la superficie operativa de los elementos. De manera alternativa, es posible elevar la resistencia al desgaste al revestir la superficie o cambiar su forma para lograr una mayor capacidad de resistencia al desgaste. (2002, p.113).

2.4.1. Desgaste abrasivo.

Este tipo de desgaste representa el modo más común de deterioro que ocurre en el funcionamiento de equipos y maquinarias dentro de la industria. El desgaste por abrasión surge debido a partículas de naturaleza sólida y dura, que pueden encontrarse tanto dentro de uno de los elementos en contacto como situadas entre ambos componentes. (Schey, 2002).

Según la descripción de la ASTM, se origina debido a partículas de alta dureza o protuberancias duras que son presionadas contra una superficie sólida y se desplazan a lo largo de esta. El desgaste se produce cuando una superficie sólida se deteriora gradualmente debido al movimiento entre esa superficie y uno o más elementos que entran en contacto con ella, lo que provoca una pérdida progresiva de material. (American Society for Metals, 1992)

Cuando ocurre la eliminación de material de una superficie debido al contacto con partículas de alta dureza, se presenta el fenómeno del desgaste por abrasión (Figura 7). Estas partículas pueden encontrarse en la superficie de otro material o incluso existir como partículas separadas entre las dos superficies. Este tipo particular de desgaste es frecuente en maquinaria industrial, como arados, cuchillas de niveladoras, trituradoras y molinos empleados en trabajos con materiales abrasivos. También puede manifestarse cuando partículas duras se introducen involuntariamente en las partes móviles de dicha maquinaria. Además, el desgaste por abrasión se utiliza de manera deliberada en procesos de maquinado para eliminar material de forma planificada. (Askeland et al., 2012)

Figura 7*Desgaste abrasivo.*

Nota. Desgaste por abrasión causado por elementos o partículas abrasivas atrapadas o libres. En la imagen se puede observar el desgaste gradual que produce una partícula en la superficie de un material. Recuperado de (Askeland et al., 2012)

La manifestación de la abrasión es especialmente notable en los sectores industriales ligados a la agricultura, la minería, el tratamiento de minerales, la construcción de infraestructuras y, en esencia, en cualquier contexto en el que se manejen terrenos, piedras y minerales. Algunos ejemplos de esto son las máquinas trituradoras y las plataformas de transporte de materiales. (American Society for Metals, 1992)

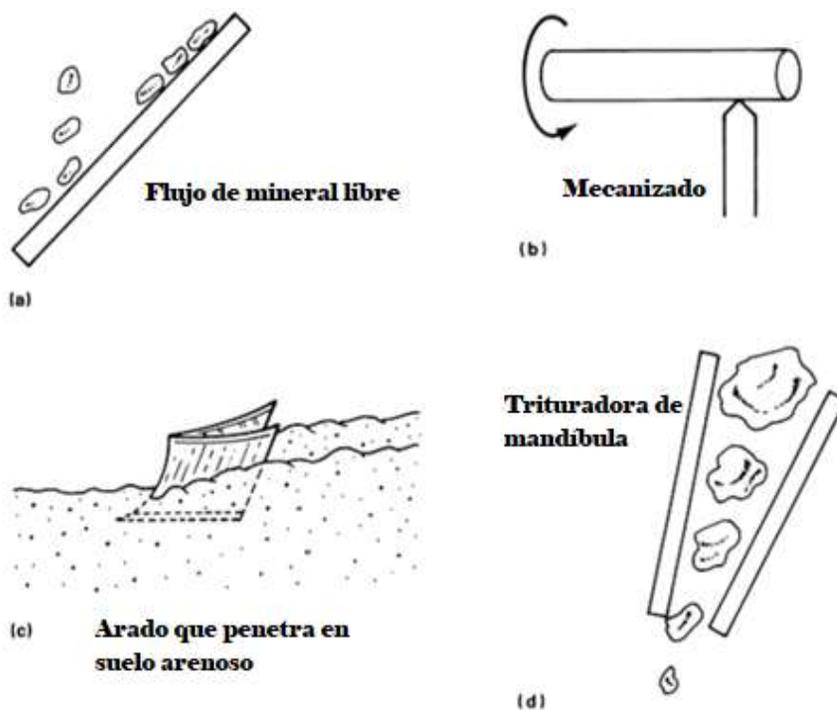
2.4.1.1. Clasificación del desgaste abrasivo.

2.4.1.1.1. Según el tipo de contacto.

Dependiendo de la naturaleza del contacto, se pueden distinguir dos tipos de desgaste: el desgaste de dos cuerpos y el desgaste de tres cuerpos. El primero acontece cuando una superficie abrasiva se desliza a lo largo de otra superficie, donde una de las superficies en fricción es la más rígida. En el segundo caso, se presenta cuando una superficie dura actúa como un tercer elemento, generalmente una pequeña partícula abrasiva que queda atrapada entre dos superficies como se muestra en la Figura 8. Esta partícula abrasiva posee la dureza suficiente para desgastar una o ambas superficies en contacto. (Stachowiak, 2005)

Figura 8

Desgaste por abrasión según el tipo de contacto.



Nota. Contactos durante el desgaste abrasivo. a) Dos cuerpos abiertos. b) Dos cuerpos cerrados. c) Tres cuerpos abiertos. d) Tres cuerpos cerrados. Adaptado de (Stachowiak, 2005)

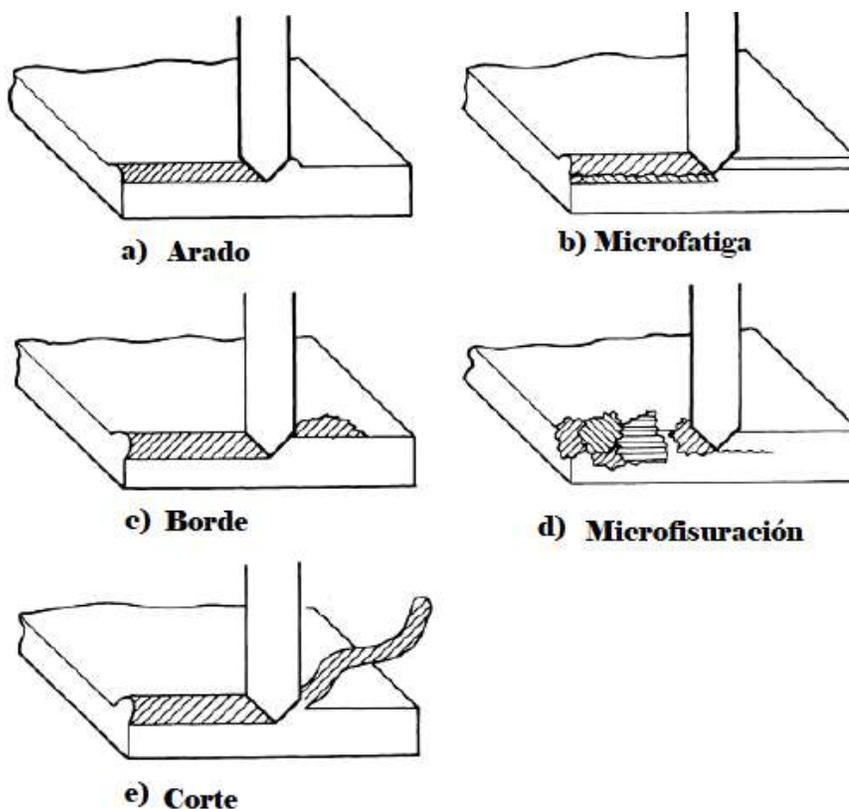
2.4.1.1.2. Según el entorno de contacto.

De acuerdo al contexto del contacto, se categoriza en dos grupos: abiertos (o libres) y cerrados (o limitados). Frecuentemente, las mediciones de pérdida en sistemas cerrados pueden parecer más elevadas en comparación con las pérdidas en sistemas abiertos. Esto podría deberse a que la mayoría de los sistemas cerrados están sujetos a cargas más intensas. (Stachowiak, 2005)

La Figura 9 exhibe varios procedimientos potenciales cuando una punta abrasiva penetra en una superficie. Estos engloban actividades como el arado, la creación de cuñas, el corte, la microfátiga y la generación de microfisuras.

Figura 9

Mecanismos de desgaste abrasivo según el contorno de contacto.



Nota. Distintos mecanismos de desgaste según el contorno de contacto que se presentan por la presencia de un abrasivo en la superficie de un material. a) Arado, b) Microfatiga, c) Borde, d) Microfisuración, e) Corte. Obtenido de (American Society for Metals, 1992)

El arado, como se muestra en la figura 9.a, implica desplazar material desde una ranura hacia los lados y se produce bajo cargas ligeras, sin causar una pérdida sustancial de material. En cambio, se origina daño en la superficie cercana debido a la acumulación de dislocaciones debido al trabajo en frío. Si esta superficie trabajada en frío posteriormente sufre araños, el trabajo adicional podría llevar a pérdidas por microfatiga (Figura 9.b).

Cuando la relación entre la resistencia al cizallamiento de la interfaz de contacto y la resistencia al cizallamiento de la masa alcanza un nivel suficientemente alto (en el rango de 0.5 a 1.0), se ha observado que una punta abrasiva puede formar un borde o cuña (Figura

9.c) en la parte frontal. En este caso, la cantidad total de material desplazado de la ranura supera al material desplazado lateralmente. Esta formación de cuña representa una forma relativamente suave de desgaste abrasivo.

La forma más intensa de desgaste en materiales dúctiles es el corte (Figura 9.e). Durante este proceso, la punta abrasiva extrae una viruta de manera similar a una máquina herramienta. Como resultado, se elimina material, pero la cantidad desplazada es pequeña en comparación con el tamaño de la ranura. Para partículas abrasivas afiladas, existe un ángulo crítico en el cual se produce una transición del arado al corte. (American Society for Metals, 1992)

2.4.2. *Desgaste adhesivo.*

El desgaste por adhesión ocurre cuando dos superficies sólidas, que en su mayoría son planas, están en contacto y experimentan un movimiento de deslizamiento, ya sea lubricadas o no. La conexión o adherencia se origina en los puntos de contacto de las irregularidades en la interfaz, y estos puntos se desplazan al deslizar, lo que puede llevar al desprendimiento de una pequeña porción de una superficie y su unión a la otra superficie. Mientras el deslizamiento persiste, los pequeños fragmentos transferidos pueden separarse de la superficie a la que se han transferido y volver a adherirse a la superficie original, o incluso formar partículas de desgaste sueltas. (Bhushan, 2013).

Según Schey, este tipo de desgaste sucede cuando la unión soldada mediante presión supera en fuerza a uno de los objetos en contacto y extrae una partícula de dicho objeto. (2002, p.113). También se denomina a esta forma de desgaste como rayado, erosión o desgaste por adhesión. Pequeñas protuberancias generan fricción debido a la interferencia mecánica al haber movimiento

entre las superficies en contacto, lo cual aumenta la resistencia al movimiento subsiguiente.(Avner, 1974).

2.4.3. *Desgaste por fatiga.*

Este mecanismo de desgaste se produce por los ciclos de carga y descarga que se repiten pueden provocar la generación de fisuras, tanto en el interior como en la superficie de los materiales. Con el tiempo, tras alcanzar un número crítico de ciclos, estas fisuras pueden llevar a la fractura de la superficie, resultando en la formación de fragmentos grandes que causan hendiduras notables. (Bhushan, 2013).

2.4.4. *Desgaste por impacto.*

En esta categoría se incluyen tres principales tipos de desgaste: la erosión, cavitación y la percusión. La erosión puede ser causada por flujos y corrientes de partículas sólidas, así como por el impacto de gotas de líquido producto de la implosión de burbujas en el fluido. Por otro lado, la percusión se origina debido a impactos repetidos entre objetos sólidos.(Bhushan, 2013)

2.4.4.1. *Erosión.*

La estructura de un material puede ser comprometida debido a la erosión generada por elevadas presiones inducidas por un líquido en movimiento. El líquido provoca un endurecimiento superficial por deformación en el metal, lo cual resulta en deformación localizada, formación de grietas y pérdida de material. (Askeland et al., 2012)

2.4.4.2. *Cavitación.*

La cavitación se describe como el proceso en el cual se forman repetidamente cavidades o burbujas en un líquido, las cuales crecen y colapsan de manera violenta. La erosión causada por cavitación ocurre cuando un sólido y un fluido están en movimiento relativo, y las burbujas generadas en el fluido se tornan inestables y colapsan contra la superficie del

sólido. Cuando estas burbujas colapsan cerca o en contacto con una superficie sólida, su colapso sucede de manera asimétrica, lo que da lugar a la formación de un pequeño chorro de líquido dirigido hacia el sólido. El material sólido absorberá la energía resultante de este impacto, manifestándose en forma de deformación elástica, deformación plástica o fractura. Los perjuicios originados por este fenómeno afectan a elementos como las hélices utilizadas en embarcaciones y las bombas centrífugas. (Bhushan, 2013)

2.4.4.3. Percusión.

El desgaste por percusión se produce por mecanismos de desgaste híbridos que combinan varios de los siguientes mecanismos: adhesivo, abrasivo, fatiga superficial y fractura. La percusión es un impacto repetitivo de un cuerpo sólido, como el que experimentan los martillos de impresión en aplicaciones electromecánicas de alta velocidad y las altas asperezas de las superficies en un cojinete de gas. En la mayoría de los usos prácticos de las máquinas, el impacto está relacionado con el movimiento deslizante; es decir la aproximación relativa de las superficies en contacto tiene componentes normales y tangenciales lo que se conoce como impacto compuesto. (Bhushan, 2013)

2.5. Recubrimientos duros.

En el manual de soldadura de la AWS, se describe la técnica de aplicar revestimientos duros en superficies, como "el proceso de depositar metal fundido sobre una superficie de metal preexistente con el propósito de lograr las dimensiones y características específicas deseadas". Estas características deseadas incluyen la capacidad para resistir situaciones abrasivas, altas temperaturas y corrosión. En términos más simples, la aplicación de revestimientos duros en superficies implica la deposición de una aleación especial sobre una parte de metal mediante varios métodos de soldadura, con el fin de crear una superficie que sea capaz de soportar la abrasión, la

temperatura, los impactos y la corrosión, ya sea de manera individual o combinada. (Horwitz, 1976)

La aplicación de estos materiales se realiza mediante técnicas de fusión durante la soldadura. Se controla la entrada de calor para evitar la fusión excesiva del material base, lo que podría diluir la capa depositada, pero cabe destacar que existe una región afectada por el calor en el proceso. Cuando se utilizan estos métodos para reconstruir engranajes, ejes, matrices y otras piezas desgastadas, se hace referencia a sobre capas de soldadura. (Schey, 2002)

2.5.1. Metales de aporte.

Los electrodos cumplen un papel fundamental en la consecución exitosa de los resultados de soldadura. Estos están compuestos por un núcleo metálico que está químicamente cubierto. El núcleo está constituido por una barra de metal con una composición química particular que varía según el tipo de metal al que se destina el proceso de soldadura. El núcleo de metal forma la base del material de aporte, que se transfiere a la pieza en forma de pequeñas gotas al ser empujado por la fuerza electromagnética generada por el arco eléctrico. Por otro lado, el revestimiento, que rodea el centro de metal, está compuesto por una mezcla con una composición química particular diseñada para cada tipo de electrodo. (Soldexa, 2015) en la Tabla 1 se muestran algunas especificaciones de los metales de aporte conforme a AWS-ASTM.

Tabla 1

Metales de aporte y sus respectivas especificaciones AWS-ASTM.

Metales de aporte.	AWS - ASTM
Soldadura por arco de acero suave con recubrimiento.	A5.1
Soldadura de hierro y acero destinados a soldadura con gas.	A5.2
Electrodos resistentes a la corrosión, con acero al cromo o cromo-níquel.	A5.4

Electrodos de acero de baja aleación para soldadura de arco.	A5.5
Electrodos fabricados con cobre y aleaciones de cobre.	A5.6
Electrodos para procesos de soldadura utilizando cobre y sus aleaciones.	A5.7
Material de aporte destinado a la soldadura fuerte.	A5.8
Electrodos sin recubrimiento hechos de acero resistente a la corrosión al cromo y cromo-níquel.	A5.9
Electrodos diseñados para aplicar recubrimientos superficiales.	A5.13
Electrodos con revestimiento formulado para unir hierro fundido.	A5.15
Electrodos sin recubrimiento utilizados en la soldadura sumergida de acero suave, junto con los fundentes correspondientes.	A5.17
Electrodos sin revestimiento compuestos por aleaciones de magnesio.	A5.19
Electrodos de acero suave con un núcleo de fundente para soldadura de arco.	A5.20

Nota. Obtenido de (American Welding Society- American Society for Testing and Materials), Subcomité de Metales de Aporte.

2.5.2. Normas AWS de electrodos para aceros de baja aleación.

De acuerdo a la Figura 10:

- La letra E hace referencia al producto: utilizado en soldadura manual por arco eléctrico.
- Los primeros 2 o 3 números de un número de 4 o 5 dígitos representan la resistencia mínima a la tracción del material, sin requerir tratamiento térmico adicional después de la soldadura:

E 70XX - Resistencia mínima de tracción de 70,000 lbs/pulg

E 110XX - Resistencia mínima de tracción de 110,000 lbs/pulg

- El último dígito, estrechamente vinculado con el penúltimo, determina el tipo de corriente eléctrica y polaridad óptimos para el rendimiento del electrodo. Asimismo, identifica el tipo de recubrimiento.
- El tercer dígito especifica las posiciones en las que el electrodo puede ser empleado.

Figura 10

Denominación de electrodos según la AWS.



Nota. Interpretación de la norma AWS para la denominación de electrodos para aceros de baja aleación. Obtenido de (Soldexa, 2015)

2.6. El acero.

El acero se compone de hierro mezclado con carbono, cuyo porcentaje puede oscilar entre 0.02% y 2.11%. Además, suele contener diversos elementos de aleación como manganeso, cromo, níquel y molibdeno. Sin embargo, es la proporción de carbono la que transforma el hierro en acero. En el mercado, se encuentran numerosas variaciones de composición de acero.

Estas mezclas de hierro y carbono, constituyen más del 90% de los metales fabricados y utilizados en nuestro planeta. El hierro se transforma en acero mediante la incorporación de pequeñas cantidades de carbono, lo cual aporta un efecto reforzante intersticial significativo. Se logra un refuerzo adicional gracias a la introducción de otros elementos de aleación y mediante un

fortalecimiento por cambio de fase, que capitaliza el comportamiento alotrópico del hierro. Los aceros abarcan un espectro que va desde aleaciones de hierro bastante simples, compuestas principalmente de carbono y manganeso, hasta mezclas mucho más intrincadas que incluyen múltiples adiciones de elementos de aleación. (Phillips, 2015)

De manera general, los aceros se pueden ser categorizados en cuatro conjuntos según su composición. (AWS, 2004)

2.6.1. Aceros simples.

Los aceros simples al carbono son mezclas Fe-C simples que incluyen pequeñas cantidades añadidas de Mn y Si. En ocasiones, se categorizan según su proporción relativa de carbono: bajo contenido de carbono (<0,2%), contenido medio de carbono (0,2-0,4%), contenido alto de carbono (0,4-1,0%) y contenido ultra alto de carbono (1,0-2,0%).

2.6.2. Aceros de baja aleación.

Los aceros con menor cantidad de adiciones de aleación pueden incorporar hasta un 8% en total, y su contenido de carbono puede ser bajo o moderado. Gran parte de estos tipos de acero son sometidos a procesos de temple y revenido para lograr una resistencia elevada.

2.6.3. Aceros de alta aleación.

Los aceros altamente aleados se emplean principalmente en situaciones de alta temperatura, donde la solidez y la capacidad de resistir la corrosión desempeñan un papel crucial. Por lo general, el cromo es el componente de aleación añadido para otorgar esta resistencia ante la corrosión. Los aceros de alta aleación que presentan un contenido de cromo del 12% o superior son clasificados como aceros inoxidables.

2.6.4. Aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA).

Los aceros de gran resistencia con bajo contenido de aleación engloban una diversidad de composiciones. Por lo general, estos aceros presentan un contenido de carbono reducido y logran su resistencia a través de métodos especiales de procesamiento, como laminado controlado, o mediante la inclusión de microaleaciones que favorecen la formación de granos pequeños y/o reacciones de precipitación.

2.6.4.1. Aceros resistentes a la abrasión.

En la industria minera y en el proceso de tratamiento de minerales, la rentabilidad y seguridad de los equipos dependen en gran medida de la resistencia al desgaste de sus componentes. Para comprender y evaluar el proceso de desgaste por abrasión, es esencial reconocer que involucra la eliminación gradual de partículas de la superficie del acero hasta que la pieza se desgasta por completo. (Mendoza, 2014)

Para seleccionar el tipo de acero adecuado, se deben considerar los siguientes factores:

- La forma en que operan las máquinas y el tipo de desgaste.
- El entorno en el que se encuentran, condiciones secas o húmedas, exposición a sustancias químicas o altas temperaturas.
- Las características físicas y el tamaño de grano del material.

2.6.4.2. Tipos de aceros antiabrasivos.

Los aceros antiabrasivos se puede categorizar en tres conjuntos: (Mendoza, 2014)

- Los aceros bonificados, que basan su capacidad de resistir la abrasión en su alta dureza.
- Los aceros al manganeso, que poseen una estructura austenítica que se endurece cuando se enfrentan a impactos intensos.

- Los aceros con recubrimientos duros, que generalmente cuentan con aplicaciones de soldadura de alta dureza en su superficie para conferir resistencia a la abrasión.

2.7. Metalurgia de la soldadura.

La metalurgia de la soldadura se enfoca en la interacción entre diferentes tipos de metales y su reacción con diversas sustancias y gases. Se analiza cómo los gases se disuelven en los metales y entre ellos, así como el efecto de las impurezas presentes. Durante el proceso de soldadura, la energía térmica presente está relacionado con la movilidad de los átomos. Cuando el metal fundido se enfría, la energía térmica de los átomos en estado líquido disminuye progresivamente, reduciendo así su movimiento. Conforme la temperatura continúa disminuyendo y el metal se enfría aún más, los átomos pierden su capacidad de movimiento y comienzan a interactuar entre sí de diversas maneras según sus propiedades. (Howard, 1992)

2.7.1. La zona de fusión.

La zona de fusión representa la región de una soldadura por fusión en la que se produce una fusión y resolidificación completa durante el proceso de soldadura. Suele ser metalográficamente distinta de la ZAC circundante y del metal base. La microestructura de la zona fundida está determinada por la composición de la aleación y las condiciones en las que se solidifica. Por ejemplo, las tasas de enfriamiento más altas resultarán en una solidificación más veloz, lo que dará lugar a una microestructura más fina en la región de fusión. En situaciones de soldadura donde el metal de aporte difiere en composición con respecto al metal base, teóricamente pueden existir tres áreas distintas. La más extensa es la conocida como Zona de Combinación que se forma a partir de una mezcla del metal de aporte con el metal base fundido. Adyacente al límite de fusión, se pueden encontrar otras dos regiones. La Zona de Metal no Afectado, está compuesta por el metal base fundido y resolidificado sin una mezcla significativa con el metal de aporte. Entre

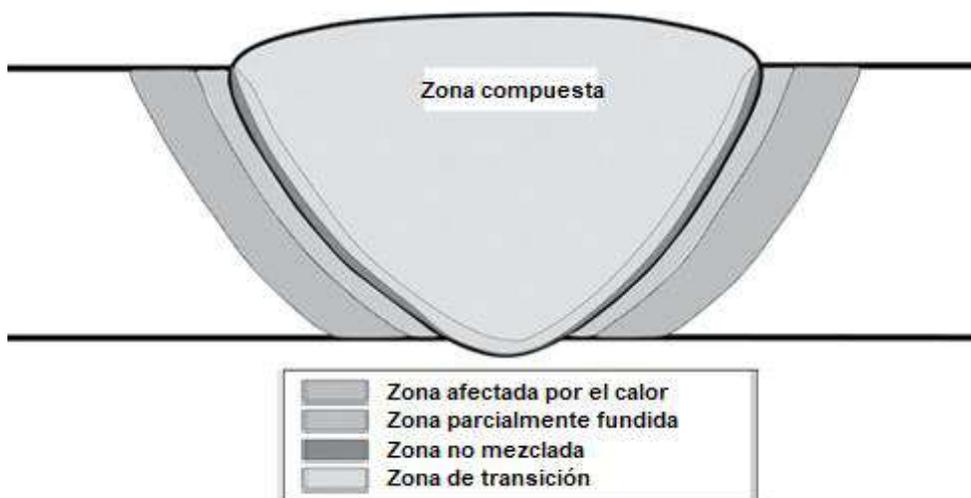
estas dos zonas se encuentra una zona de transición donde se crea un gradiente de composición desde el metal base hasta la zona de combinación. Como se menciona previamente, esta zona de transición puede ser especialmente relevante en el contexto de una soldadura de metales distintos. (Phillips, 2015)

2.7.2. Zona afectada por el calor.

Todas las reacciones metalúrgicas en la ZAC (Figura 11) se producen en fase sólida. La evolución microestructural de la ZAC puede ser bastante compleja, dependiendo de la composición de la aleación, el historial de procesamiento previo y los factores térmicos asociados al proceso de soldadura. Las temperaturas máximas, velocidades de calentamiento y enfriamiento, influirán en las reacciones de esta región, y a menudo pueden tener profundos efectos microestructurales dentro de la misma aleación o sistema de aleación.

Figura 11

Regiones de una soldadura.



Nota. Denominación de las distintas zonas que se producen durante la soldadura por fusión. Obtenido de (Phillips, 2015)

2.7.2.1. Factores que afectan la forma y tamaño de la ZAC.

2.7.2.1.1. Tipo de metal o aleación.

Algunos metales son sensibles a pequeñas variaciones de temperatura, mientras que otros presentan una mayor resistencia a estos cambios. En el caso de los metales endurecidos por deformación mecánica, la zona afectada por el calor se caracteriza por su temperatura de recristalización.(Jeffus, 2012)

2.7.2.1.2. Método de soldadura.

Existen fuentes de calor altamente concentradas, ejemplo, el proceso de soldadura por arco de plasma, que resulta en una zona afectada por el calor de unas milésimas de pulgada de ancho. En contraste, la soldadura oxiacetilénica (OFW) proporciona una fuente de calor menos intensa, lo que da como resultado una ZAC mucho más extensa.(Jeffus, 2012)

2.7.2.1.3. Masa de la pieza.

A medida que incrementa la masa del metal a ser soldada, su capacidad para absorber calor sin experimentar un cambio sustancial en la temperatura también aumenta. Elementos de soldadura de gran tamaño pueden no experimentar un aumento significativo en la temperatura, mientras que las piezas más pequeñas pueden alcanzar casi por completo la temperatura de fusión. Cuanto más calor se aplique al metal, más grande será el área afectada por ese calor. (Jeffus, 2012)

2.7.2.1.4. Pre calentamiento y post-calentamiento.

Cuando aumenta la temperatura del material base, ya sea mediante pre calentamiento o durante el proceso de soldadura, la zona influenciada por el calor se ampliará. En contraste, una placa fría puede dar lugar a una ZAC muy estrecha.(Jeffus, 2012)

2.7.2.2. Microestructuras de la ZAC en aceros.

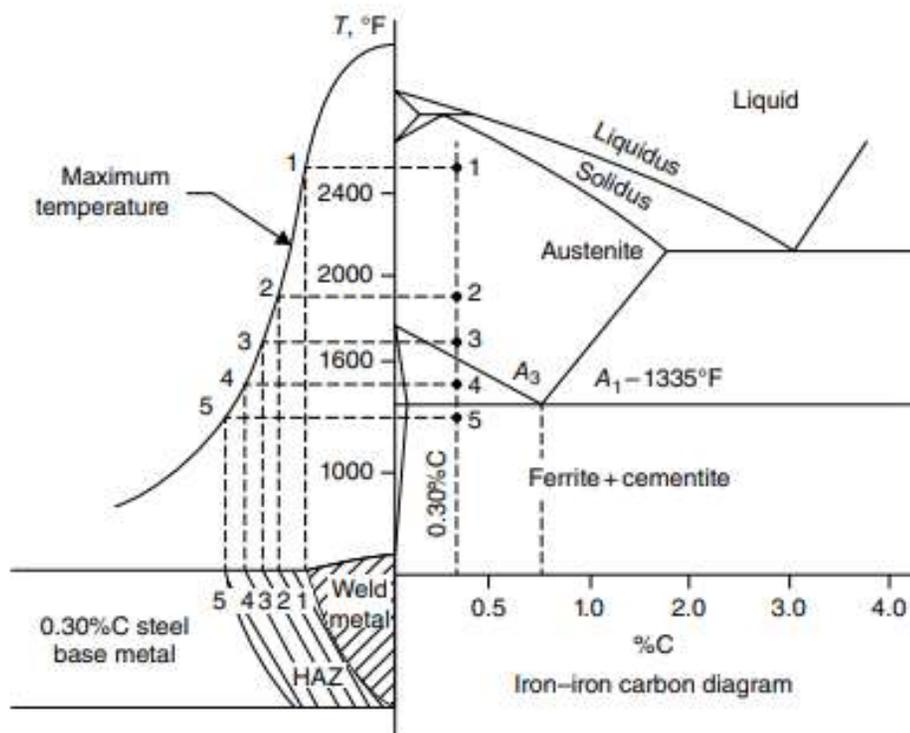
Como muestra la Figura 12, en la región 1 de la (ZAC), que es la más próxima a la zona de fusión, se experimentan temperaturas elevadas en el rango de la fase austenita del metal. En esta área, se forman tamaños de grano más grandes, lo que incrementa la posibilidad de producirse una transformación en martensita. Esto ocurre porque a medida que los granos aumentan de tamaño, la conversión de austenita a ferrita/perlita lleva más tiempo, lo que significa que hay más posibilidades de que la austenita persista cuando se alcanza la temperatura de inicio de la martensita. Por lo tanto, en la ZAC de grano grande, el punto en el diagrama CCT específico del acero que se está soldando se desplaza hacia la derecha, indicando un mayor riesgo de formación de martensita. Esta área se conoce comúnmente como la ZAC de grano grueso y generalmente es la más susceptible al agrietamiento por hidrógeno. (Phillips, 2015)

Más alejado en la ZAC, los tamaños de grano se reducen, y la región que ha experimentado recientemente temperaturas en el rango de la fase austenita (región 3) se denomina ZAC de grano fino. En la región 4 de la ZAC, encontramos una parte que ha experimentado temperaturas en el rango de la fase austenita y también ferrita. Esta parte de la ZAC puede mostrar diversas microestructuras, como una mezcla potencial de ferrita, perlita y martensita. Por ejemplo, cuando se calienta ligeramente por encima de la temperatura eutectoide, cualquier perlita presente en la microestructura del metal base comenzará a transformarse en austenita. Luego, durante el enfriamiento posterior, esta austenita puede volver a convertirse en perlita fina o en martensita (o posiblemente en bainita). Esta compleja región se conoce a menudo como ZAC intercrítica, que a veces puede experimentar una pérdida significativa de tenacidad debido a las características

microestructuras únicas de la martensita que puede formarse a partir de la parte de la microestructura que previamente se transformó en austenita. (Phillips, 2015)

Figura 12

Microestructura de la ZAC en aceros.



Nota. Variaciones habituales de las temperaturas máximas en la zona influenciada por el calor de una soldadura. Obtenido de (Phillips, 2015)

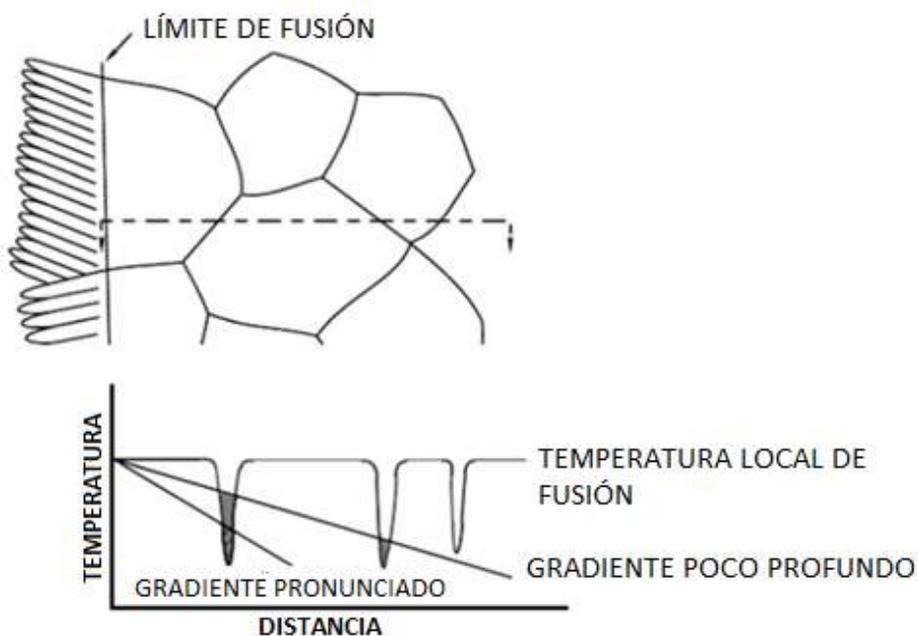
2.7.3. La zona parcialmente fundida.

La región parcialmente fundida (ver Figura 11) representa una transición entre la zona de fusión y la parte sólida de la soldadura. En muchas aleaciones comerciales, durante el procesamiento, pueden ocurrir segregaciones de elementos de aleación e impurezas en los límites de grano. Esto conduce a variaciones locales en la composición que pueden resultar en una disminución de la temperatura de fusión en esos límites de grano. Como detalla la Figura 13, si las temperaturas que representan el gradiente térmico durante la soldadura superan estas temperaturas

de fusión localizadas, se produce un fenómeno llamado licuefacción de límites de grano. La intensidad de este efecto depende de varios factores, como la pendiente del gradiente térmico y la cantidad de segregación de aleaciones e impurezas. Los procesos de soldadura que generan un mayor aporte de calor tienden a crear una zona parcialmente fundida más extensa debido a un gradiente térmico menos pronunciado. (Phillips, 2015)

Figura 13

Separación de impurezas y elementos de aleación a lo largo de los límites del grano.



Nota. La segregación de elementos de aleación e impurezas alrededor de los límites de grano puede provocar una fusión localizada. Obtenido de (Phillips, 2015)

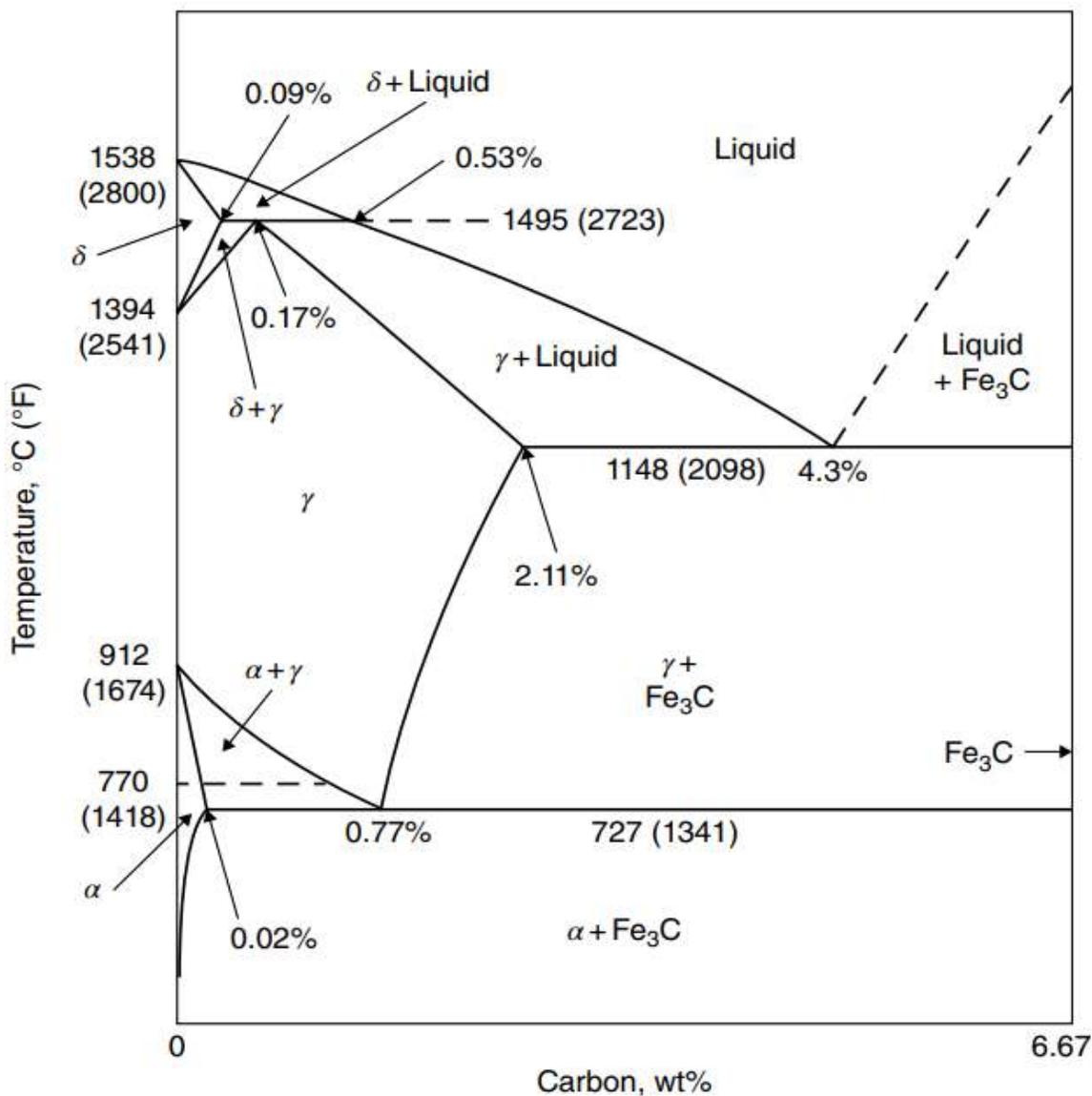
2.7.4. Diagrama hierro – carburo de hierro.

El carbono es el elemento de aleación más relevante que afecta la temperatura en la cual ocurren cambios alotrópicos del hierro. La Figura 14 ilustra la parte relevante del sistema de aleación Fe-C. Esta se encuentra entre el Fe puro y un compuesto intersticial denominado carburo de hierro (Fe_3C), con 6.67% de carbono en peso. Como resultado, a esta parte se le conoce como

diagrama de equilibrio Fe-Fe₃C. Este diagrama describe condiciones metaestables, debido a que el Fe₃C es considerada una fase metaestable. (Avner, 1974)

Figura 14

Diagrama hierro - carburo de hierro.



Nota. Extraído de (Phillips, 2015)

En la parte izquierda de este diagrama, se pueden observar las tres fases del hierro. La fase delta (δ) de ferrita de estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC). Lo que resulta crucial en la

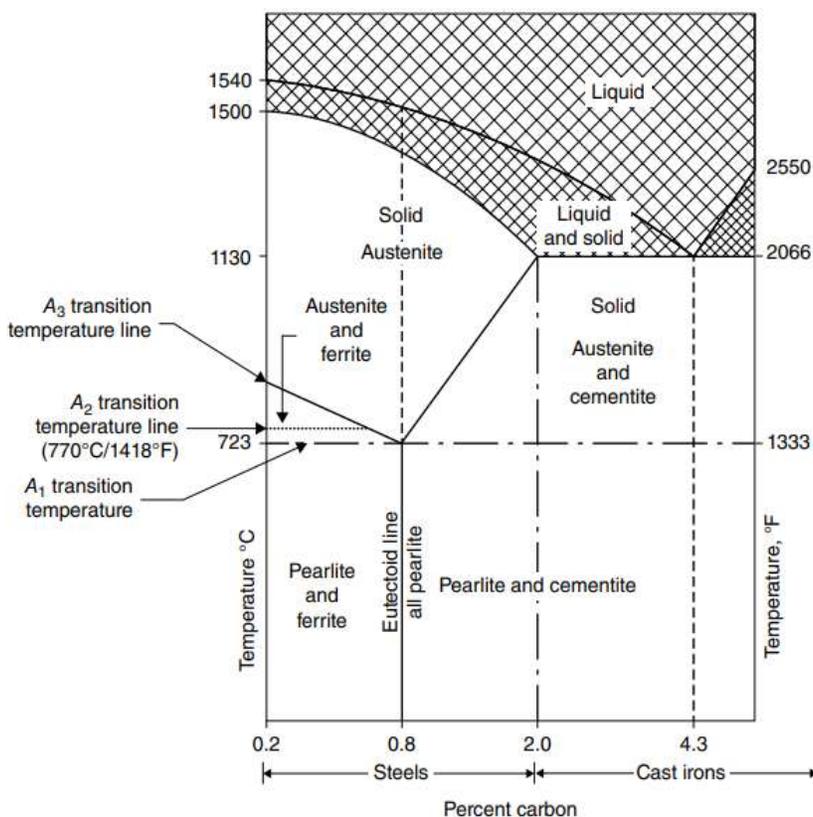
transformación de los aceros es la transición de la fase (γ) austenita de estructura cúbica centrada en la cara (FCC) a la fase alfa (α) de ferrita en estructura BCC a una temperatura inferior. El rango de presencia austenítica se extiende considerablemente hacia la derecha, lo que implica que puede disolver una cantidad significativa de carbono (hasta un 2.11%). Por otro lado, la cantidad máxima de carbono que la fase alfa que puede disolver es solo del 0.02%. Dado que prácticamente todos los aceros contienen más de un 0.02% de carbono, esto significa que, durante el enfriamiento desde la austenita en equilibrio, el carbono que excede el 0.02% superará el límite de solubilidad de la ferrita y dará lugar a la formación de cementita. (Phillips, 2015)

Según la velocidad de enfriamiento desde la austenita, la cementita puede adquirir diferentes configuraciones. Si el proceso de enfriamiento es extremadamente lento, se espera la formación de partículas de cementita de forma redondeada dispersas en una matriz de ferrita. Cuando la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente rápido como para crear condiciones de desequilibrio, suele formarse una estructura estratificada llamada perlita, la cual está compuesta por finas capas de Fe_3C y ferrita, que se generan al enfriarse a partir de la austenita. Velocidades de enfriamiento aún más elevadas desde la temperatura de austenización pueden dar lugar a transformaciones conocidas como martensita y bainita. (Phillips, 2015)

Para destacar la prevalencia de la perlita como un componente común que se desarrolla en los aceros durante el enfriamiento desde la austenita, se emplea una variación del diagrama hierro-carburo de hierro, como se muestra en la Figura 15. Este diagrama proporciona información adicional relevante en cuanto a la fabricación y soldadura de aceros. A partir de la temperatura A_3 , se inicia la formación de ferrita a partir de la austenita. Si se continúa enfriando hasta alcanzar la temperatura A_1 , toda la austenita restante se transformará en perlita. (Phillips, 2015)

Figura 15

Diagrama de hierro -carburo de hierro simplificado.



Nota. Adaptación y simplificación del diagrama hierro-carburo de hierro para destacar la prevalencia de la perlita. Extraído de (Phillips, 2015)

Para aceros con un porcentaje de carbono mayor a la composición eutectoide, durante el enfriamiento desde la austenita, la primera fase que se desarrollará será la cementita. A medida que la temperatura alcance el punto eutectoide, la austenita residual se transformará en perlita. Esto resultará en una microestructura compuesta por cementita primaria y perlita. A estos aceros con alto porcentaje de carbono se les denomina hipereutectoides.

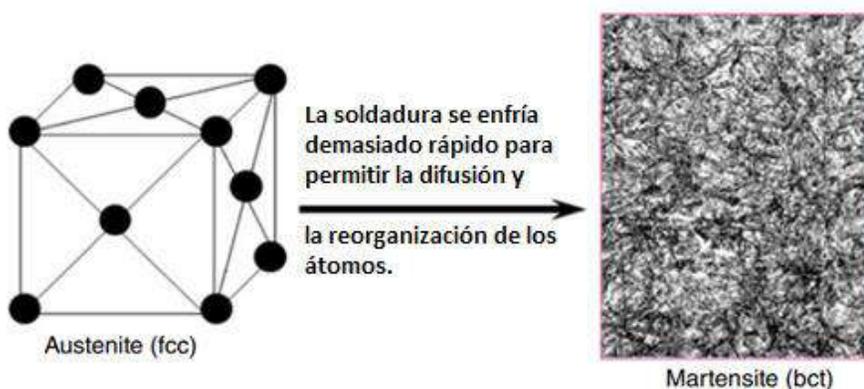
La probabilidad de que se forme perlita y ferrita en la ZAC durante la soldadura incrementa en la soldadura de aceros bajo contenido de carbono y baja aleación, especialmente en procesos de soldadura con alto aporte térmico que generan tasas de enfriamiento más lentas. En el caso de

aceros específicos, si las tasas de enfriamiento son relativamente rápidas, es posible que no haya suficiente tiempo para que los átomos de austenita se reorganicen y formen ferrita y perlita, dando lugar a la creación de una BCT (estructura tetragonal centrada en el cuerpo) (ver Figura 16), conocida como martensita, que es una estructura BCC estirada debido a un proceso de cizallamiento inducido por el exceso de carbono que alarga la estructura en una dirección determinada. (Phillips, 2015)

Otra transformación relevante que puede darse al enfriar desde la austenita es la bainita, la cual presenta una estructura delgada en forma de agujas compuestas por ferrita y cementita. Debido a que la bainita ofrece una mayor resistencia en comparación con la combinación de ferrita y perlita y, al mismo tiempo, una mayor ductilidad en comparación con la martensita, se ha vuelto una fase altamente valorada en la fabricación de numerosos aceros contemporáneos (Phillips, 2015)

Figura 16

Formación de martensita, a partir del enfriamiento rápido de la austenita.



Nota. Cuando la velocidad de enfriamiento a partir de austenita es suficientemente rápida, cabe esperar una microestructura martensítica. Extraído de (Phillips, 2015)

2.7.4.1. Diagramas de transformación en frío continuo.

Aunque el diagrama de fases hierro-carburo de hierro puede emplearse para determinar el equilibrio de fases en aceros en situaciones de enfriamiento extremadamente lento y

equilibrado, estas condiciones raramente se presentan durante la soldadura, que implica velocidades de enfriamiento considerablemente más rápidas. Como resultado, se requiere otro tipo de diagrama que considere las velocidades de enfriamiento. Estos diagramas son conocidos como diagramas de transformación de temperatura en el tiempo (TTT) y diagramas de transformación de enfriamiento continuo (CCT). Los diagramas TTT y CCT permiten anticipar las estructuras microscópicas del acero en función de la velocidad de enfriamiento desde temperaturas donde la austenita está presente. Cada uno de estos diagramas es específico para una única composición de acero. (Phillips, 2015)

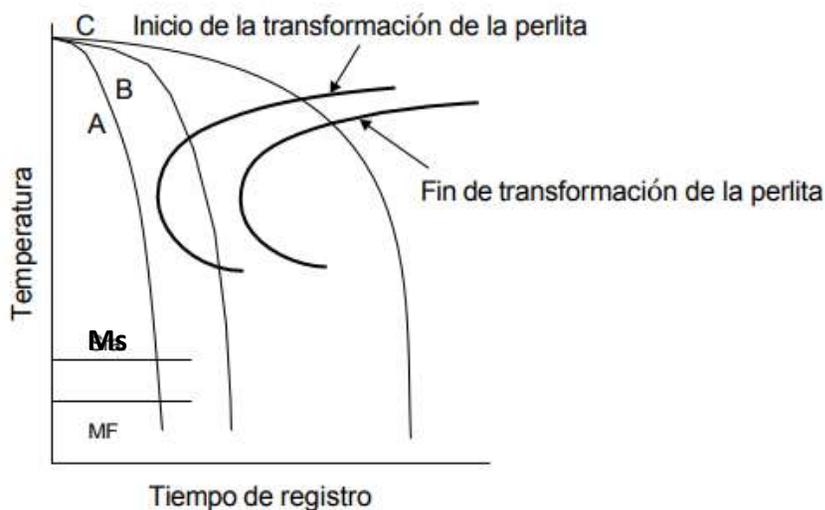
Estos diagramas comparten similitudes al ser representaciones gráficas de la temperatura frente al tiempo en escala logarítmica. La diferencia clave radica en su método de generación. Los diagramas TTT se construyen calentando el acero hasta el rango de temperaturas donde existe la fase austenita, enfriándolo rápidamente a varias temperaturas y manteniéndolo a cada una de ellas para permitir que ocurra la transformación de la austenita. Dado que se basan en procesos isotérmicos, a menudo se les conoce como diagramas de transformación isotérmica. Por otro lado, los diagramas CCT se desarrollan al permitir que el acero se enfríe continuamente desde la fase austenita a diferentes velocidades de enfriamiento. Por consiguiente, los diagramas CCT reflejan de manera más precisa las condiciones reales de la soldadura y, por lo tanto, son ampliamente utilizados para prever las microestructuras en procesos de soldadura. (Phillips, 2015)

La figura 17, representa un diagrama que incorpora diversas tasas de enfriamiento que podrían experimentarse en un proceso convencional de tratamiento térmico o durante una operación de soldadura. En este escenario, una velocidad de enfriamiento tan veloz como la que se representa en la curva "A" resultaría en la formación del 100% de martensita.

Evitar la región de la curva como se ilustra en la velocidad de enfriamiento "A" implica que toda la fase austenítica se transforma en martensita.

Figura 17

Diagrama simple de transformación tiempo-temperatura (TTT) con diferentes velocidades de enfriamiento superpuestas.



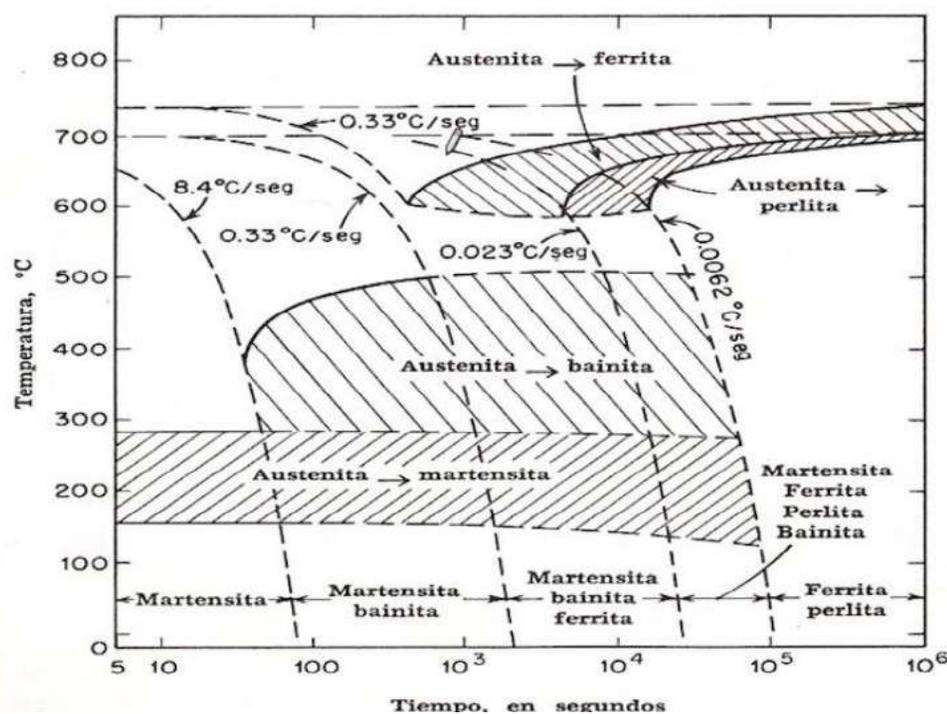
Nota. En el diagrama de transformación tiempo-temperatura, se distinguen tres curvas de enfriamiento (A, B y C). Adaptado de (Phillips, 2015)

Por su parte, el perfil de enfriamiento "B" daría como resultado una microestructura compuesta de perlita + martensita (o bainita, aunque no se refleje en este diagrama), ya que la transformación de perlita no se ha concluido completamente, lo que indica que aún subsiste algo de fase austenítica que se transformará en fase martensítica al alcanzar la temperatura de inicio de la transformación martensítica. Una velocidad de enfriamiento como la representada por "C" debería originar exclusivamente perlita, puesto que la transformación perlítica se ha completado. Es importante destacar que, tal como se mencionó previamente, los diagramas TTT y CCT siempre se basan en el proceso de enfriamiento a partir de temperaturas en el rango de fase de la austenita. Estos diagramas

no tienen la capacidad de predecir lo que ocurre durante el calentamiento, únicamente describen los cambios en el enfriamiento a partir de la fase austenítica. Por último, es crucial resaltar que la velocidad de enfriamiento en el rango de temperaturas entre 800°C y 500°C es especialmente significativa, ya que en este rango de temperaturas se suceden las transformaciones a partir de la austenita. (Phillips, 2015)

Figura 18

Diagrama CCT para un acero hipoeutectoide.



Nota: En este diagrama se ilustra la diversidad de microestructuras que pueden surgir según la velocidad de enfriamiento desde las temperaturas de la fase austenita, incluso en el caso de un acero aparentemente hipoeutectoide. Tomado de (Calderón, 2021)

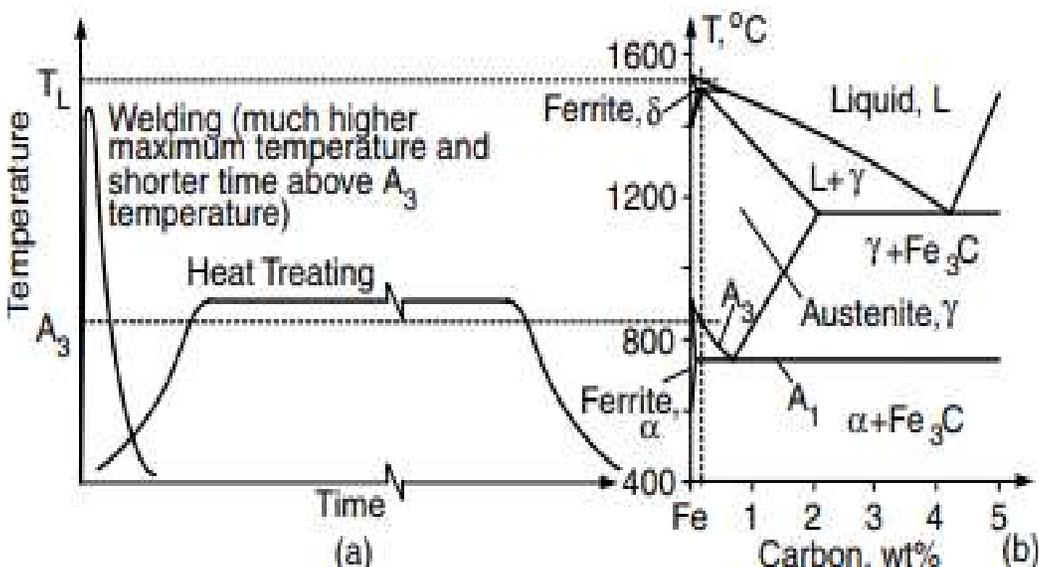
En la mayoría de las situaciones, estos diagramas suelen ser más detallados, como se puede observar en la Figura 18, un diagrama CCT de un acero hipoeutectoide. (Phillips, 2015)

Cuando se suelda a altas velocidades de calentamiento y con un tiempo breve por encima de la temperatura A_{C3} , puede generarse austenita de forma no uniforme durante el proceso de

calentamiento. Esto ocurre porque no se permite suficiente tiempo para que los átomos de carbono de la austenita migren desde las áreas ricas en carbono de la perlita previa hacia las zonas pobres en carbono de la ferrita previa. Por ello es importante diferenciar los cambios térmicos que se producen entre el proceso de soldadura y los tratamientos térmicos como se puede ver en la Figura 19; para la soldadura la velocidad de calentamiento es rápida y el tiempo de retención por encima de temperatura crítica superior A_{C3} en la soldadura es corta, pero sin embargo en los tratamientos térmicos la velocidad de calentamiento es controlada y la duración de tiempo por encima de A_{C3} es más larga. (Kou, 2002)

Figura 19

Enfriamiento del proceso soldadura y tratamiento térmico del acero.



Nota. a) Enfriamiento del proceso de soldadura, b) Diagrama de fase Fe-C. Tomada de (Kou, 2002)

Cuando se enfrían rápidamente, las primeras pueden convertirse en grupos de martensita con una concentración de carbono más alta, mientras que las segundas pueden transformarse en grupos de ferrita con una concentración de carbono más baja. Como resultado, la microdureza en la ZAC puede variar ampliamente en las soldaduras realizadas

con altas velocidades de calentamiento. Debido a las elevadas temperaturas alcanzadas durante la soldadura, es posible que ocurra un crecimiento de grano cerca del límite de fusión. Cuanto menor sea la velocidad de calentamiento, más tiempo se mantendrá la temperatura por encima de A_{c3} y, como resultado, el crecimiento de grano será más pronunciado. Sin embargo, durante el tratamiento térmico, la temperatura máxima utilizada suele ser de alrededor de 900°C para prevenir el crecimiento excesivo de grano. (Kou, 2002)

En los aceros que poseen mayores concentraciones de elementos que favorecen la formación de carburos, como V, W, Cr, Ti y Mo, la influencia de la velocidad de calentamiento se vuelve más evidente. Esto se debe a que la velocidad de difusión de estos elementos es considerablemente más lenta en comparación con la del carbono y, además, obstaculizan la difusión del carbono. Como resultado, las transiciones de fase se ven notablemente retrasadas. (Kou, 2002)

2.7.5. Soldabilidad.

La AWS (American Welding Society) define la soldabilidad como la capacidad o habilidad de un material para ser soldado en una estructura específica y apropiadamente diseñada para cumplir eficientemente con su función prevista durante su tiempo de servicio. (Horwitz, 1976)

Cuando se evalúa la capacidad de soldar cualquier tipo de acero, es esencial considerar dos aspectos fundamentales: la aptitud para la soldadura durante la fabricación y la aptitud para la soldadura en condiciones de servicio. El primero se centra principalmente en los desafíos relacionados con la aparición de fisuras durante el proceso de soldadura y el tratamiento térmico posterior, mientras que el segundo aborda posibles problemas que puedan surgir una vez que la

soldadura esté en funcionamiento, incluyendo la tenacidad de la ZAC de la soldadura y su resistencia a la corrosión.(Ship Structure Ccommittee, 1991)

2.7.5.1. Soldabilidad para la fabricación.

Los aspectos relacionados con la soldabilidad abordan cuestiones relacionadas con la formación de grietas en una soldadura, particularmente en la Zona Afectada por el Calor de grano grueso. Los dos tipos de grietas más significativas son aquellas inducidas por la presencia de hidrógeno y las que resultan del tratamiento térmico posterior a la soldadura. (Ship Structure Ccommittee, 1991)

2.7.5.2. Soldabilidad para el servicio.

La tenacidad de la ZAC es muy difícil de predecir a partir del CE, ya que la tenacidad puede verse afectada por factores de composición relativamente menores que no están incluidos en la CE. Esto es especialmente cierto en el caso de los aceros HSLA, en los que se realizan pequeñas adiciones de Nb, V, Ti, B, N, etc. para desarrollar la resistencia y la tenacidad tanto en el metal base como en la ZAC. Son deseables las restricciones del crecimiento de grano y la presencia de mayores fracciones de ferrita acicular en contraposición a los productos de transformación de baja temperatura. Sin embargo, los factores composicionales deben tenerse en cuenta para evaluar adecuadamente la tenacidad.(Ship Structure Committee, 1991)

Los factores que afectan la susceptibilidad al agrietamiento asistido por hidrógeno:

- La composición del acero y, por lo tanto, su capacidad de endurecimiento.
- La presencia de humedad (hidrógeno) durante el procedimiento de soldadura, en el revestimiento del electrodo y el ambiente circundante.
- La existencia de tensiones residuales o aplicadas.

El agrietamiento inducido por tratamientos térmicos posteriores al procedimiento de soldadura está relacionado con los procesos de precipitación que ocurren en la ZAC de grano grueso, así como con la presencia de ciertos elementos indeseados en el acero.

2.7.6. Carbono Equivalente.

El carbono equivalente es una herramienta utilizada en la soldadura, para predecir las propiedades del acero como la templabilidad, la susceptibilidad al agrietamiento por hidrogeno, del mismo modo, la resistencia del acero y la templabilidad de la ZAC. Es aplicable a los materiales ferrosos para determinar las distintas propiedades del acero si se incluyen otros elementos de aleación, además del carbono. La equivalencia del carbono es una medida de la tendencia de la soldadura a formar martensita al enfriarse y a sufrir fractura frágil.

- Cuando la CE es inferior a 0.40 no requiere precalentamiento.
- Cuando la CE esta entre 0.40 – 0.60, puede ser necesario precalentar la soldadura.
- Cuando la CE es superior a 0.60, el precalentamiento es necesario.

Valores altos de C y otros metales de aleación tienden a aumentar la dureza del acero y, por lo tanto, a disminuir la soldabilidad. Cuanto mayor es el contenido de carbono, más fácil es que el acero se endurezca; y cuanto más grueso es el material, más rápida es la velocidad de enfriamiento.

2.7.6.1. Normas de carbono equivalente.

Se han desarrollado varias fórmulas de CE, sin embargo, las dos más utilizadas son las más aceptadas por la Sociedad Americana de Soldadura (AWS), Ecuación (3) y el Instituto Internacional de Soldadura (IIW) Ecuación (4).

$$CE = \%C + \frac{\%P}{2} + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Mo}{4} + \frac{\%Cr + \%V}{5} + \frac{\%Ni}{1} \quad (3)$$

Donde:

CE: Carbono equivalente, C: Carbono, P: Fosforo, Mn: Manganeso, Mo: Molibdeno, Cr: Cromo, V: Vanadio y Ni: Níquel

$$CE_{iiw} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cu + \%Ni}{15} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} \quad (4)$$

Donde:

CE: Carbono equivalente, C: Carbono, Mn: Manganeso, Cu: Cobre. Mo: Molibdeno. Cr: Cromo y V: Vanadio.

Se han desarrollado otras fórmulas; la Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura adopto el parámetro del metal critico (P_{cm}) para el agrietamiento de la soldadura. La Ecuación (5), se utiliza generalmente para los aceros modernos.

$$P_{cm} = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5B \quad (5)$$

Donde:

P_{cm} : Parámetro crítico del metal, C: Carbono, Si: Silicio, Mn: Manganeso, Cu: Cobre, Mo: Molibdeno, Ni: Níquel, Cr: Cromo, V: Vanadio y B: Boro.

2.7.6.2. Diagrama de Graville.

Es una herramienta empleada para evaluar si es necesario la aplicación de precalentamiento o tratamientos térmicos posteriores a la soldadura, utilizando consideraciones sobre la composición química en lugar del grosor del material. Dependiendo de la ubicación de referencia del equivalente de carbono en la zona, se decide el procedimiento el método o técnica a seguir. En el diagrama de Graville, se pueden identificar tres regiones distintas en la Figura 20. (Ingemecánica, 2015)

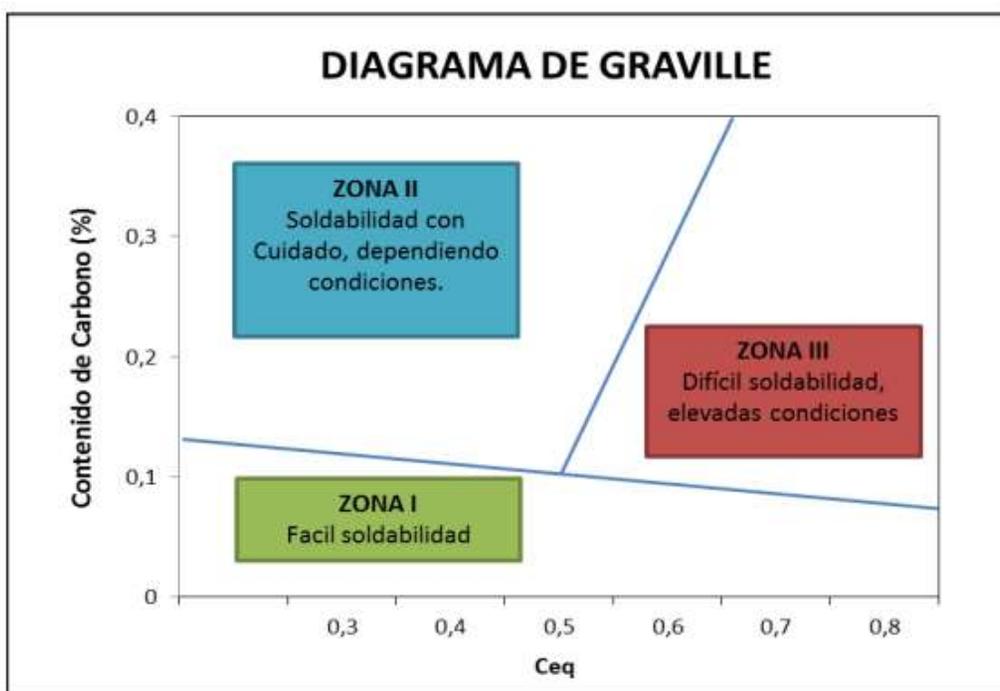
Zona I: Aceros de bajo contenido de carbono y endurecimiento bajo, no son propensos a fisuras, pero puede ocurrir si hay una alta concentración de hidrogeno.

Zona II. Aceros con mayor contenido de carbono y endurecimiento bajo. Para prevenir la aparición de fisuras en la ZAC, es posible mitigar el riesgo ajustando la velocidad de enfriamiento, regulando el calor aportado, en menor medida, aplicando un precalentamiento.

Zona III. Los aceros que contienen una alta proporción de carbono y tienen un alto grado de endurecimiento pueden generar microestructuras propensas a la aparición de fisuras en diversas condiciones de las uniones soldadas.

Figura 20

Diagrama de Graville



Nota. Tomado de (Ingemecánica, 2015)

2.7.7. Defectos metalúrgicos.

2.7.7.1. Difusión de hidrógeno.

Las grietas en frío se originan debido a la disolución del hidrógeno en el metal de soldadura y su posterior absorción en la ZAC. Estas grietas se forman considerablemente después de que el material de soldadura haya solidificado por completo. Estas grietas suelen

de soldadura haga la transición de la austenita a la ferrita y perlita antes de que la ZAC cambie de la austenita a la martensita. Esto provoca una acumulación de hidrógeno en la ferrita del metal de soldadura, lo que lleva a su difusión hacia la austenita en la ZAC cercana al límite de fusión. (Kou, 2002)

El hidrógeno tiende a difundirse mucho más rápidamente en los materiales ferríticos que en los austeníticos, y este alto coeficiente de difusión en la ferrita facilita el proceso de difusión del hidrógeno. En contraste, el coeficiente de difusión del hidrógeno en la austenita es significativamente menor, lo que desalienta la difusión del hidrógeno desde la ZAC hacia el metal base antes de que la austenita en la ZAC se transforme en martensita. Esta combinación de la presencia de hidrógeno y martensita en la ZAC crea condiciones propicias para la formación de grietas por hidrógeno. (Kou, 2002)

2.7.7.2. Grietas calientes.

Las grietas se originan cuando el metal se desgarran a lo largo de los bordes de los granos de soldadura que no han alcanzado una completa solidificación. A diferencia de las grietas causadas por la presencia de hidrógeno, estas se encuentran en el centro de la unión soldada. Durante el proceso de enfriamiento, los materiales de menor punto de fusión en el metal de soldadura son rechazados a medida que los granos se solidifican en una estructura columnar, lo que resulta en una acumulación significativa de estos materiales de bajo punto de fusión justo en el punto donde los granos se intersecan en el centro de la soldadura. Estos bordes parcialmente fundidos y frágiles se someten a tensiones a medida que el metal de soldadura se contrae, lo que provoca su ruptura. (Jeffus, 2012)

Con frecuencia, la presencia de sulfuro en el acero es la causa principal de las grietas. Esto da lugar a la formación de sulfuro de hierro, el cual tiene un punto de fusión bajo, en los

límites de los granos. Las grietas térmicas tienden a ser más propensas en aceros con un contenido elevado de carbono y fósforo, así como en aceros que presentan niveles significativos de sulfuro y bajos niveles de manganeso. (Jeffus, 2012)

2.7.7.3. Precipitación de carburo.

La presencia de cromo libre en la composición química de los aceros inoxidable se refleja en la resistencia a la corrosión que estas ofrecen. Sin embargo, cuando se añade carbono y se somete el acero a temperaturas entre 427°C y 816°C, el carbono se une al cromo, creando carburo de cromo en los límites de los granos del acero. La generación de carburos de cromo (CCr) agota el cromo libre necesario para la protección contra la corrosión. Por lo tanto, en los aceros inoxidable, se busca activamente emplear aceros de bajo contenido en carbono o grados especiales con estabilización para soldadura, con el fin de preservar su resistencia a la corrosión. (Jeffus, 2012)

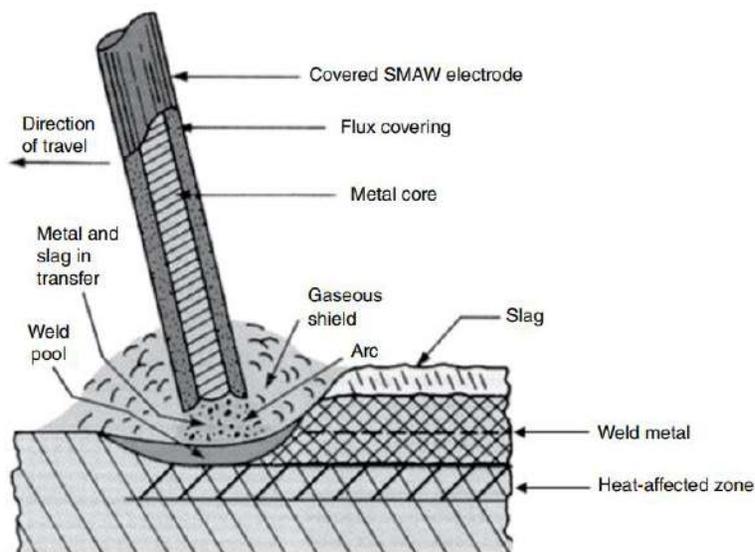
2.8. Soldadura por arco de metal protegido (SMAW).

El método de soldadura con electrodo revestido (SMAW) (Figura 22) es un procedimiento que consigue la unión de metales al inducir fusión utilizando el calor provocado a través de un arco eléctrico generado entre la punta de un electrodo recubierto y la superficie del metal base en la junta que se está soldando.(AWS, 2004)

Aunque otros métodos de soldadura por arco, como GMAW y SAW, tienen mayor productividad, el proceso SMAW destaca por su excepcional versatilidad en su aplicación tanto en talleres como en trabajos en campo. Las fuentes de energía requeridas son asequibles, portátiles y generalmente duraderas.(Phillips, 2015)

Figura 22

La soldadura por arco de metal protegido.



Nota. Representación gráfica del proceso de soldadura con electrodo revestido. Tomado de (Phillips, 2015)

Los niveles de defectos en las soldaduras realizadas con SMAW también pueden ser notoriamente elevados, incluidos aspectos como porosidad, fusión incompleta, atrapamiento de escoria y configuración deficiente del cordón. Estos defectos tienden a ser más probables en los puntos de interrupción y reinicio del proceso, lo que significa que las soldaduras con numerosas pausas y renovadas son más susceptibles a presentar imperfecciones. En la mayoría de los casos, es necesario retirar la escoria luego de completar la soldadura. (Phillips, 2015)

2.8.1. Tensión del arco.

El voltaje presente en el electrodo antes de la formación del arco se conoce como el voltaje en el circuito abierto, y su valor varía en un rango de 50 V a 80 V. Cuanto mayor sea este voltaje en el circuito abierto, más sencillo resulta crear un arco. Sin embargo, también aumenta el peligro de sufrir una descarga eléctrica. (Jeffus, 2012)

Las tensiones operativas del arco suelen ubicarse en un rango de 10 a 40 V. estas tensiones del arco están principalmente relacionadas con las longitudes del mismo. Longitudes de arco más

largas generan tensiones del arco más elevadas, mientras que arcos más cortos resultan tensiones más bajas. (Phillips, 2015)

2.8.2. *Intensidad de corriente.*

El amperaje (A) regula el tamaño del arco al indicar la cantidad total de electrones que circulan. (Jeffus, 2012)

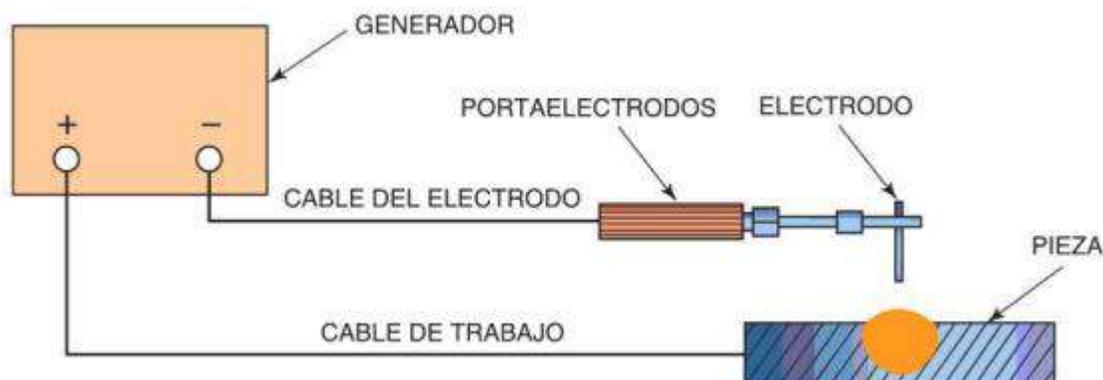
Este factor se convierte en un indicativo directo de la temperatura generada en el arco eléctrico. A medida que la corriente aumenta, también lo hace la temperatura. Si no se aplica la corriente adecuada, se termina trabajando en un rango de temperaturas inapropiado. Si la temperatura ideal no se alcanza, la apariencia de la soldadura puede ser buena, pero la penetración será insuficiente. Por otro lado, si se trabaja con una corriente excesiva, se generará una temperatura por encima de la óptima, lo que resultará en una soldadura defectuosa con presencia de porosidad, grietas y salpicaduras de metal fundido. (Rodríguez, 2001).

2.8.3. *Corrientes de la soldadura*

2.8.3.1. *Corriente continua de electrodo negativo (DCEN).*

Figura 23

Corriente continua de electrodo negativo, polaridad directa.



Nota. Tomado de (Jeffus, 2012)

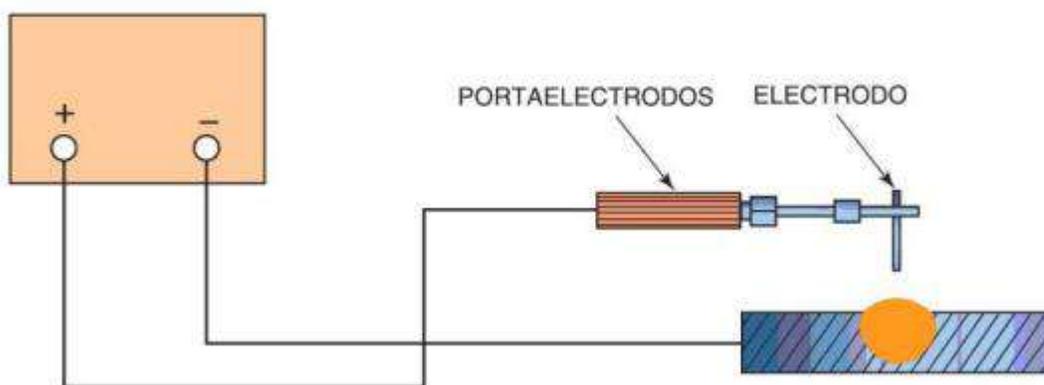
En la soldadura por arco, cuando el electrodo es negativo y la pieza de metal es positiva se denomina corriente continua de electrodo negativo (DCEN) (Figura 23). Los electrones fluyen desde el electrodo de soldadura, atraviesan el arco y llegan a la pieza. (Jeffus, 2012)

2.8.3.2. Corriente continua de electrodo positivo.

Si el electrodo es positivo con respecto a la pieza, se conoce como corriente continua de electrodo positivo (DCEP) (Figura 24). Los resultados obtenidos mediante la DCEP son de mejores características que las demás corrientes. (Jeffus, 2012)

Figura 24

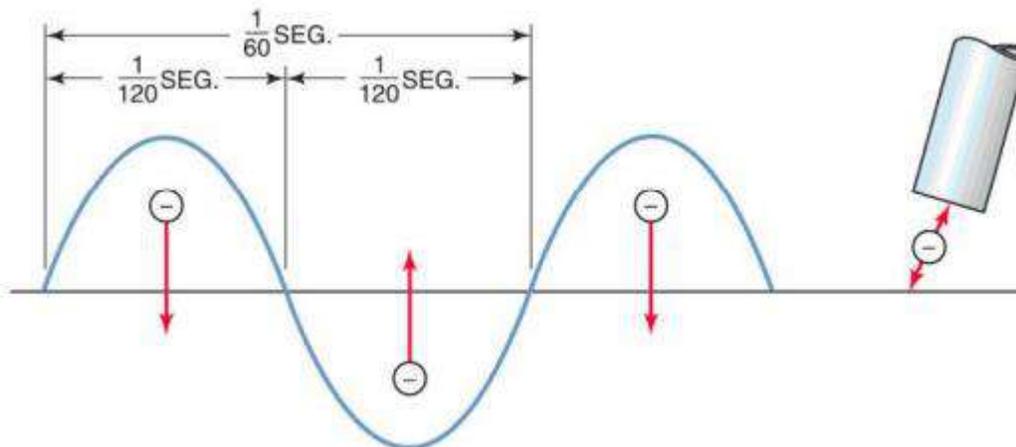
Corriente continua de electrodo positivo, polaridad inversa.



Nota. Tomado de (Jeffus, 2012)

2.8.3.3. Corriente alterna.

En un circuito de corriente alterna (Figura 25) los electrones cambian de dirección cada $1/120$ de segundo, lo que hace que el electrodo y la pieza de trabajo alternen entre ser ánodo y cátodo. Esta inversión rápida en el flujo de corriente provoca que el calor generado durante la soldadura se distribuya de manera uniforme entre la pieza y el electrodo, es decir, se divide a partes iguales entre ambos. Este calentamiento uniforme permite que el cordón de soldadura mantenga un equilibrio adecuado entre la penetración y la acumulación. (Jeffus, 2012)

Figura 25*Corriente alterna.**Nota.* Tomado de (Jeffus, 2012)**2.9. Ensayo de desgaste por abrasión ASTM G-65.**

Es un método que prueba mediante protocolos de laboratorio la capacidad de los materiales metálicos abarcan para resistir la abrasión causada por el rayado, utilizando la combinación de una rueda de caucho y arena seca. El propósito principal de este método de prueba consiste en obtener datos que posibiliten la clasificación confiable de los materiales en términos de su resistencia a la abrasión por rayado bajo condiciones claramente definidas.

De acuerdo con el procedimiento de ensayo específico definido, los resultados de las pruebas de abrasión se expresan como pérdida de volumen medida en milímetros cúbicos (mm^3). Aquellos materiales que demuestren mayor resistencia a la abrasión desarrollarán una pérdida de volumen menor. (ASTM International, 2016)

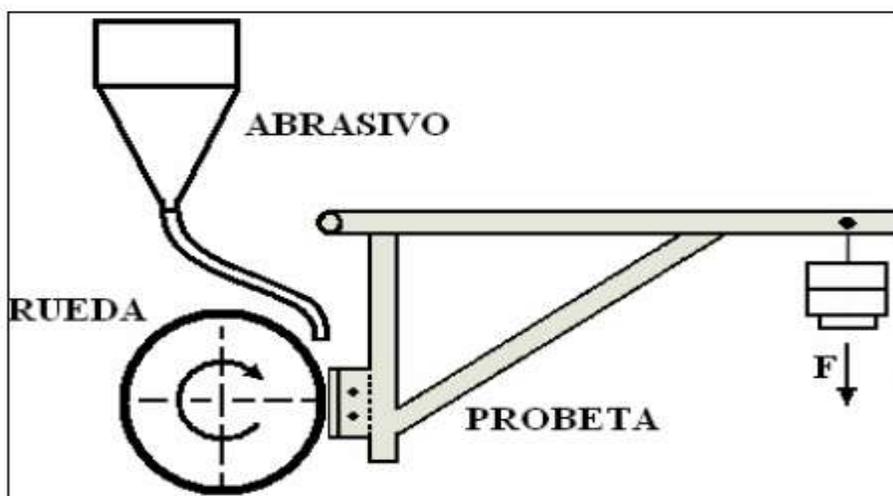
La prueba se realiza con cinco procedimientos diferentes, cada uno adecuado para niveles específicos de resistencia al desgaste o espesores del material en evaluación.

- Procedimiento A: Este test consiste en un proceso exhaustivo que categorizará los metales según su pérdida de volumen, desde una baja resistencia a la abrasión hasta una alta

resistencia. Es especialmente valioso para categorizar materiales con niveles de resistencia a la abrasión que oscilan entre moderados y altos.

Figura 26

Tribómetro de ensayo de desgaste por abrasión según norma ASTM G65.



Nota. Adaptado de ASTM G65-16 (2021).

- Procedimiento B: Se considera como una variación a corto plazo del procedimiento A. Es empleado en casos donde la resistencia a la abrasión es significativamente alta. Su utilidad se destaca principalmente en la clasificación de materiales que presentan niveles moderados o bajos de resistencia a la abrasión. Cuando la pérdida de volumen mediante el procedimiento A supera los 100 mm^3 , se pasa a utilizar el procedimiento B.
- Procedimiento C: Se emplea en revestimientos finos y se considera como una variación a corto plazo del Procedimiento A.
- Procedimiento D: Se emplea para la categorización de materiales con mínima resistencia a la abrasión y es considerada como una versión con una carga reducida en comparación con el Procedimiento A. También es empleada para clasificar materiales con índices de pérdida de volumen muy cercano a los desarrollados mediante el procedimiento A.

- Procedimiento E: Es beneficiosa para categorizar materiales que muestran resistencia a la abrasión de nivel medio a bajo y se considera como una versión de corto plazo del

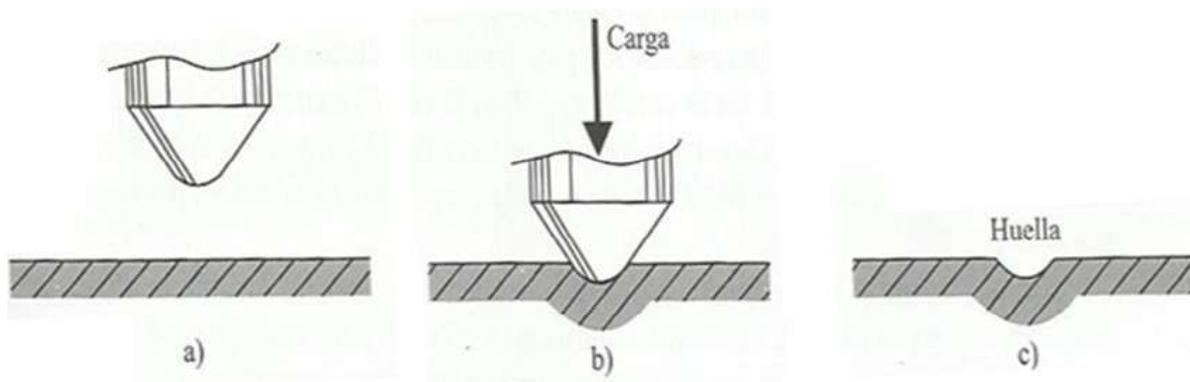
En la Figura 26, se muestra un esquema de la máquina de ensayos para determinar la abrasión según la norma ASTM G65.

2.10. Dureza

La dureza (H) refleja la capacidad o lo bien que un material puede resistir a ser deformado, lo que está vinculado con su límite elástico. Esta característica se evalúa mediante ensayos de dureza, que pueden ser de varios tipos. Uno de los enfoques cualitativos más antiguos es el ensayo de Mohs, la cual establece una escala de dureza fundamentada en la resistencia de un cuerpo a ser rayado por otro material. Aunque es útil en mineralogía, carece de aplicabilidad en materiales metálicos. En contextos industriales, se utilizan métodos cuantitativos, principalmente ensayos de penetración. Estos implican la aplicación de una carga controlada a través de un penetrador en la superficie del material, lo que resulta en una marca o huella. (Guemes & Martin, 2012)(Ver Figura 27)

Figura 27

Ensayo de dureza mediante un Penetrador



Nota. a) En un ensayo de dureza mediante penetración. b) Se aplica una carga sobre la superficie de la pieza.

c) Se analiza el tamaño de la huella. Extraído de (Guemes & Martin, 2012)

En las pruebas de dureza, se mide el tamaño dejado por la huella del penetrador con dimensiones conocidas bajo una carga específica. A partir de estos datos se determina un valor de dureza. Los materiales blandos producirán huellas más grandes y valores de dureza más bajos, mientras que los materiales duros generarán huellas pequeñas y valores de dureza más altos. Es fundamental seleccionar una carga adecuada en función de la dureza del material. (Guemes & Martin, 2012)

2.10.1. Escalas de dureza.

2.10.1.1. Método Brinell.

Se utiliza una bola como penetrador, que está hecha de metal duro (un sinterizado de carburos metálicos, principalmente de wolframio) y tiene un diámetro (D). Se evalúa el diámetro de la huella (d), que queda en la superficie después de aplicar una carga (F) y luego retirarla. La dureza Brinell (HBW) está relacionada con la carga de ensayo dividida por el área de la superficie curvada de la huella. Se asume que la huella es una porción esférica correspondiente al penetrador de la misma medida y el diámetro de esta porción es el que se mide en la superficie de la muestra. (Guemes & Martin, 2012)

Este método resulta altamente mejorado, ya que abarca una extensa gama de durezas en diversos materiales, y en ciertos casos puede presentar una formación prácticamente directa con la resistencia del material. Sin embargo, también presenta limitaciones. El ensayo solo es válido si la relación entre el diámetro de la huella y el diámetro de la esfera penetradora se encuentra entre 0.24 y 0.6 (Guemes & Martin, 2012)

2.10.1.2. Método Vickers

En este procedimiento de prueba, se ejerce una fuerza sobre la superficie del material mediante un penetrador de diamante en forma de una pirámide recta con base cuadrada y

ángulo predefinido entre sus caras opuestas. Luego, se retira la carga y se miden las longitudes de la dureza Vickers (HV) guarda proporción con la relación obtenida al dividir la carga aplicada entre el área de las caras inclinadas de la impresión, considerando que esta se asemeja a una pirámide recta con base cuadrada y el mismo ángulo en el vértice que el penetrador. (Guemes & Martin, 2012)

2.10.1.3. Método Rockwell.

En el procedimiento de ensayo Rockwell, se ejerce presión sobre la superficie de la muestra utilizando un penetrador (que puede ser un cono de diamante o una bola de acero o metal duro). Esta presión se aplica en dos etapas sucesivas: primero, se aplica una carga preliminar F_0 y luego se agrega una carga adicional F_1 que se retira posteriormente, como se muestra en la Figura 28. Luego, se mide el aumento en la profundidad de la impresión, h , debido a la aplicación de la segunda carga después de retirarla y mantener la primera. Con base en el valor de h y las dos constantes, N y S .(Guemes & Martin, 2012),

La dureza se calcula utilizando la Ecuación (6):

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (6)$$

Donde:

HR: Dureza Rockwell.

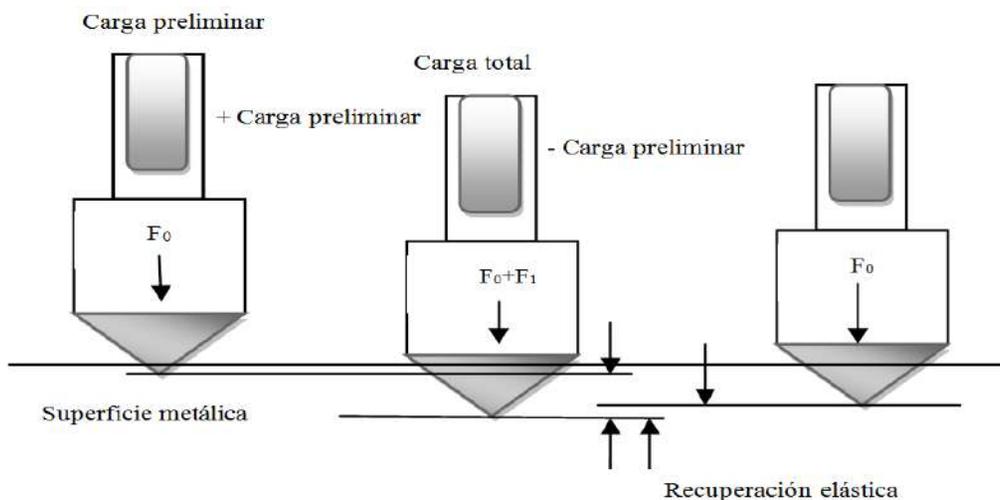
N, S : Constantes.

h : incremento de la profundidad de la huella.

La escala Rockwell C es ampliamente utilizada, al igual que la escala Rockwell B. En este caso, se coloca una carga inicial de 10 kgf y luego se añade una carga extra de 140 kgf. A modo ilustrativo, un valor de 42 HRC representa una medida de dureza Rockwell en la escala C equivalente a 42.(Guemes & Martin, 2012)

Figura 28

Ensayo de dureza Rockwell



Nota: Representación gráfica del procedimiento de ensayo de dureza Rockwell. Recuperado de (Guemes & Martin, 2012)

En las demás escalas, se añade una S o una W a la designación dependiendo de si se usa una bola de acero o metal duro como penetrador. En estas escalas, la escala Rockwell B hace uso de una bola de metal duro cuyo diámetro es 1/16 pulgada y se aplica una carga total de 100 kgf (10 kgf inicialmente y después adicionales hasta llegar a los 90kgf). Por ejemplo, si obtienes un valor de 85 HRB en la prueba, significa que el material tiene una dureza de 85 según la escala B y se utilizó un penetrador hecho de metal duro. (Guemes & Martin, 2012)

Entre las dos escalas más comúnmente empleadas en la práctica, aquella que resulta adecuada para materiales con durezas superiores a 20 HRC es la escala C. Si la dureza del material es inferior a 20 HRC, entonces se debe emplear la escala B. La elección de la escala adecuada está determinada por el análisis de la dureza del material específico. En caso de desconocerse, se presume que el material es resistente y se mide en HRC; si el

valor es menor a 20 HRC, entonces se utiliza la escala HRB para llevar a cabo la medición.(Guemes & Martin, 2012)

Tabla 2

Fórmulas para calcular la dureza Rockwell basada en la escala utilizada.

ESCALA	HR
HRA, HRC, HRD	$HR = 100 - \frac{h}{0.002}$
HRB, HRE, HRF, HRG, HRH, HRK	$HR = 130 - \frac{h}{0.002}$
HRN, HRT	$HR = 100 - \frac{h}{0.001}$

Nota: Distintas escalas para abordar diversas necesidades. Las diferencias entre estas escalas radican en el tipo de penetrador empleado, la carga total aplicada, el rango de medición aceptable y la fórmula utilizada.

Adaptado de (Guemes & Martin, 2012)

2.11. Microestructuras resistentes al desgaste.

La microestructura de un material está directamente relacionada con la resistencia al desgaste de un metal. La cual está influenciada por su composición y el ciclo térmico al que se somete.

En la Figura 29 se describen algunos recubrimientos base hierro acompañado de la composición química y su dureza aproximada.

Figura 29

Designación de recubrimientos según su microestructura

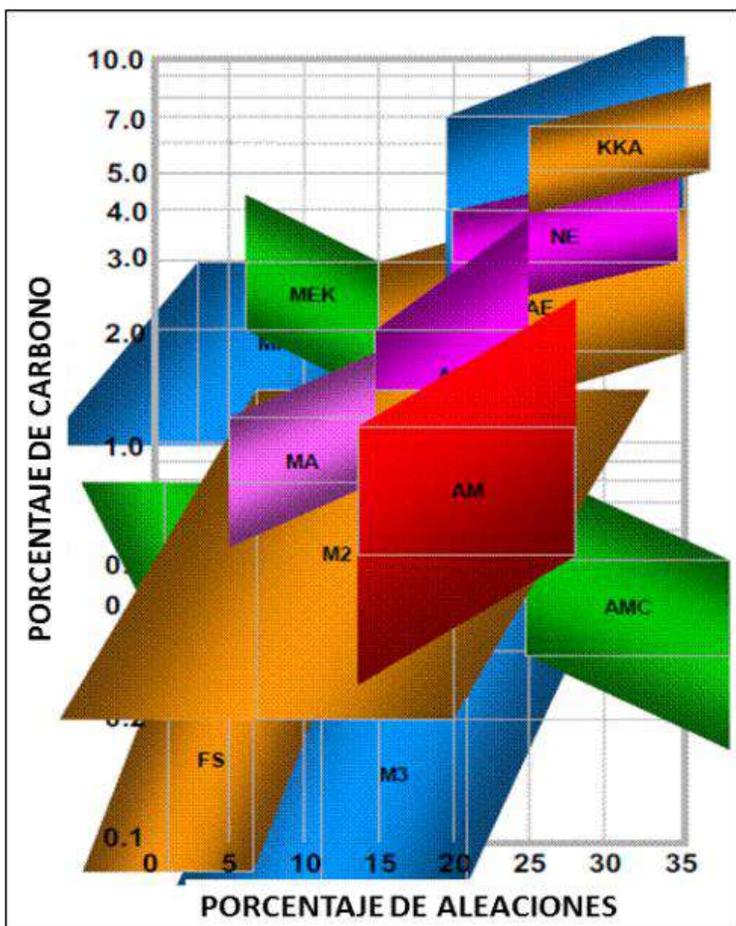
	Microestructura	Composición Química	Dureza HV
Fe-FS	Mayor presencia de ferrita con fase secundaria	• Carbono: Hasta 0.3% • E. Aleantes (%): Hasta 6%	De 200 a 400
Fe-M1	Acero martensítico de baja aleación	• Carbono: Desde 0.3% hasta 0.8% • E. Aleantes: hasta 6%	De 446 a 697
Fe-M2	Martensita con edurecimiento 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

Nota. Se muestra la directriz de microestructuras de acuerdo a la composición química y los aleantes presentes.

Asimismo, la Figura 30 predice la microestructura de acuerdo a los elementos o metales de aleación y contenido de carbono presentes en los electrodos de recubrimiento.

Figura 30

Microestructuras de recubrimientos base Fe según % de C del electrodo.



Nota. Donde FS=ferrita secundaria, M1=martensita de baja aleación, M2=martensita secundaria, M3=martensita Inoxidable, M4=martensita con envejecimiento, MA=igual cantidad de martensita y austenita, MK=martensita con carburos, MEK=martensita eutéctica con mezcla de (carburos-austenita), A=inoxidable austenítico con baja ferrita, AF=inoxidable austenítico con alta ferrita, AM=acero austenítico al manganeso y bajo contenido de cromo , AMC=acero austenítico al manganeso contenidos iguales de cromo y manganeso, AK=acero austenítico al manganeso con carburos, PAE=austenita primaria con mezcla eutéctica de (austenita-carburos), NE=mezcla eutéctica de austenita y carburos, PKE=carburos primarios con mezcla eutéctica de (austenita-carburos) y KKA=carburos de cromo con presencia de carburos y mezcla eutéctica (austenita-carburos). Recuperado de (ISO/TR 13393:2009, 2009)

2.11.1. Martensita.

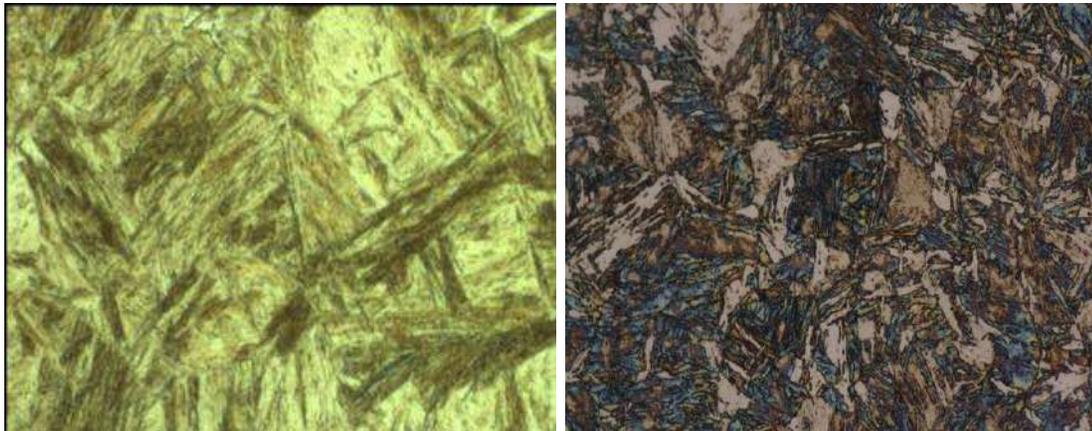
Dentro de los recubrimientos duros, la microestructura martensítica es la más común y ampliamente utilizada. Esta ofrece resistencia ante condiciones abrasivas suaves y algunos entornos abrasivos más severos. Su dureza es alta y aumenta con mayores niveles de carbono. Los recubrimientos martensíticos poseen cierta ductilidad moderada y resistencia al impacto intermedia. Resulta ventajosa para enfrentar la abrasión por rayado, una forma de desgaste de intensidad moderada. (Soldexa, 2015)

2.11.1.1. Microestructura de aceros antiabrasivos Chronit 400 y Hardox 450.

La Figura 31 muestra las microestructuras características de aceros endurecidos resistentes al desgaste con una microestructura conformada de martensita acicular obtenidos mediante el templado.

Figura 31

Microestructura de Aceros resistentes al desgaste (Martensita)



Nota: Microestructura de aceros resistentes al desgaste Chronit y Hardox 450, se observa una microestructura conformada por martensita templada. Obtenido de: (Konat, L. et al. 2021)

2.11.2. Austenita.

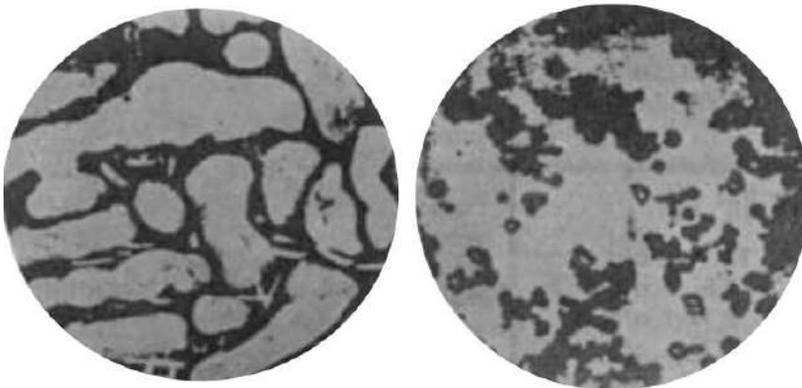
La austenita representa una fase con características suaves y flexibles que adquiere mayor dureza ante impactos durante su uso. Además, presenta notables cualidades de resistencia ante la abrasión ocasionada por el raspado. Los recubrimientos de austenita poseen un núcleo resistente y maleable que proporciona soporte a una capa externa que adquiere mayor dureza durante su aplicación. En depósitos con alto contenido de carbono que contienen carburos, la austenita desempeña un papel fundamental al conferir cierto nivel de flexibilidad. Estos recubrimientos de austenita operan como amortiguadores antes de la aplicación de las capas externas rígidas. (Soldexa, 2015)

2.11.3. Carburos.

Existen dos tipos de estructuras de carburos. La primera red que se forma es la de los carburos, resultante de una fusión rica en carbono y generada por precipitación. Aunque esta estructura forma una red continua en el metal solidificado, es muy dura y frágil, pero presenta baja resistencia al impacto.

Figura 32

Microestructura de Aceros resistentes al desgaste (Carburos)



Nota: Microestructura característica de carburos dispersos (izquierda) y carburos en red (derecha). Obtenido de: (Soldexa, 2015)

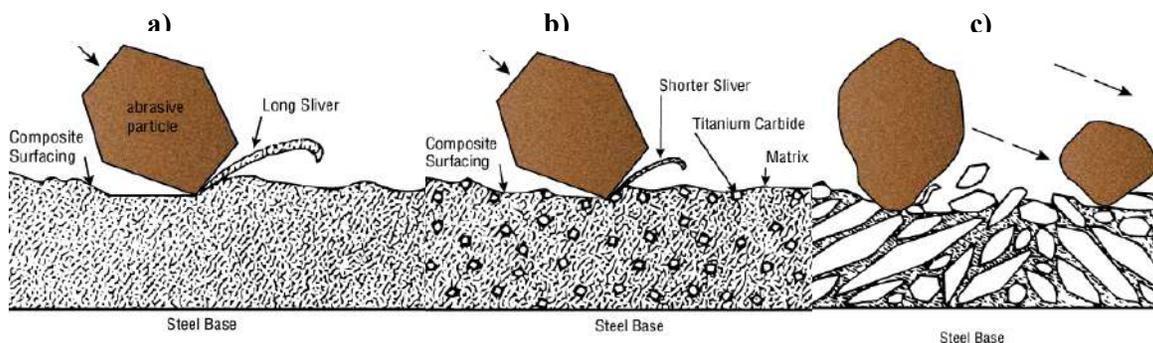
Por lo general, la fase de matriz en estos depósitos es austenítica y está rodeada por una estructura de carburos. Cuando hay carburos en forma de red presentes, se observa un aumento en la capacidad de resistir el desgaste, lo cual resulta efectivo contra la abrasión causada por un esmerilado intenso, bajo la condición de que los carburos sean más resistentes que el material abrasivo. La siguiente estructura es la de dispersión de carburos, en la cual las características del depósito de soldadura se reflejan en la distribución del carburo. El comportamiento del carburo disperso se ve influenciado por estas propiedades de la matriz. (Soldexa, 2015)

2.12. Relación de microestructura, dureza y desgaste abrasivo.

De la Figura 33 a), la aleación martensítica presenta una excelente resistencia a la abrasión con referencia al acero al carbono, las partículas abrasivas despedazan astillas del metal de tamaños considerables. b) Aumenta la resistencia al desgaste gracias a la existencia de carburos de Titanio y aun así las partículas abrasivas siguen desgarrando filamentos pequeños de metal. c) La aleación de carburos de cromo posee una mejor resistencia al desgaste por abrasión por la participación de grandes carburos en su microestructura, las partículas abrasivas degradan en menor proporción al metal. (Hobart Filler Metals Application Department, 2020)

Figura 33

Relación de dureza, microestructura y desgaste.



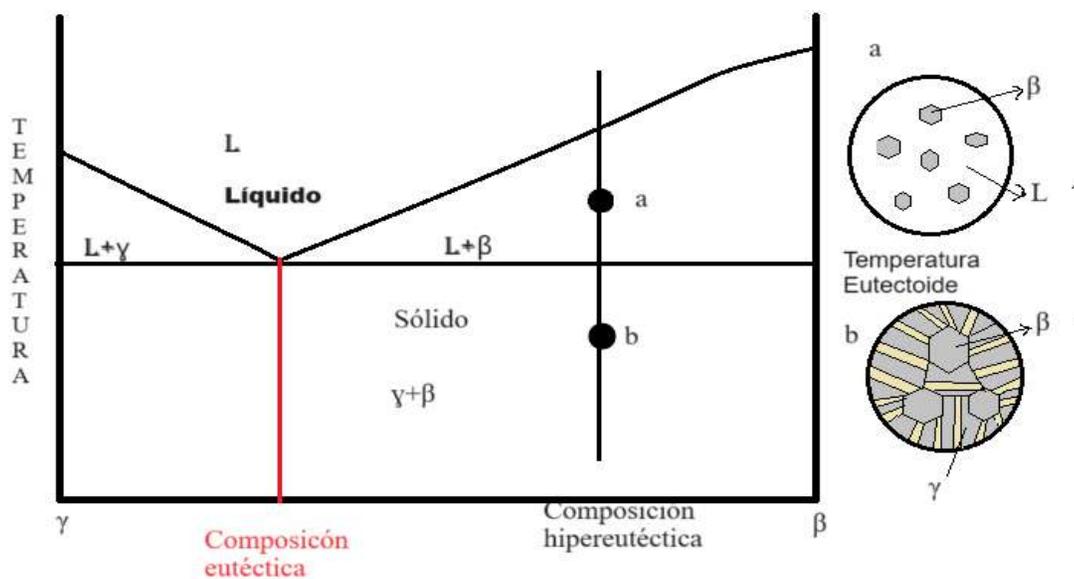
Nota. a) Aleación martensítica con dureza 58 HRC. b) Aleación de carburos de titanio con dureza de 58 HRC
c) Aleación de carburos de Cromo con dureza de 55 HRC. Obtenido de: (Hobart Filler Metals Application Department, 2020)

2.12.1. Formación y microestructura de los carburos hipereutéticos

En el diagrama metaestable de carbono-carburo de hierro, mostrada en la figura 34. El enfriamiento desde la fusión de una fundición (fase líquida 100%) genera la solidificación de β que provoca el nacimiento de los carburos proeutecticos y cierto porcentaje que aún sigue en fase líquida (L), a medida que la temperatura desciende hasta llegar por debajo del punto eutético de 1130 °C aproximadamente, el líquido remanente se transforma en una fase de $\gamma+\beta$ (100% sólido), formando una mezcla de austenita retenida, martensita y carburos. (Vidal & Hoyos, 2017), Tal microestructura es la esperada a obtener luego de un proceso de soldadura aplicando recubrimientos duros con alta resistencia al desgaste abrasivo.

Figura 34

Representación esquemática de la transformación de una soldadura a partir la fase líquida de un acero hipereutética



Nota. Adaptado de: (Phillips, 2015)

Capítulo III:

Hipótesis y Variables

3.1. Hipótesis.

3.1.1. Hipótesis general.

La resistencia al desgaste por abrasión en impulsores de bombas centrífugas artesanales elaborados en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 se incrementa significativamente con la aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 mediante el proceso SMAW.

3.1.2. Hipótesis específicas.

- **HE1:** La aplicación de los materiales de aporte OK 83.58 Plus y Citodur 1000 mejora la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.
- **HE2:** La aplicación de 2 capas de recubrimiento brinda mayor resistencia al desgaste por abrasión en comparación al recubrimiento de 1 capa en el impulsor de una bomba centrífuga artesanal.
- **HE3:** El uso de metales base Chronit T1 400 y Hardox 450 influyen positivamente en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.

3.2. Variables.

3.2.1. Identificación de variables.

3.2.1.1. Variable dependiente.

- Resistencia al desgaste abrasivo.

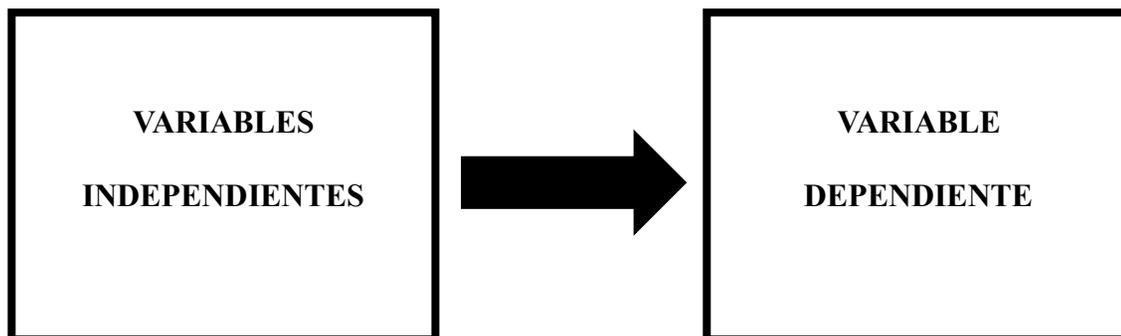
3.2.1.2. Variables independientes.

- Recubrimientos Duros (OK 83.58 Plus, Citodur1000)
- Aceros antiabrasivos (Chronit T1 400, Hardox450)

- Pases de recubrimiento (1 capa, 2 capas)

Figura 35

Identificación de variables



Nota: Adaptado de: Hernández & Mendoza (2018).

3.2.2. Operacionalización de variables.

Según Hernández & Mendoza (2018), la operacionalización de variables es el proceso de convertir un concepto teórico en términos concretos y medibles que se pueden observar y analizar en una investigación. Este proceso implica definir el concepto de manera precisa en términos operativos y elegir los indicadores y métodos de medición apropiadas para evaluar la variable.

Implica el uso de una matriz que facilita la determinación y organización de los métodos utilizados para medir y analizar las variables en un estudio y facilita la recolección de datos e interpretación de los resultados lo que contribuye a la validez y fiabilidad del estudio.

La Tabla 36, de la sección anexos especifica el contexto de esta investigación acerca la resistencia al desgaste por abrasión de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales, esta matriz permite definir las variables independientes y la variable dependiente.

Capítulo IV:

Metodología

4.1. Diseño de la Investigación.

4.1.1. Nivel de investigación.

El presente estudio es de nivel correlacional, con enfoque cuantitativo y diseño experimental. Este nivel de investigación ayuda a determinar la relación que existe entre las variables. Se inicia midiendo cada variable, las cuales se cuantifican, analizan y finalmente se establecen las vinculaciones o relaciones en base al comportamiento de las variables vinculadas. (Hernández & Mendoza, 2018). El diseño experimental permite asumir diferentes valores a cada factor o variable independiente en un experimento. Cada nivel del análisis estadístico representa una condición específica bajo la cual se investigan los efectos o respuestas de interés, con estas consideraciones se determinará la significancia y el comportamiento de la resistencia al desgaste del impulsor de bombas centrífugas artesanales.

4.1.2. Tipo de investigación.

La naturaleza de la investigación es de tipo tecnológica con enfoque cuantitativo.

Según Hernández & Mendoza (2018), este enfoque de investigación utiliza la recopilación de datos para confirmar las hipótesis mediante mediciones numéricas y análisis estadísticos, estableciendo pautas de comportamiento. Parte o inicia con una idea, una vez delimitada se plantean objetivos, y en base a la revisión de la bibliografía se elabora un marco teórico, se formulan las hipótesis e identifican las variables; estas se cuantifican según un diseño experimental y método estadístico.

4.1.3. Delimitación de la investigación.

4.1.3.1. Ubicación geográfica.

Para las consideraciones del medio abrasivo y granulometría de la grava, esta investigación toma como referencia de estudio al departamento de Madre de Dios – Perú, lugar donde los campamentos de explotación de minería aluvial aurífera se presentan en mayor proporción, por tanto, el uso de bombas centrífugas artesanales es de gran importancia para la extracción y transporte de la grava que contiene el material valioso. Los datos referenciales del derecho minero que se considerará para este estudio se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Datos del derecho minero.

Derecho Minero	RUTHGIA KENNIA		
Código único	70012103		
Área	200 ha.		
	Vértice	Este	Norte
Coordenadas del derecho minero (WGS – 84, Zona 19 L)	V1	391811	8605630
	V2	389811	8605630
	V3	389811	8606630
	V4	391811	8606630
	Distrito		Inambari
Ubicación política	Provincia		Tambopata
	Departamento		Madre de Dios

Nota: WGS-84 es un sistema geodésico de coordenadas geográficas conocido como (Sistema Geodésico Mundial 1984) se utiliza a nivel global para la ubicación precisa de cualquier punto en la superficie terrestre.

4.1.3.2. Uso de materiales.

- En cuanto al empleo de materiales metálicos, como base estructural está enfocada a ciertos tipos de aceros antiabrasivos para la fabricación de impulsores de bombas centrífugas artesanales tales como: Chronit T1 400 y Hardox 450, y como material de recubrimiento duro se utilizarán electrodos OK 83.58 y Citodur 1000.
- Este estudio se enfocó en comprender algunas propiedades como la resistencia al desgaste abrasivo, dureza y microestructura de aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 revestidos con recubrimientos duros OK 83.58 y Citodur 1000 mediante el proceso de soldadura SMAW.

4.1.3.3. Proceso de soldadura.

Se centró en la técnica de soldadura SMAW (Shielded Metal Arc Welding) como método principal para aplicar recubrimientos duros OK 83.58 plus y Citodur 1000 en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450).

4.1.3.4. Desgaste abrasivo.

Se realizaron pruebas de desgaste por abrasión utilizando un tribómetro de desgaste de arena seca y caucho rotativo según la norma ASTM G65, que simule las condiciones reales de desgaste por abrasión a los que son expuestos los impulsores de bombas centrífugas artesanales y evaluar cómo los diferentes aceros y recubrimientos duros se comportan frente al desgaste abrasivo. Esta investigación se enfocará únicamente en el fenómeno de desgaste por abrasión y no se tomará en cuenta otros tipos de desgaste como: impacto, erosión, cavitación u otros.

4.2. Población.

La población en estudio se centró en los impulsores de bombas centrífugas artesanales elaborados en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 con recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW, empleados en la extracción de gravas en la minería aluvial aurífera en el departamento de Madre de Dios.

4.3. Diseño experimental.

Para evaluar la resistencia al desgaste abrasivo, se llevó a cabo un diseño factorial completo 2^3 con dos réplicas, considerando los efectos combinados de los tipos de aceros antiabrasivos, recubrimientos duros y del número de pases de revestimiento.

- Aceros antiabrasivos: Chronit T1 400 y Hardox 450.
- Recubrimientos duros: OK 83.58 plus y Citodur 1000.
- Pases de recubrimiento: 1 capa y 2 capas.

4.4. Tamaño de la muestra.

Se realizaron dos réplicas para cada combinación de factores, obteniendo así un total de 16 muestras experimentales. Se eligió este tamaño de muestra para garantizar la confiabilidad estadística del análisis utilizando el software Minitab.

- 16 muestras o probetas para ensayo de desgaste ASTM G65 y dureza superficial HRC.

4.5. Técnicas de recolección de información.

Pruebas experimentales para ensayo de desgaste por abrasión (según la norma ASTM G65) y ensayo de dureza utilizando el durómetro de banco Leco, asimismo, reconocimiento microestructural mediante el uso del microscopio óptico Petit.

4.6. Técnica de análisis de datos.

Estadística inferencial para análisis de resultados de ensayo de desgaste ASTM G65.
 Estadística descriptiva para análisis de resultados de ensayo de dureza HRC, Análisis de imágenes metalográficas mediante observación microscópica.

Tabla 4

Programa experimental.

StdOrder	RunOrder	CenterPt	Blocks	Aceros	Electrodos	Capas
1	1	1	1	Chronit T1 400	OK 83.58	1 capa
2	2	1	1	Hardox 450	OK 83.58	1 capa
3	3	1	1	Chronit T1 400	Citodur 1000	1 capa
4	4	1	1	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa
5	5	1	1	Chronit T1 400	OK 83.58	2 capas
6	6	1	1	Hardox 450	OK 83.58	2 capas
7	7	1	1	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 capas
8	8	1	1	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas
9	9	1	1	Chronit T1 400	OK 83.58	1 capa
10	10	1	1	Hardox 450	OK 83.58	1 capa
11	11	1	1	Chronit T1 400	Citodur 1000	1 capa
12	12	1	1	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa
13	13	1	1	Chronit T1 400	OK 83.58	2 capas
14	14	1	1	Hardox 450	OK 83.58	2 capas
15	15	1	1	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 capas
16	16	1	1	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas

Nota: OK 83.58 plus (AWS A5.13), Citodur 1000 (AWS A5.13) Elaborado en Minitab

4.7. Programa experimental.

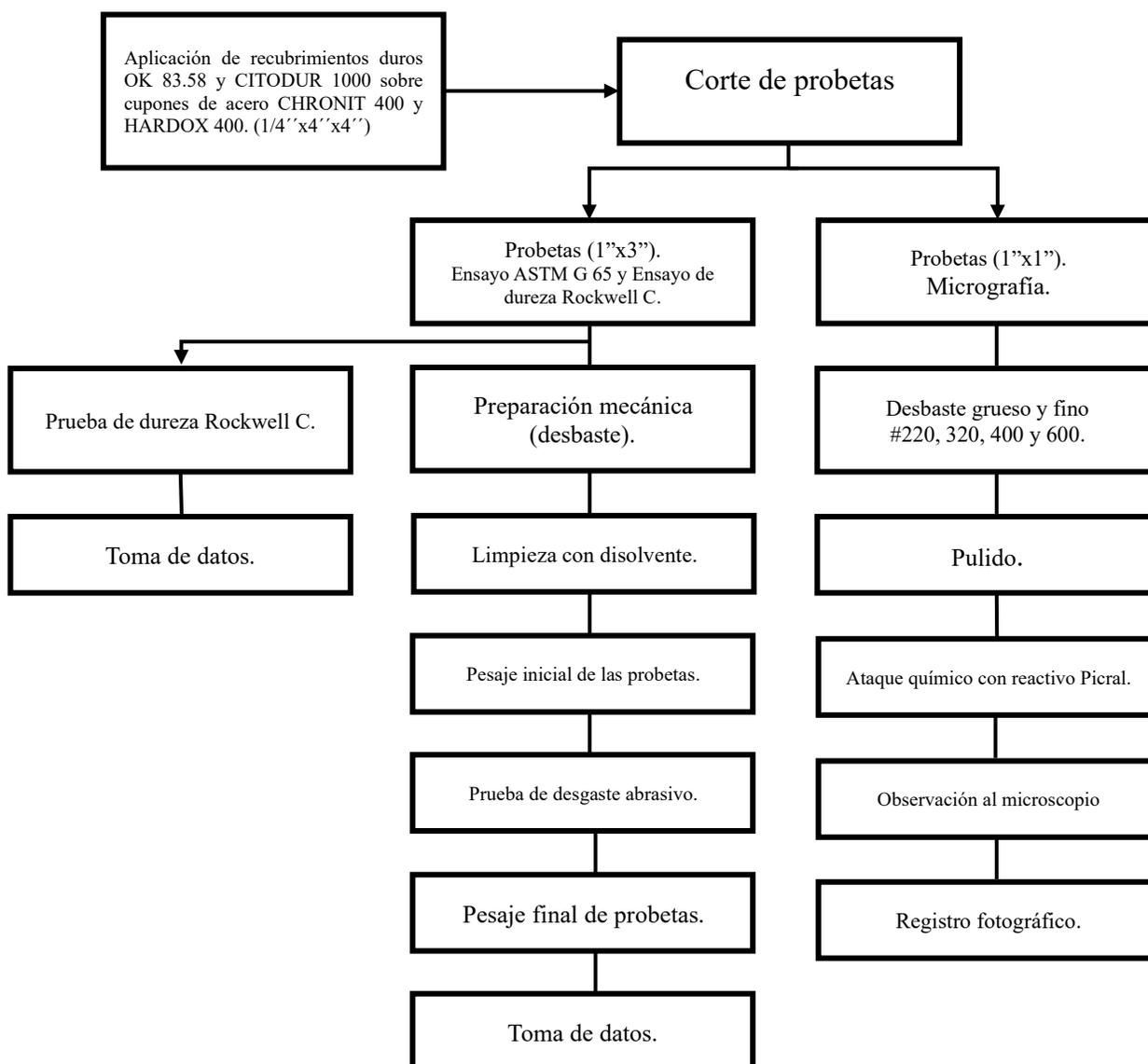
En la Tabla 4, se observa el programa experimental elaborado con el software Minitab 19 para llevar a cabo la planificación del diseño factorial completo 2^3 con dos réplicas y realizar posteriormente el análisis estadístico de los datos.

Capítulo V: Desarrollo Experimental

5.1. Procedimiento experimental.

Figura 36

Diagrama de flujo del procedimiento experimental.



Nota. Adaptado del manual de análisis metalográfico del laboratorio de materiales (PUCP) y Laboratorio de metalurgia física (UNSAAC)

5.2. Materiales utilizados en la investigación.

5.2.1. Selección del metal base y material de aporte.

5.2.1.1. Aceros Chronit T1 400, Hardox 450.

Tabla 5

Aceros Chronit T1 400, Hardox 450.

Acero antiabrasivo	Descripción	Aplicaciones	Soldadura
CHRONIT T1 400	Es un tipo de acero diseñado para resistir el desgaste, con una dureza promedio de 400 HBN, que se logra mediante el endurecimiento térmico. El acero ha demostrado ser eficaz en situaciones que demandan gran resistencia mecánica, una buena capacidad para soportar el desgaste y una soldabilidad destacada.	<ul style="list-style-type: none"> - Componentes de sistemas de desplazamiento terrestre. - Contenedores de camiones volquete. - Palas de cargadoras. - Partes de máquinas trituradoras. - Bordes de hojas de corte, entre otros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar la humedad en los electrodos, siguiendo los procesos de secado indicados por el fabricante. - Se pueden soldar espesores de hasta 20 mm sin necesidad de precalentamiento. - Para prevenir posibles fracturas en las juntas soldadas en estructuras muy rígidas, se recomienda aplicar un precalentamiento en el rango de 125 a 175 °C cuando el espesor sea superior a 20 mm. - Es importante evitar un precalentamiento por encima de los 200 °C, ya que esto podría resultar en una reducción de la dureza.
HARDOX 450	Es un tipo de acero que presenta resistencia al desgaste, caracterizado por una dureza media de 450 HBW. Este acero se utiliza con éxito en situaciones en las que se demanda una notable resistencia al desgaste y una capacidad de soldadura satisfactoria	<p>Pueden usarse en una amplia gama de estructuras y componentes que sufren deterioro o desgaste.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Componentes de maquinaria utilizada en desplazamiento sobre la tierra como: cucharas de excavadoras y palas cargadoras frontales, pinzas, cizallas, tambores de hormigón, rodillos de asfalto, trituradoras, conductos, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar la humedad en los electrodos, siguiendo las indicaciones de secado proporcionadas por el fabricante. - Para evitar agrietamiento por hidrogeno, es recomendable precalentar en el rango de 125°C a 150°C para espesores mayores a 25 mm.

Nota. Adaptado de (Mendoza, 2014)(SSAB, 2023)

5.2.1.2. Composición química del metal base.

La Tabla 6 muestra las composiciones químicas de los aceros antiabrasivos empleados, con bajo porcentaje de carbono y presencia de microaleantes.

Tabla 6

Composición química del acero Chronit T1 – 400 y Hardox450.

Acero	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo	%Ni	%Cr	%V	%Nb	%B
Chronit T1 400	0.20	0.50	1.80	0.025	0.010	0.50	0.80	1.00	0.08	0.05	0.005
Hardox 450	0.21	0.70	1.60	0.025	0.010	0.25	0.25	0.50	0.0	0.0	0.004

Nota. Adaptado de (BOHLER, 2022)(SSAB, 2023)

5.2.1.3. Propiedades mecánicas del metal base.

Los aceros antiabrasivos son aceros fabricados especialmente con propiedades mecánicas como dureza, límite de fluencia y resistencia a la tracción son los que le den una larga duración en condiciones severas de trabajo. Son adecuadas en diversas áreas dentro de la construcción y minería. Algunas propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7

Propiedades mecánicas del acero Chronit T1 400 y Chronit TI 500.

Norma técnica	Límite de fluencia (F) Kg/mm ²	de Resistencia a la tracción (R) Kg/mm ²	Elongación (A) %	Dureza
Chronit T1 400	102	132	12	400 HBN
Hardox 450	127	142.8	10	425-475 HBW

Nota. Adaptado de (BOHLER, 2022)(SSAB, 2023)

5.2.1.4. Composición química del metal de aporte.

La composición química de los metales de aporte se detalla minuciosamente en la Tabla 8, lo que destaca una notable disparidad en los porcentajes de carbono, cromo y molibdeno entre ambos electrodos mencionados. Estos electrodos han sido diseñados cuidadosamente con un enfoque especial en su idoneidad para aplicaciones de soldadura de recubrimiento, destacándose por su capacidad excepcional para resistir el desgaste por abrasión y funcionar eficazmente incluso en entornos laborales extremadamente exigentes.

Tabla 8

Composición química de los metales de aporte.

Electrodo	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Mo	%Ni	%Cr	%V	%Nb	%B
OK 83.58											
	0.6	0.60	0.7	-	-	0.50	-	6.80	-	-	-
Plus											
Citodur											
	4.0	0.60	1.1	0.020	0.020	-	-	36.0	-	-	-
1000											

Nota. Adaptado de (ESAB, 2022)

5.3. Equipos, herramientas e instrumentos utilizados en la investigación.

5.3.1. Fuente de poder.

En la Figura 37 se muestra el equipo usado para realizar el proceso de aplicación de recubrimientos duros, la cual se trata de una máquina de soldar marca MILLER XMT 304 CC/CV. En la Tabla 9 se describen algunas especificaciones de este equipo, el modelo, configuración y otros detalles relevantes para su funcionamiento eficiente en la aplicación de recubrimientos duros.

Tabla 9*Características del equipo de soldeo.*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Marca	MILLER XMT 304 CC/CV
Tensión de alimentación	400 V
Fases	3 fases
Salida máxima	10 – 35 V, 5 – 400 A.
Peso	36.1 Kg.

Nota. obtenido de

https://www.soldadorasmillermexico.com.mx/pub/media/catalog/product/cache/image/e9c3970ab036de70892d86c6d221abfe/x/m/xmt_304-903471.jpg

Figura 37*Equipo de soldeo MILLER XMT 304 CC/CV.*

Nota. Obtenido de

https://www.soldadorasmillermexico.com.mx/pub/media/catalog/product/cache/image/e9c3970ab036de70892d86c6d221abfe/x/m/xmt_304-903471.jpg

5.3.2. *Microscopio óptico.*

Figura 38

Microscopio PETIP.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el Laboratorio de Metalurgia de Física, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

Tabla 10

Características del microscopio PETIP.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Nombre	Microscopio PETIP
Alimentación	220 V, CA /50 Hz.
Aumento	100 – 1000 x
Mesa	Fija
Ajustes	Micrométrico y macrométrico con perilla.

Nota. Datos extraídos del Laboratorio de Metalurgia de Física, E.P Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

En la Figura 38 se muestra el microscopio usado para caracterización metalográfica, y la descripción de sus características en la Tabla 10.

5.3.3. Durómetro.

Figura 39

Durómetro LECO.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el Laboratorio de Metalurgia de Física, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

La Figura 39 ilustra el durómetro de marca LECO, usado para realizar los ensayos de dureza Rockwell C, y la Tabla 11 describe las características de la misma

Tabla 11*Características del durómetro LECO.*

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Marca	LECO
Alimentación	AC 200-220 V 50/60 Hz 5A
Modelo	LCR-500
Serie	LCR0893
Date	4-2018

Nota. Datos extraídos del Laboratorio de Metalurgia de Física, E.P Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC

5.3.4. *Desbastador.*

Figura 40*Desbastador.*

Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el Laboratorio de Metalurgia de Física, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

Tabla 12*Características del desbastador metalográfico.*

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Marca	METASINEX
Alimentación	220V, CA, 50 Hz.
Modelo	-
Serie	-
Diámetro de plato (mm)	240
Velocidad (rpm)	450

Nota. Adaptado de Laboratorio de Metalurgia de Física, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC.

5.3.4.1. Otras herramientas e instrumentos.

Durante y después de la aplicación de recubrimiento duro mediante soldadura, se utilizaron herramientas e instrumentos que se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13*Herramientas e instrumentos.*

HERRAMIENTA O INSTRUMENTO	DESCRIPCIÓN			
	Marca	Tamaño /Modelo	Potencia/Rango de medición	de Aplicación
Amoladora				Corte y desbaste
Pirómetro laser	TRUPER	METE-500	Salida maxima: 1mW Longitud de onda: 635 nm	Medidor de temperatura

			Tensión c.a.:600mV – 750V	Medidor de
Pinza amperimétrica	TRUPER	MUT-202	Tensión c.c.:600mV-1000 V	corriente y
			Corriente c.a.: 60A – 1000A	tensión.
Vernier digital	TRUPER	CALDI- 6MP	Apertura Max.: 6”	Medidor de longitud
Escobilla de acero	-	-	-	Limpieza de escoria
Piqueta de acero	-	-	-	Limpieza de escoria.

Nota. Adaptado de las fichas técnicas de los equipos en mención.

5.4. Procedimiento de soldadura.

5.4.1. Especificación del procedimiento de soldadura (WPS).

Un WPS (Procedimiento de Especificación de Soldadura) es un documento técnico que detalla el procedimiento específico a seguir para realizar una soldadura, incluyendo detalles como los materiales utilizados, las posiciones de soldadura, la preparación de la junta, los parámetros y método de soldadura. En la sección Anexos, se detallan los procedimientos para cada metal base y metal de aporte, con las especificaciones para proceder con la soldadura de recubrimiento. Ver Anexos.

5.4.2. Cálculo de carbono equivalente.

Parámetro del metal crítico (P_{cm}) (Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura)

$$P_{cm} = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Mn + \%Cu + \%Cr}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5B \quad (5)$$

Remplazar en la Ecuación (5).

- Acero antiabrasivo Chronit T1 400.

$$P_{cm} = 0.20 + \frac{0.50}{30} + \frac{1.80 + 0.0 + 1}{20} + \frac{0.8}{60} + \frac{0.50}{15} + \frac{0.08}{10} + 5(0.005)$$

$$P_{cm} = 0.45$$

- Acero antiabrasivo Hardox 450.

$$P_{cm} = 0.21 + \frac{0.70}{30} + \frac{1.60 + 0.0 + 0.50}{20} + \frac{0.25}{60} + \frac{0.25}{15} + \frac{\%V}{10} + 5(0.004)$$

$$P_{cm} = 0.379$$

A partir del diagrama de Graville mostrado en la Figura 21, los resultados de carbono equivalente para el acero Chronit T1 400 y Hardox 450 se ubican en la Zona II, lo que significa que la soldadura debe realizarse en condiciones controladas regulando el calor aportado y ajustando la velocidad de enfriamiento postsoldadura.

5.4.3. Preparación de probetas.

La cantidad de probetas y combinaciones para realizar las corridas se determinó en base al DOE diseño factorial completo.

$$N = n^k \quad (7)$$

Donde:

N: número de corridas o pruebas experimentales

n: número de niveles.

K: número de factores o variables.

La Tabla 14 muestra la matriz de diseño factorial completo.

Donde:

$n: 2$

$k: 3$

Los valores se remplazan en la Ecuación 7.

$$N = 2^3 = 8$$

Tabla 14

Matriz de diseño experimental.

DISEÑO FACTORIAL		
FACTOR	NIVEL (-)	NIVEL (+)
X ₁ : Aceros	Chronit T1 400	Hardox 450
X ₂ : Electroodos	OK 83.58 Plus	Citodur 1000
X ₃ : Capas	1 capa	2 Capas

Nota. Factores (X₁, X₂, X₃); Niveles: (-, +). Desarrollado con Software Minitab.

Para la aplicación de la soldadura de recubrimientos duros (OK 83.58 Plus y Citodur 1000) se utilizó 8 cupones de aceros antiabrasivos (4 cupones de aceros Chronit T1 400 y 4 cupones de aceros Hardox 450) de dimensiones 4"x4". La cantidad de cupones a utilizar según el diseño experimental se muestra en la Tabla 15, la cual detalla las combinaciones de los factores (X₁, X₂, X₃), según sus niveles (-, +) para el desarrollo experimental.

Se hizo uso del diseño factorial completo $2^3 = 8$ con dos réplicas. Con un total de 16 probetas para desarrollo experimental.

Tabla 15

Diseño experimental.

ITEM	PROBETA	FACTORES					
		X₁	X₂	X₃	ACEROS	ELECTRODOS	CAPAS
1	A	-	-	-	Chronit T1400	OK 83.58 Plus	1 Capa
2	B	+	-	-	Hardox 450	OK 83.58 Plus	1 Capa
3	C	-	+	-	Chronit T1 400	Citodur 1000	1 Capa

4	D	+	+	-	Hardox 450	Citodur 1000	1 Capa
5	E	-	-	+	Chronit T1 400	OK 83.58 Plus	2 Capas
6	F	+	-	+	Hardox 450	OK 83.58 Plus	2 Capas
7	G	-	+	+	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 Capas
8	H	+	+	+	Hardox 450	Citodur 1000	2 Capas
9	A	-	-	-	Chronit T1 400	OK 83.58 Plus	1 Capa
10	B	+	-	-	Hardox 450	OK 83.58 Plus	1 Capa
11	C	-	+	-	Chronit T1 400	Citodur 1000	1 Capa
12	D	+	+	-	Hardox 450	Citodur 1000	1 Capa
13	E	-	-	+	Chronit T1 400	OK 83.58 Plus	2 Capas
14	F	+	-	+	Hardox 450	OK 83.58 Plus	2 Capas
15	G	-	+	+	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 Capas
16	H	+	+	+	Hardox 450	Citodur 1000	2 Capas

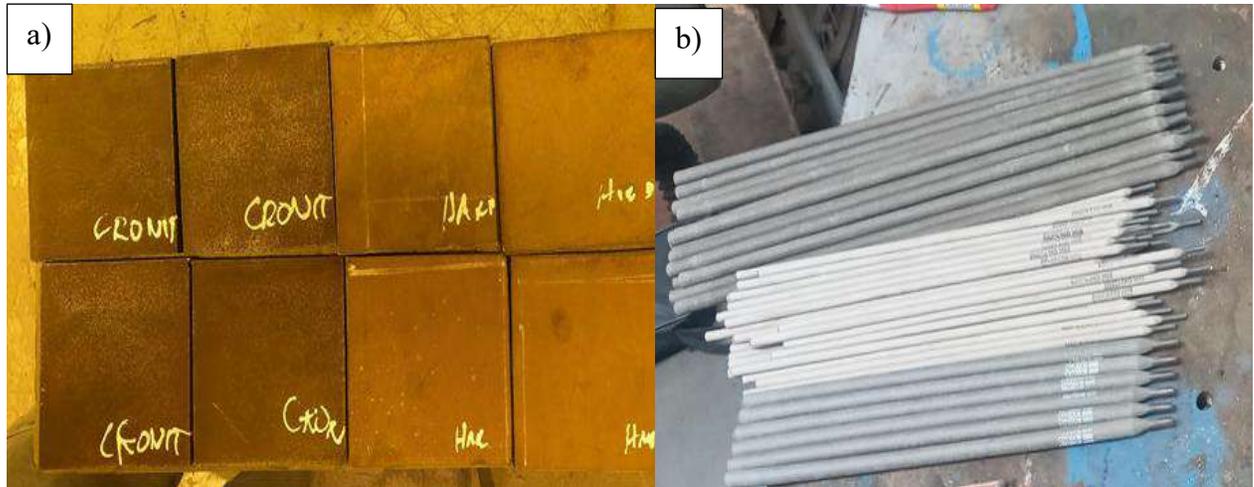
Nota. Desarrollado con software Minitab.

5.4.4. Aplicación de recubrimientos duros mediante soldadura SMAW.

Como se observa en la Figura 40, se procedió a la aplicación de los recubrimientos OK 83.58 plus y Citodur 1000 (Figura 39.b) en aceros antiabrasivos Chronit 400 y Hardox 450 (Figura 39.a) mediante el proceso de soldadura SMAW. La aplicación de recubrimientos duros fue realizada en 8 cupones de aceros antiabrasivos mediante el proceso de soldadura SMAW según las especificaciones y parámetros de la hoja WPS; tomando en cuenta las medidas y precauciones de seguridad en la soldadura. La fuente de poder utilizada fue la máquina de soldar MILLER XMT 304 CC/CV que se muestra en la Figura 37.

Figura 41

Aceros antiabrasivos Chronit 400, Hardox450 y metales de aporte OK 83.58 y Citodur 1000.



Nota. Extraído del registro fotográfico de la investigación. (2024).

Figura 42

Aplicación de recubrimientos duros mediante soldadura SMAW.

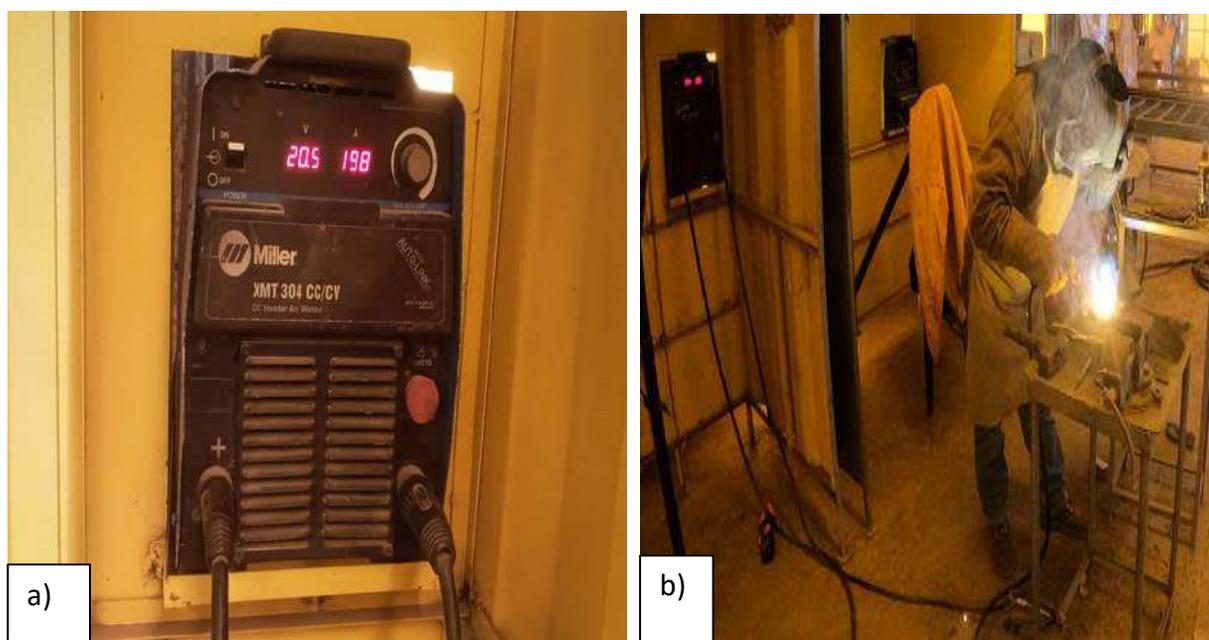


Nota. Obtenido del Registro fotográfico de la Investigación. (2024).

La Figura 43, muestra la medición del amperaje y voltaje durante el procedimiento de soldadura para controlar los parámetros establecidos en la hoja WPS. Se puede observar que los valores que se muestran en el panel de control del equipo de soldeo (MILLER XMT 304 CC/CV) son comprobados por los valores de la pinza amperimétrica (TRUPER METE-500) colocada en el electrodo de la fuente de poder.

Figura 43

Medición de Voltaje y Amperaje.



Nota. a) Panel de control del equipo de soldadura y b) Pinza amperimétrica. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024).

Para evitar y eliminar las inclusiones de impurezas en los pases de cordones durante la aplicación de los recubrimientos en los metales base, se efectúa la limpieza y eliminación de la escoria por cada pase de cordón y capa depositada en el metal. La cual garantiza una adecuada adhesión del cordón de soldadura al material base. Para lo cual se emplea herramientas manuales, piqueta y escobilla metálica como se muestra en la Figura 44.

Figura 44

Limpieza de cordones de soldadura d revestimiento entre cada pasada.

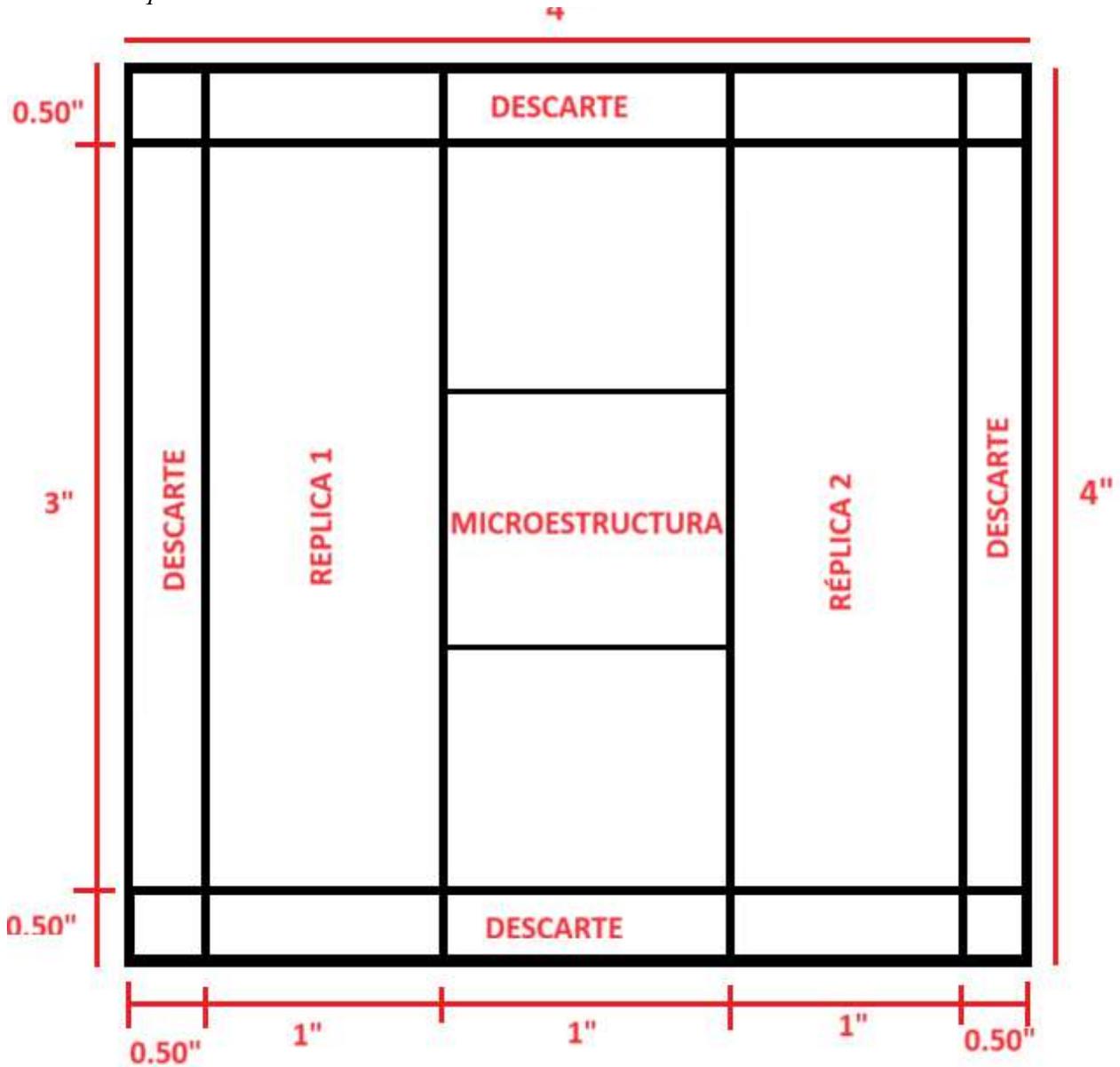


Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024).

Concluida el procedimiento de aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en cada una las superficies de los aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 mediante el proceso de soldadura SMAW, en un total de 8 cupones de aceros de dimensiones 1/4"x4"x4", como se muestra en la Figura 44 de acuerdo con las combinaciones del diseño experimental mostrado en la Tabla 16. Los cupones recubiertos fueron delimitados en la parte posterior como se muestra en la Figura 46, para su fraccionamiento de acuerdo con el esquema de cortes mostrado en la Figura 45. Por cada cupón se extraen 2 réplicas de medidas 1"x3" (16 probetas para ensayo de desgaste y dureza respetivamente) y una 1 probeta de medidas 1"x1" (8 probetas para ensayo metalográfico).

Figura 45

Esquema de cortes



Nota. Réplica 1 y Réplica 2 de medidas 1"x3" para en ensayo de desgaste ASTM G65 y ensayo de dureza Rockwell C respectivamente y probeta central de medidas 1"x1" destinado para análisis metalográfico, finalmente descartes. Fuente: elaboración propia.

Figura 46

Cupones revestidos delimitados para corte.

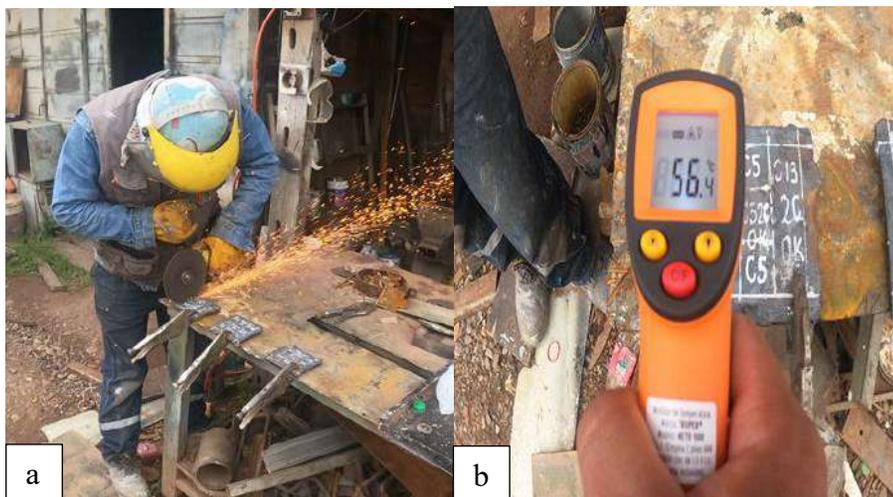


Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024).

Como se ilustra en la Figura 47.a, el fraccionamiento de los cupones se realizó mediante corte por amoladora, controlando la temperatura después de cada corte para evitar cambios microestructurales producidos por la influencia del calor originados por el corte. (Figura 47.b)

Figura 47

Corte de cupones y medición de temperatura.



Nota. a) corte de cupones con amoladora b) Medición de temperatura. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024)

Seguidamente se realizó el desbaste de las superficies recubiertas de las 16 probetas fraccionadas (ver Figura 49). Se obtuvieron 16 probetas de dimensiones 1"x3" y 8 probetas de dimensiones 1"x1", para su análisis experimental en laboratorio.

Figura 48

Desbaste de las superficies de revestimiento de las probetas.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024).

Figura 49

Probetas preparadas para análisis experimental.



Nota. Serie A: Réplica 1, Serie B: Réplica 2. Obtenido del registro fotográfico de la investigación (2024).

5.5. Ensayo de desgaste por abrasión de arena seca / rueda de goma – Norma ASTM G65 – 16(2021).

Las pruebas de ensayo abrasivo de arena seca/ rueda de goma se realizaron en el Laboratorio de Materiales, de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).

El ensayo de desgaste por abrasión se realizó con 16 probetas revestidas con recubrimientos duros, según el programa experimental que se muestra en la Tabla 6. El espesor de la probeta puede variar entre $\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ pulg. Las 16 probetas son sometidas al ensayo de desgaste previa preparación y limpieza de la superficie. Las dimensiones de las probetas son dadas según la norma ASTM G65-16(2021) y se especifican en la Tabla 16.

Tabla 16

Dimensiones de las probetas para ensayo de desgaste abrasivo.

Características	Dimensiones
Largo	3 pulg.
Ancho	1 pulg.
Espesor	$\frac{1}{4}$ – $\frac{1}{2}$ pulg.

Nota. Adaptado de la norma ASTM G65-16(2021)

5.5.1. *Parámetros del ensayo de desgaste por abrasión*

Los parámetros de operación del tribómetro de desgaste por abrasión se detallan en la Tabla 17. Se usó como referencia la Norma ASTM G65-16(2021) para determinar los parámetros de operación del equipo tribómetro de desgaste.

Tabla 17*Parámetros del ensayo de desgaste abrasivo.*

PARÁMETRO	VALOR
Tiempo de prueba	10 minutos
Diámetro de la rueda	228 mm
Ancho de la rueda	12.5 mm
Dureza de la rueda	60 Shore A
Carga de la prueba	130 N
Revoluciones de la rueda	200 rpm
Flujo de arena	325 g/min

Nota: Adaptado del informe emitido por el Laboratorio de Materiales (PUCP).

En la Figura 50 se observa el tribómetro de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65. Dentro de sus componentes se puede distinguir una rueda a base de caucho, tolva para arena seca, carga, etc.

5.5.2. Control de masa inicial y final.

- Antes de iniciar el procedimiento, se registró la masa inicial de las probetas con una precisión de 0.0001 gramos.
- Después de transcurrida el tiempo de operación de 10 minutos, se retiró la probeta para luego verificar la uniformidad de la huella y seguidamente registrar la masa final con una precisión de 0.0001 gramos.

La Figura 51 evidencia el movimiento de la rueda de caucho a 200 rpm, en contacto con la probeta, la cual esta presionada por una carga de 130 N, mientras se produce la abrasión por el flujo de arena desde la tolva a 325 g/min.

Figura 50

Equipo de desgaste por abrasión de arena seca, rueda de caucho.



Nota. Proveído por el Laboratorio de Materiales (PUCP) (2024)

Figura 51

Procedimiento de ensayo de desgaste abrasivo.



Nota: Proveído por el Laboratorio de materiales (PUCP) (2024).

En la Figura 52 se ilustran las 16 probetas sometidas a pruebas de desgaste abrasivo. Se observa las huellas de desgaste producidas por la abrasión del flujo de arena.

Figura 52

Probetas sometidas al ensayo de desgaste por abrasión ASTM G65.



Nota: Proveído por el Laboratorio de Materiales (PUCP) (2024).

5.5.3. *Determinación de la pérdida de volumen por desgaste abrasivo según norma ASTM G65*

La resistencia al desgaste se infiere a partir de la Ecuación 8, la cual determina la pérdida de volumen en función de la pérdida de masa. Se deduce que un menor valor de pérdida de volumen significa mayor resistencia al desgaste y corresponde a materiales con buena resistencia a la abrasión.

$$\text{Pérdida de volumen (mm}^3\text{)} = \frac{\text{Pérdida de masa (g)} \times 1000}{\text{Densidad } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)} \quad (8)$$

5.6. Análisis metalográfico.

El estudio metalográfico se realiza con la intención de determinar y caracterizar las fases microestructurales de los metales y su relación con la resistencia al desgaste. La preparación y análisis metalográfico de las muestras se llevaron a cabo en el laboratorio de Metalurgia Física de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica, de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

- Primer paso: Se realizó desbaste fino y grueso con lijas de # 220, 320, 400 y 600; cada una por 10 minutos, con giro de 90°. (ver Figura 53)
- Segundo paso: Después de realizada el desbaste, se continuó con el pulido, se aplicó pasta de pulir sobre la tela y se prosiguió con el procedimiento por un tiempo de 10 minutos o hasta obtener una superficie tipo espejo, como se evidencia en la Figura 54.

Figura 53

Desbaste de probetas



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Figura 54

Probetas pulidas para ataque químico



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

- Tercer paso: El ataque químico se realizó con el reactivo PICRAL (2 gr. de ácido pícrico, 3.5 ml. de ácido clorhídrico, 50 ml. de alcohol) con un tiempo de ataque de 90 segundos por cada probeta, la cual permitió identificar las microestructuras presentes en las capas de recubrimiento depositadas y el metal base. (Ver Figura 55)
- Cuarto paso: Finalmente se procedió a la observación de la metalografía obtenida mediante el uso del microscopio PETIP como se muestra en la Figura 56. Se examinaron las imágenes para determinar las microestructuras de las capas depositadas, la ZAC y metal base.

Figura 55

Ataque químico.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el laboratorio de Metalurgia Física (2024)

Figura 56

Observación de la metalografía en el microscopio PETIP.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el laboratorio de Metalurgia Física (2024)

5.7. Ensayo de dureza HRC.

El ensayo de dureza HRC (Hardness Rockwell C) se emplea para calcular la resistencia de un material o metal a la deformación permanente bajo una carga específica, siendo particularmente útil en metales y aleaciones duras. Este ensayo se llevó a cabo en el Laboratorio de Metalurgia Física – UNSAAC. Para ello se hizo uso del durómetro LECO (Figura 57).

1. Se realizó la medición de las durezas superficiales en 16 probetas de acuerdo a las combinaciones del diseño factorial.

Figura 57

Ensayo de dureza Rockwell C.



Nota. Obtenido del registro fotográfico de la investigación en el laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

2. La Figura 57 ilustra la escala de medición utilizada HRC. Se realizaron dos mediciones de dureza en la capa de recargue en distintos puntos para determinar un promedio final de dureza.

5.8. Cálculos de soldadura.

Algunos cálculos a considerar del proceso de soldadura.

5.8.1. Aporte de calor neto

Se realiza con la finalidad de calcular la cantidad de energía introducida durante el proceso de soldadura a la zona de fusión y a la ZAC. El aporte de calor neto tiene gran influencia en el control de la microestructura obtenida post-soldadura en la zona de fusión y ZAC, ya que, si la energía aportada es demasiado alta, la velocidad de enfriamiento será muy lento trayendo con ello la formación de microestructuras de grano grueso y si el calor neto aplicado es bajo la velocidad de enfriamiento será muy rápido dando como resultado una microestructura de grano fino o formación de martensitas. Para la determinación de aporte de calor neto se aplica la siguiente fórmula:

$$H_{neto}(J/mm) = \frac{V * I}{v} * f = \frac{Tension\ de\ corriente\ (V) * Intensidad\ de\ corriente\ (V)}{Velocidad\ de\ avance\ \left(\frac{mm}{s}\right)} * Eficiencia\ termica \quad (9)$$

Donde:

H_{neto} = Aporte de calor neto (J/mm)

V = Tensión de corriente (Voltios)

I = Intensidad de corriente (Amperios)

v = Velocidad de avance (mm/s)

f = Eficiencia térmica del proceso de soldadura. Para el proceso SMAW se considera una eficiencia del 75%.

Con los datos mencionados en las especificaciones del procedimiento de soldadura (WPS en la sección Anexos) se remplazan en la Ecuación 9. Para todos los casos, se emplearon los mismos valores de tensión de corriente, intensidad de corriente, velocidad de avance y eficiencia térmica, por lo que el valor de aporte de calor neto calculado es válido para todas las probetas.

- Aporte de calor de para recubrimientos con OK 83.58 plus y Citodur 1000.

$$V = 21 \text{ v}$$

$$I = 190 \text{ A}$$

$$v = 2 \text{ mm/s}$$

$$f = 0.75$$

Se reemplazan en la ecuación 9.

Con los datos mencionadas en las fichas (WPS) se calcula el aporte de calor neto.

$$H_{neto} (J/mm) = \frac{190A * 21V}{2mm/s} * 0.75 = 1496.25 J/mm$$

- Aporte de calor para pase de colchón con electrodo Nazca pro E7018.

$$V = 21 \text{ v}$$

$$I = 90 \text{ A}$$

$$v = 2 \text{ mm/s}$$

$$f = 0.75$$

Se reemplazan en la ecuación 9.

$$H_{neto} (J/mm) = \frac{90A * 21V}{2mm/s} * 0.75 = 708.75 J/mm$$

5.9. Rendimiento de una bomba centrífuga artesanal de tipo horizontal.

Los datos mencionados como potencia suministrada y velocidad de rotación han sido extraídos del motor que acciona la bomba centrífuga, y las mediciones de las longitudes de los radios y altura de la generada por la bomba fueron asumidas de acuerdo a la investigación realizada en campo.

P_m : Potencia sumistrada o nominal del motor = 144 kW.

Velocidad de rotación = 1550 rpm.

r_i : radio del impulsor de la bomba = 5 pulg.

r : radio de la tubería de succión = 4 pulg.

H : Altura generada por la bomba = 150 m

5.9.1. Eficiencia de una bomba.

$$\eta = \frac{P_h}{P_m} = \frac{Q * H * \rho * g}{P_m} \quad (1)$$

P_h : Potencia hidráulica.

P_m : Potencia suministrada.

Q : Caudal

H : Altura

ρ : Densidad de pulpa

g : Gravedad

Para determinar la potencia hidráulica, se determinó el caudal con los datos proporcionados por el motor que acciona la bomba.

$$Q = A * v_t \quad (10)$$

A : Área de la sección transversal de la tubería de succión.

v_t = Velocidad fluido

$$v_t = \omega * r \quad (11)$$

ω = Velocidad Angular

r = radio del impulsor de la bomba

- Convertir la velocidad de rotación (rpm) a radianes por segundo (rad/seg.)

$$\omega = 2\pi * \frac{RPM}{60}$$

$$\omega = 2\pi * \frac{1500}{60}$$

$$\omega = 157.08 \frac{\text{rad.}}{\text{seg.}}$$

- Determinación de la velocidad del fluido v_t , reemplazando los datos en la ecuación 11.

$$v_t = \omega * r_i$$

$$v_t = 157.08 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} * 5 \text{ pulg.}$$

$$v_t = 785.4 \frac{\text{pulg.}}{\text{seg.}}$$

- Determinación del caudal Q del flujo de pulpa, reemplazando los datos en la ecuación 10.

$$Q = A * v_t$$

$$Q = \pi * r^2 * v_t$$

$$Q = \pi * (4 \text{ pulg.})^2 * 785.4 \frac{\text{pulg.}}{\text{seg.}}$$

$$Q = 39,478.50 \frac{\text{pulg.}^3}{\text{seg.}} \left(\frac{2.54 \text{ cm}}{1 \text{ pulg.}} \right)^3$$

$$Q = 646,936.86 \frac{\text{cm}^3}{\text{seg.}} \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} \right)^3$$

$$Q = 0.64 \frac{\text{m}^3}{\text{seg.}}$$

- Determinación la densidad de pulpa (ρ), los datos extraídos se reemplazan en la ecuación 12.

$$C_w: \text{Porcentaje de solidos en peso} = 0.5 \%$$

$$\rho_{\text{sólido}}: \text{Densidad del sólido} = 2900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{líquido}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\rho_{\text{pulpa}} = (C_w * \rho_{\text{sólido}}) + ((1 - C_w) * \rho_{\text{líquido}}) \quad (12)$$

$$\rho_{pulpa} = (0.005 * 2900) + ((1 - 0.005) * 1000)$$

$$\rho_{pulpa} = 1009.5 \frac{kg}{m^3}$$

- Para la determinación de la eficiencia o rendimiento, los datos obtenidos han sido reemplazados en la ecuación 1.

$$n = \frac{Q * H * \rho * g}{P_m}$$

$$n = \frac{0.64 \frac{m^3}{seg.} * 15 m * 1009.5 \frac{kg}{m^3} * 9.8 \frac{m}{seg^2}}{144 kW}$$

$$n = \frac{96,003.16 W}{144000 W}$$

$$n = 0.66$$

n = 66 % de eficiencia o rendimiento de la bomba.

Capítulo VI: Resultados y Discusión

6.1. Resultados de las pruebas de desgaste por abrasión de arena seca según la norma ASTM G65-16.

Los resultados obtenidos de las pruebas de desgaste abrasivo, bajo la norma ASTM G65-16, se muestran en la Tabla 18. La cual muestra cuantitativamente los datos de la masa inicial(g), masa final (g), pérdida de masa (g) y pérdida de volumen (mm³) de 16 probetas divididas en Serie 1 y Serie 2 correspondientes a las réplicas 1 y 2 respectivamente.

Tabla 18

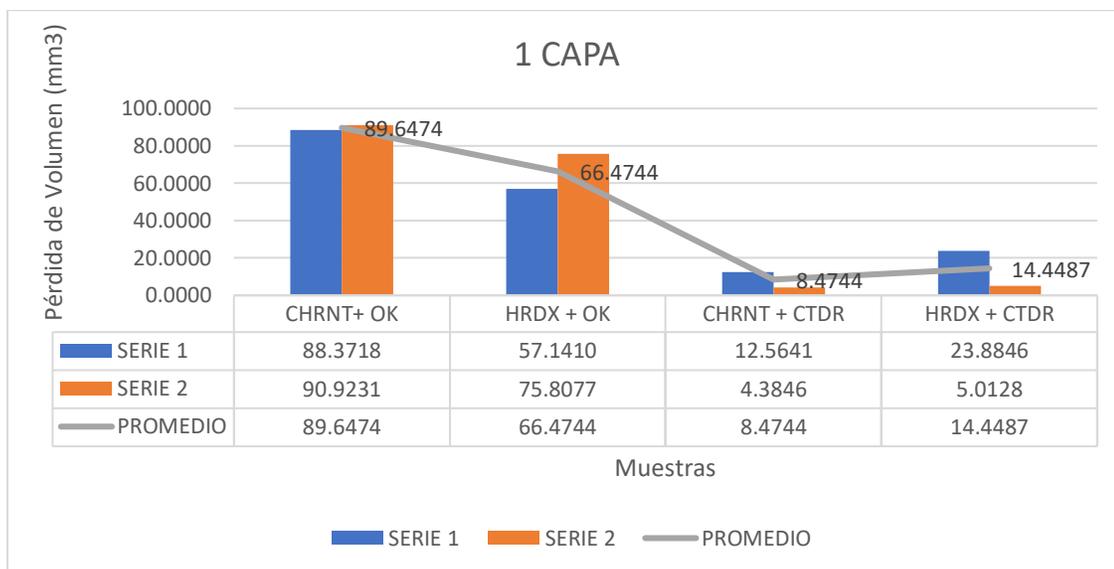
Resultados del ensayo de desgaste.

Número de capas	Número de probeta	MASA INICIAL (g)		MASA FINAL (g)		MASA PERDIDA (g)		PÉRDIDA DE VOLUMEN (cm ³)		PÉRDIDA DE VOLUMEN (mm ³)	
		SERIE 1	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2	SERIE 1	SERIE 2
1 capa	1	144.126 ₉	146.4711	143.4376	145.7618	0.6893	0.7092	0.0884	0.0909	88.3718	90.9359
	2	138.487 ₃	145.9162	138.0416	145.3249	0.4457	0.5913	0.0571	0.0758	57.1410	75.8077
	3	150.164 ₂	140.3956	150.0662	140.3614	0.0980	0.0342	0.0126	0.0044	12.5641	4.3846
	4	133.726 ₁	135.4748	133.5398	135.4357	0.1863	0.0391	0.0239	0.0050	23.8846	5.0128
2 capas	5	176.157 ₈	160.972	175.5291	160.4269	0.6287	0.5450	0.0806	0.0699	80.6026	69.8846
	6	160.411 ₂	136.3707	159.8035	135.8603	0.6077	0.5105	0.0779	0.0654	77.9103	65.4359
	7	173.885 ₅	170.3212	173.8663	170.2941	0.0192	0.0271	0.0025	0.0035	2.4615	3.4744
	8	172.343 ₃	163.424	172.287	163.3901	0.0563	0.0339	0.0072	0.0043	7.2179	4.3462

Nota. Adaptado a partir de resultados emitidos en el informe de laboratorio de materiales PUCP. (Ver Figura en la sección Anexos)

Figura 58

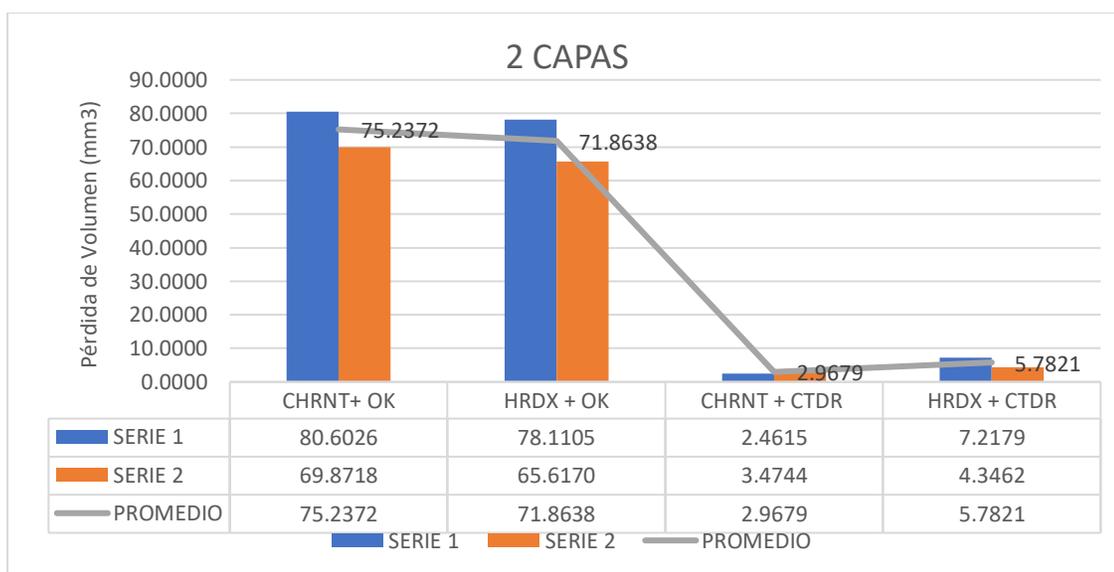
Pérdida de volumen de la Serie 1 y Serie 2 con una capa de recargue.



Nota. Resultados de pérdida de volumen de probetas de acero (Chronit 400 y Hardox 450) Serie 1 y Serie 2 con una capa de recargue con recubrimientos duros (OK 83.58 plus y Citodur 1000).

Figura 59

Pérdida de volumen de la Serie 1 y Serie 2 con 2 capas de recargue.



Nota: Resultados de pérdida de volumen de las probetas de acero (Chronit 400 y Hardox 450) de la Serie 1 y Serie 2 con dos capas de recargue con los recubrimientos duros (OK 83.58 y Citodur 1000).

La Figura 58 ilustra que el acero Chronit 400 recubierto con el electrodo Citodur 1000 con una capa de recargue presenta el promedio de pérdida de volumen más baja, seguida de la combinación del acero Hardox 450 recubierto con el electrodo Citodur 1000 con una pérdida de volumen un tanto mayor que la anterior. Finalmente, los aceros Chronit T1 400 y Hardox 450 ambas recubiertos con el electrodo OK 83.58, presentan una pérdida de volumen superior que los revestidos con electrodo Citodur 1000.

De la Figura 59, se interpreta que la combinación del acero Chronit T1 400 recubierto con electrodo Citodur 1000 con dos capas de recargue muestra el promedio de pérdida de volumen más baja, seguido del promedio del acero Hardox 450 recubierto con el electrodo Citodur 1000. Finalmente, los aceros Chronit T1 400 y Hardox 450 ambas recubiertos con el electrodo OK 83.58, presentan una pérdida de volumen superior que los recubrimientos con el electrodo Citodur 1000.

6.1.1. *Diseño factorial completo 2³.*

Para realizar el análisis estadístico, se recurrió al DOE diseño factorial completo 2³ (tres factores con dos niveles) con dos réplicas, como se puede observar en la Tabla 19, el experimento se modeló mediante el software estadístico Minitab, obteniéndose un total de 16 corridas en un solo bloque.

La Tabla 20 ilustra el diseño matricial, donde cada fila representa una combinación única de niveles de factores y asignar tratamientos específicos a cada celda. La replicación es usada para obtener resultados confiables, seguidas por la ejecución del experimento y el análisis de datos para detectar los efectos significativos de los factores estudiados y sus interacciones. Al reducir la cantidad de ensayos necesarios, esta técnica optimiza la eficiencia de la investigación sin comprometer la validez de los resultados.

Tabla 19*Resumen del diseño.*

Factores:	3	Diseño de la base:	3; 8
Corridas:	16	Réplicas:	2
Bloques:	1	Puntos centrales (total):	0

Nota. Desarrollado con software estadístico Minitab.**Tabla 20***Tabla de diseño.*

Corrida	Bloque	A	B	C
1	1	-	-	-
2	1	+	-	-
3	1	-	+	-
4	1	+	+	-
5	1	-	-	+
6	1	+	-	+
7	1	-	+	+
8	1	+	+	+
9	1	-	-	-
10	1	+	-	-
11	1	-	+	-
12	1	+	+	-
13	1	-	-	+
14	1	+	-	+
15	1	-	+	+
16	1	+	+	+

Nota. Desarrollado con software estadístico Minitab.**6.1.1.1. Análisis de regresión factorial.**

Es una técnica estadística que evalúa cómo múltiples variables independientes influyen en una variable dependiente simultáneamente, construyendo un modelo de regresión que captura estas relaciones complejas y permite entender la contribución de cada variable en la variabilidad de la variable dependiente.

6.1.1.1.1. Efectos y coeficientes estimados.

En el análisis del diseño factorial completo se utiliza la tabla de efectos y coeficientes para evaluar la influencia de los factores y sus interacciones en la variable respuesta.

- La columna Efecto determina la magnitud y el sentido de la relación entre un término y la variable de respuesta. Los efectos y las interacciones de los factores son calculados por Minitab.
- El coeficiente indica la dirección y el tamaño de la relación entre un término en el modelo y la variable de respuesta. Todos los coeficientes se presentan en unidades codificados para reducir la multicolinealidad entre los términos.
- El EE del coef. (error estándar el coeficiente) indica la exactitud con la que un coeficiente se ha determinado en el modelo de regresión factorial. Un EE del coeficiente bajo indica que la estimación del coeficiente tiene mayor precisión.
- El valor T determina si el coeficiente estimado de una variable es significativamente diferente de cero al comparar la relación entre el coeficiente y el error estándar. Un valor T alto señala que la variable es significativa, y un valor T bajo indica que la variable podría no tener un efecto significativo. En tanto, el signo positivo del valor T manifiesta que el coeficiente tiene una influencia positiva en la variable respuesta, y lo contrario; el signo negativo señala que el coeficiente tiene una influencia negativa en la variable dependiente.
- El valor de p se utiliza para determinar la importancia estadística de los términos, lo cual indica la probabilidad que mide la fuerza de las pruebas en comparación con la hipótesis nula. A medida que el valor de probabilidad disminuya, se fortalecerá aún más la evidencia en contra de la hipótesis nula. El valor de p se compara en función a un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

Valor de $p \leq \alpha$: La hipótesis alterna se considera estadísticamente significativa y es aceptada.

Valor de $p > \alpha$: La hipótesis alterna no se considera estadísticamente significativa y es rechazada.

- El factor de inflación de la varianza (FIV) indica la correlación o multicolinealidad que existe entre las variables predictoras en un modelo de regresión.

Valor de $FIV = 1$: Los factores no están correlacionados.

Valor de $1 < FIV < 5$: Los factores están moderadamente correlacionados.

Valor de $FIV > 5$: Los factores están altamente correlacionados.

Tabla 21

Tabla de efectos y coeficientes.

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.04147	0.00201	20.58	0.000	
ACEROS	-0.00445	-0.00222	0.00201	-1.10	0.302	1.00
ELECTRODOS	-0.06724	-0.03362	0.00201	-16.69	0.000	1.00
CAPAS	-0.00579	-0.00290	0.00201	-1.44	0.188	1.00
ACEROS*ELECTRODOS	0.00880	0.00440	0.00201	2.18	0.060	1.00
ACEROS*CAPAS	0.00408	0.00204	0.00201	1.01	0.341	1.00
ELECTRODOS*CAPAS	-0.00123	-0.00062	0.00201	-0.31	0.768	1.00
ACEROS*ELECTRODOS*CAPAS	-0.00564	-0.00282	0.00201	-1.40	0.199	1.00

Nota. Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

Interpretación de la Tabla 21.

A. Efectos principales: El modelo nos proporciona tres efectos principales (Aceros, Electrodo y Capas).

- **Aceros.**

Efecto: (-0.00445) La respuesta promedio disminuye en 0.00445 unidades al cambiar de un nivel bajo a un nivel alto. No se considera un efecto significativo por el alto número de su Valor P.

Valor p: (0.302) El Valor p es mayor que el umbral 0.05, lo que indica que el factor no es significativo.

- **Electrodos.**

Efecto: (-0.06724) La respuesta promedio disminuye en 0.06724 unidades al cambiar de un nivel bajo a un nivel alto. Se considera un efecto significativo por el bajo número de su Valor p.

Valor P: (0.000) Se considera altamente significativo porque el Valor p es menor que 0.05.

- **Capas.**

Efecto: (-0.00579) La respuesta promedio disminuye en 0.00579 unidades al cambiar de un nivel bajo a un nivel alto. No se considera un efecto significativo por el alto número de su Valor p.

Valor P: (0.188) La variable no se considera significativa por que el Valor p es mayor que 0.05

B. Efectos de interacción: Se cuenta con tres interacciones de dos factores (Aceros*Electrodos, Aceros*Capas y Electrodo*Capas) y uno de tres factores (Aceros*Electrodos*Capas)

- **Aceros*electrodos.**

Efecto: (0.00880) Manifiesta que la combinación de los niveles altos de los factores aumenta la respuesta promedio. Por su Valor P cercano al umbral, se considera un efecto marginalmente significativo.

Valor P: (0.060) El factor se considera marginalmente significativo por la cercanía al valor umbral 0.05.

- **Aceros*capas.**

Efecto: (0.00408) Indica un incremento de la respuesta promedio debido a la combinación de niveles de los factores. No se considera un efecto significativo.

Valor P: (0.341) El valor p es mayor que 0.05 por lo que la interacción de las variables no se considera significativa.

- **Electrodos*capas.**

Efecto: (-0.00123) Sugiere una disminución en la respuesta promedio. No se considera un efecto significativo.

Valor P: (0.768) La interacción no es significativa porque el Valor p es mayor que el valor de $\alpha = 0.05$.

- **Aceros*electrodos*capas.**

Efecto: (-0.00564) La combinación de los niveles altos de los factores influye en una leve disminución de la respuesta promedio.

Valor P: (0.199) La interacción triple se considera no significativa porque el Valor p es mayor que el valor $\alpha = 0.05$.

Tabla 22*Resumen del modelo.*

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.0080583	97.31%	94.96%	89.25%

Nota. Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

Interpretación de la Tabla 22.

- Error estándar de la estimación (S): Se utiliza para determinar el nivel de exactitud con la que el modelo describe la respuesta. Un valor bajo señala que los puntos están cercanos a la línea de regresión ajustada. S (0.0080583) indica un buen ajuste del modelo.
- Coeficiente de determinación (R-cuad): Indica el porcentaje de variación de la variable respuesta, la cual es explicada por el modelo. Según la Tabla 22, un R-cuad. de 97.31% señala que el modelo explica la variabilidad de la respuesta en ese porcentaje, lo que nos da a entender que el modelo posee un excelente ajuste.

6.1.1.1.2. Análisis de la varianza (ANOVA).

Se emplea la Tabla 23 de análisis de la varianza para determinar si existe al menos un efecto estadísticamente significativo de uno de los factores en la variable respuesta, para lo cual utilizamos los valores p de la tabla.

Tabla 23*Análisis de Varianza.*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	0.018807	0.002687	41.37	0.000
Lineal	3	0.018297	0.006099	93.92	0.000
ACEROS	1	0.000079	0.000079	1.22	0.302
ELECTRODOS	1	0.018084	0.018084	278.48	0.000

CAPAS	1	0.000134	0.000134	2.07	0.188
Interacciones de 2 términos	3	0.000382	0.000127	1.96	0.198
ACEROS*ELECTRODOS	1	0.000310	0.000310	4.77	0.060
ACEROS*CAPAS	1	0.000066	0.000066	1.02	0.341
ELECTRODOS*CAPAS	1	0.000006	0.000006	0.09	0.768
Interacciones de 3 términos	1	0.000127	0.000127	1.96	0.199
ACEROS*ELECTRODOS*CAPAS	1	0.000127	0.000127	1.96	0.199
Error	8	0.000519	0.000065		
Total	15	0.019326			

Nota. Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

Interpretación de la Tabla 23.

- Efectos de interacción de tres términos: Valor p (0.199); es mayor que 0.05. lo que indica que no existe algún efecto significativo del conjunto sobre la variable respuesta.
- Efectos de interacción de dos términos: Valor p (0.198); es mayor que 0.05, señala que en el conjunto de combinaciones no existe presencia de algún efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta.
- Efectos principales o lineales: Valor p (0.000); es menor que 0.05; evidencia que si existe al menos un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta o en los valores de pérdida de volumen por desgaste abrasivo. En la Tabla 23, solo un factor principal (Electrodos) posee el valor inferior a 0.05, siendo esta la única en tener un efecto sobre la variable respuesta.

6.1.1.1.3. Ecuación de regresión en unidades no codificadas.

Esta ecuación representa la fórmula matemática que se utiliza para predecir la variable independiente a partir de las variables dependientes o predictoras en sus unidades originales o no codificadas sin ninguna transformación previa.

$$\begin{aligned}
 \text{Pérdida de volumen (cm}^3\text{)} &= 0.05016 - 0.00834 \text{ Aceros} - 0.03177 \text{ Electrodo} \\
 &- 0.00579 \text{ Capas} + 0.01287 \text{ Aceros} * \text{electrodo} \\
 &+ 0.00408 \text{ Aceros} * \text{Capas} - 0.00123 \text{ Electrodo} * \text{Capas} \\
 &- 0.00564 \text{ Aceros} * \text{Electrodo} * \text{Capas}
 \end{aligned}$$

6.1.1.1.1. Ecuación de regresión en unidades codificadas.

X₁: Aceros

X₂: Electrodo

X₃: Capas

$$\begin{aligned}
 Y = & 0.05016 - 0.00834 X_1 - 0.03177 X_2 - 0.00579 X_3 + 0.01287 X_1 * X_2 + 0.00408 X_1 * \\
 & X_3 - 0.00123 X_2 * X_3 - 0.00564 X_1 * X_2 * X_3
 \end{aligned}$$

6.1.1.1.2. Gráfica de probabilidad normal de efectos.

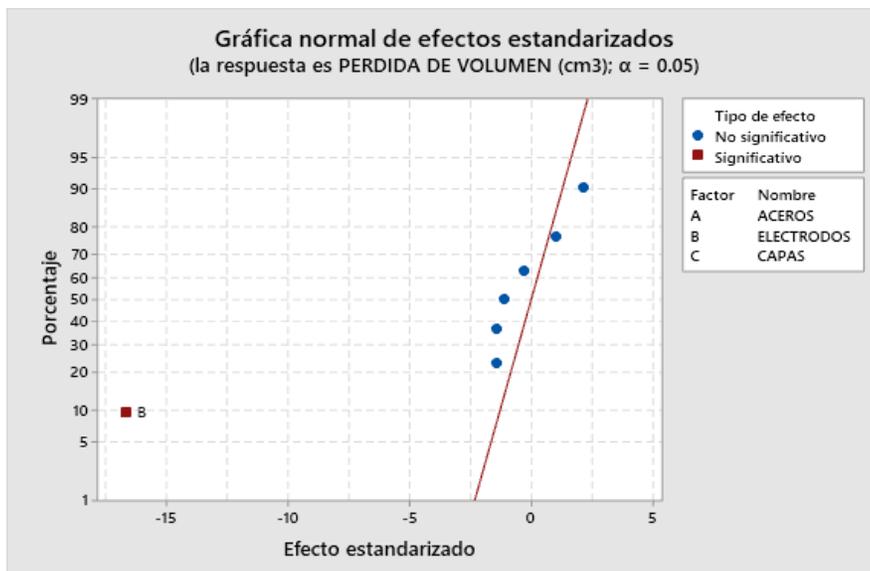
La Figura 60 muestra la gráfica normal de efectos estandarizados, se trata de un instrumento ilustrativo empleado en el análisis de datos de un diseño experimental, la cual ayuda a determinar qué factores y sus interacciones son estadísticamente significativos.

Interpretación de la Figura 58.

- Los puntos que se encuentran alejados de la línea diagonal (línea de ajuste de distribución), representan factores que son estadísticamente significativos en la variable respuesta. En la figura se puede observar que existe un solo factor sobresaliente que afecta la variable dependiente. La variable ELECTRODOS (Valor p<0.05) es la que posee el mayor efecto significativo en la variable respuesta, el punto se encuentra alejado y al lado izquierdo de la línea referencial, lo que significa que tiene un efecto negativo, por lo que se deduce que la respuesta disminuye al cambiar del nivel bajo al nivel alto de la variable.

Figura 60

Gráfica normal de efectos estandarizados.



Nota: Desarrollado en Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

6.1.1.1.3. Diagrama de Pareto.

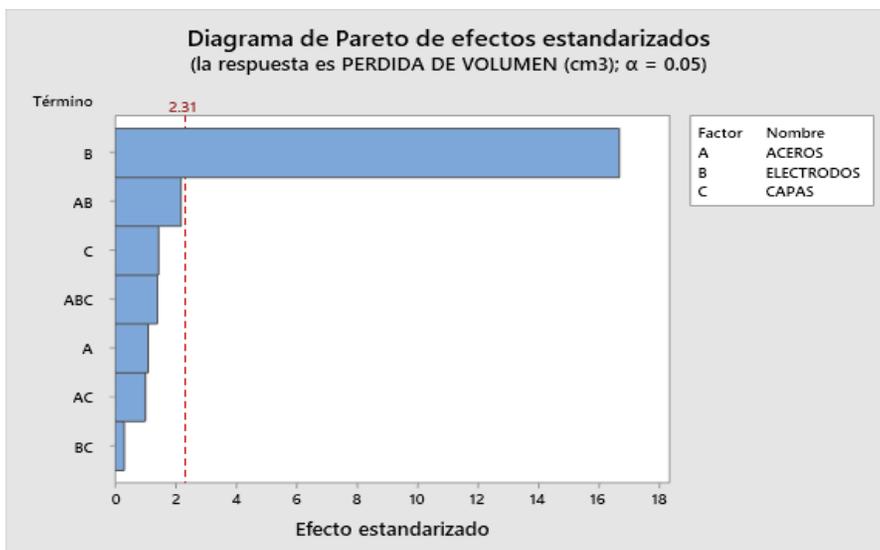
El diagrama de Pareto es una gráfica de barras que ilustra gráficamente cuales de los efectos (variables) y sus interacciones son estadísticamente significativos en la variable respuesta, ubicándolos en un orden jerárquico descendente desde el efecto más significativo hasta el menos significativo. El programa traza automáticamente una línea de referencia, cualquier efecto que sobrepase esta línea indica que el factor es notablemente significativo.

Interpretación de la Figura 61.

- El tipo de “ELECTRODOS” (B) es el único factor con mayor efecto significativo sobre la variable respuesta, debido a que la barra sobrepasa la línea de referencia. A partir de la figura podemos mencionar que la interacción “ACEROS*ELECTRODOS” es marginalmente significativa. El orden jerárquico de las barras indica la magnitud en la que afecta cada factor o interacción.

Figura 61

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados.

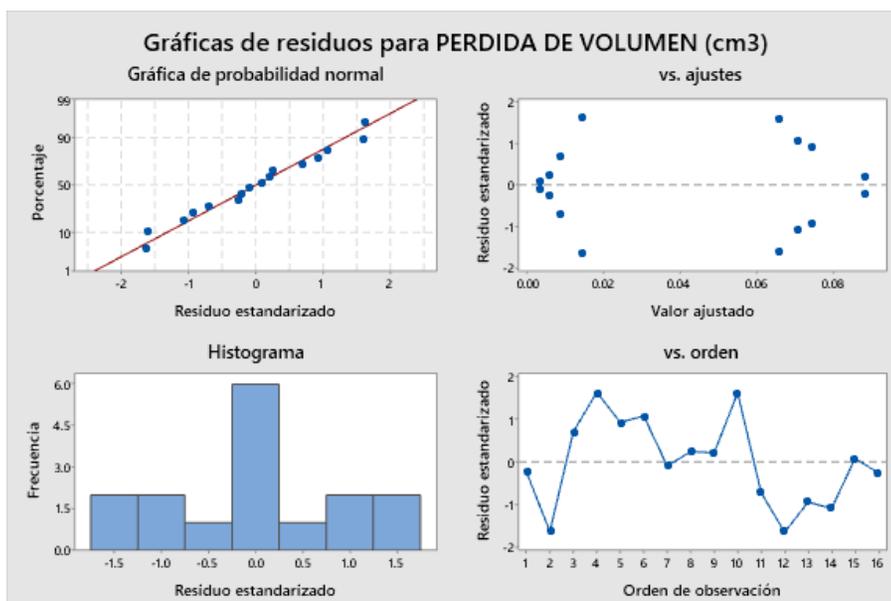


Nota: Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

6.1.1.1.4. Gráficas de residuos.

Figura 62

Gráfica de residuos.



Nota: Elaborado en software Minitab.

La gráfica de residuos se emplea para determinar si existen patrones anómalos como datos atípicos o asimétricos y confirmar los supuestos del modelo.

Interpretación de la Figura 62.

- Gráfica de la probabilidad normal: Los residuos siguen una distribución normal, debido a que la alineación de los puntos es cercana a la línea horizontal. No existen datos asimétricos o atípicos.
- Gráfica de residuos vs. Ajustes: Los puntos se encuentran distribuidos aleatoriamente alrededor de la línea horizontal o cero. No existe presencia de heterocedasticidad (varianza de residuos no es constante) o datos atípicos.
- Gráfica de histograma de residuos: La forma del histograma (campana) indica que los residuos son normales. No existe presencia de datos atípicos o asimétricos.
- Gráfica de residuos vs. Orden: En la gráfica se observa que los puntos están distribuidos aleatoriamente, no existe presencia de agrupamientos y patrones. Lo que indica que los residuos son independientes y no están correlacionados entre sí.

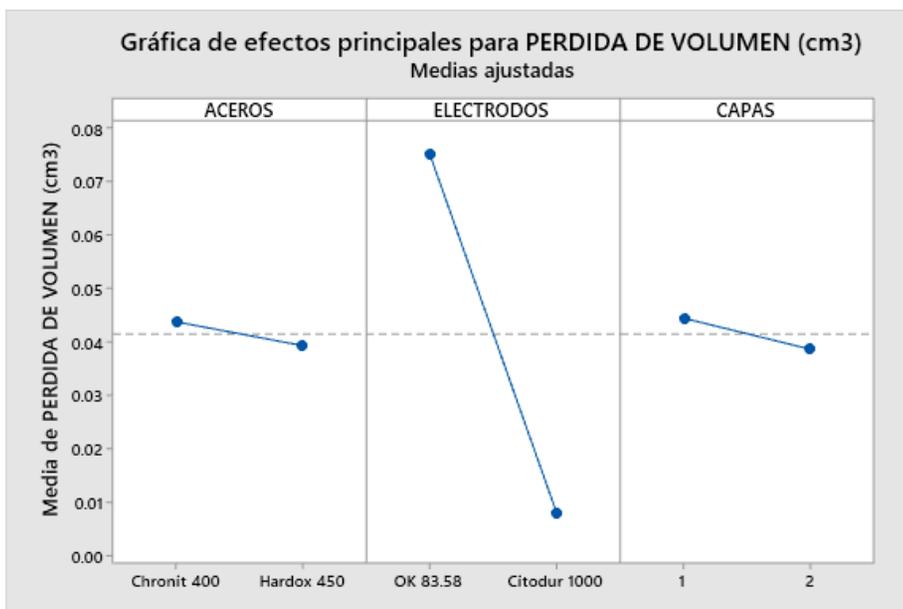
6.1.1.2. Gráficas factoriales.

6.1.1.2.1. Gráfica de efectos principales.

En esta gráfica se muestra el promedio de la variable respuesta en diferentes niveles de uno o más factores. Se usa para determinar si cada factor tiene un impacto significativo en la variable dependiente.

Figura 63

Gráfica de efectos principales.



Nota: Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

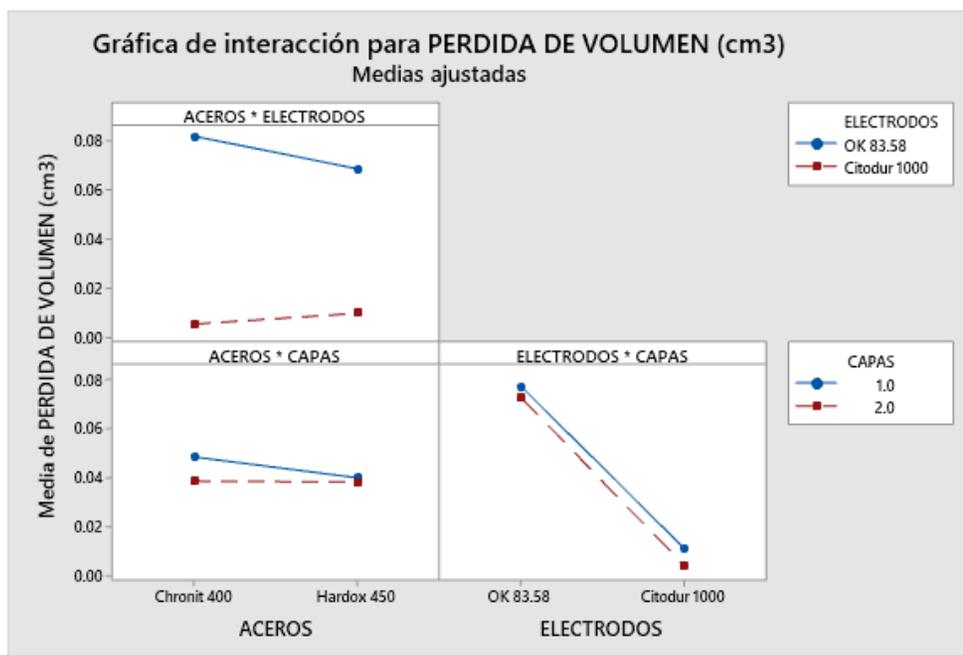
Interpretación de la Figura 63:

- Aceros: La pérdida de volumen promedio para Chronit 400 es ligeramente superior a la de Hardox 450. La suave pendiente de la línea sugiere que hay una diferencia mínima en la reducción de volumen entre estos dos tipos de acero.
- Electrodo: El promedio de pérdida de volumen para el electrodo OK 83.58 respecto al electrodo Citodur 1000 es considerablemente inferior. La pendiente pronunciada de la línea muestra que el tipo de electrodo tiene un impacto significativo en la pérdida de volumen.
- Capas: La pérdida de volumen promedio para una sola capa es ligeramente mayor que la de dos capas. La suave inclinación de la línea insinúa que el número de capas influye en la pérdida de volumen, aunque de manera mínima.

6.1.1.2.2. Gráfica de interacción.

Figura 64

Gráfica de interacción



Nota: Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

Interpretación de la Figura 64:

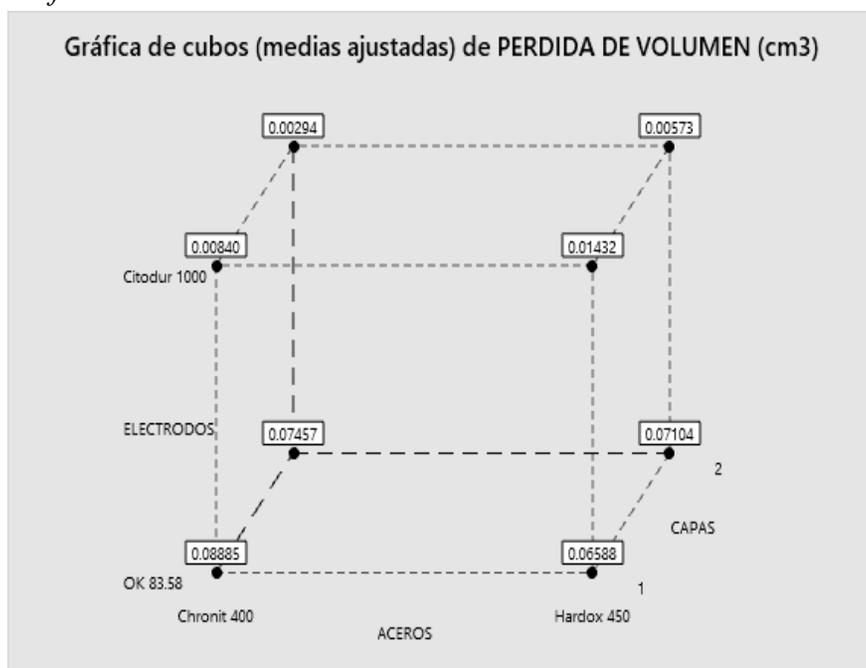
- Interacciones entre aceros y electrodos: La pérdida de volumen varía dependiendo del tipo de electrodo. El recargue del electrodo OK 83.58 Plus presenta una pérdida de volumen mayor en comparación de la pérdida de volumen con la aplicación del electrodo Citodur 1000 en ambos aceros.
- Interacción de capas y aceros: Los dos tipos de acero presentan una variación en el efecto del número de capas. En comparación con el Hardox 450, se observa una pérdida de volumen menor con el acero Chronit T1 400.

- Cuando observamos cómo interactúan los electrodos y las capas, encontramos que el Citodur 1000 pierde menos volumen en comparación con el OK 83.58. Además, la diferencia en la pérdida de volumen entre usar una o dos capas de recubrimiento es más pronunciada cuando se usa el Citodur 1000.

6.1.1.2.3. Gráfica de cubos.

Figura 65

Gráfica de cubos.



Nota: Desarrollado con software estadístico Minitab a partir de datos experimentales proporcionados por el ensayo de desgaste por abrasión según la norma ASTM G65.

Interpretación de la Figura 65:

- Efecto del número de capas de recubrimiento: Tanto para el acero Chronit T1 400 como para el acero Hardox 450, al aumentar de una a dos capas con la aplicación del electrodo Citodur 1000 se observa una significativa disminución en la pérdida de volumen. Sin embargo, en lo que respecta al OK 83.58, en el caso de Hardox 450, en particular, se observa que la pérdida de volumen tiende a aumentar con un mayor número de capas, lo

cual no es tan evidente en otras situaciones cuando se analiza el impacto del número de capas.

- Interacción entre tipo de aceros y electrodos: Los dos electrodos producen una reacción diferente en el acero Chronit T1 400 y el acero Hardox 450. En términos generales, el electrodo Citodur 1000 tiende a proporcionar un rendimiento superior con una menor pérdida de volumen en contraste con el electrodo OK 83.58.
- Comparación entre tipos de aceros: En general, se observan menores pérdidas de volumen al utilizar el acero Chronit T1 400 con la aplicación del electrodo Citodur 1000 en comparación al acero Hardox 450.

6.2. Resultados de la caracterización metalográfica mediante observación microscópica.

La Tabla 24 detalla un resumen de las microestructuras obtenidas en la caracterización metalográfica con ataque químico con el reactivo Picral.

Tabla 24

Resumen de las fases presentes de acuerdo al reconocimiento microscópico.

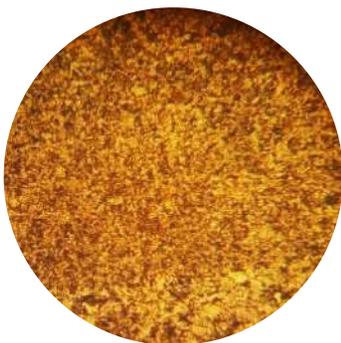
MUESTRA	2 CAPAS	1 CAPA	ZAC	Metal Base
1		C/M/AR	M/P	F/P
2		C/M/AR	M/AR	F/P
3		C/AR	C/M/AR/P	F/P
4		C/AR	M/A	F/P
5	C/M/AR	C/M/AR	M/AR/P/F	F/P
6	C/M/AR	C/M/AR	M/AR/P/F	F/P
7	C/M/AR	C/M/AR	P/F	F/P
8	C/AR/M	C/M/AR	M/P/F	F/P

Nota. C=carburos, M=Martensita, AR=Austenita retenida, P=Perlita, F=Ferrita

En las Tablas 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31 y 32 se muestra la caracterización metalográfica de las probetas con recubrimiento. Se evidencia que la zona transversal al cordón de soldadura fue preparada para el análisis metalográfico, revelándose las áreas de metal base y ZAC además de 1 capa y 2 capas de recubrimiento.

Tabla 25

Metalografía: Chronit TI 400 + OK 83.58 +1 capa de revestimiento.

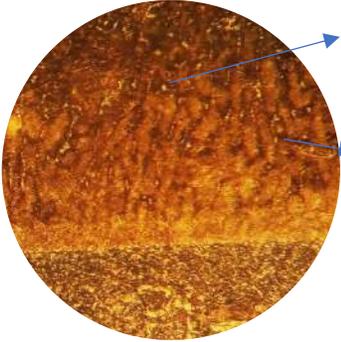
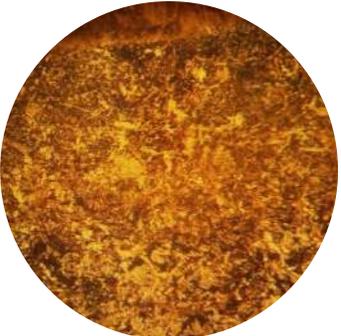
MUESTRA: 1	RECUBRIMIENTO - 1 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base acero Chronit 400, recubierto con una capa del electrodo OK 83.58.		
	Formación de carburos de cromo alargados en una matriz martensítica y austenita retenida.	Formación de granos finos de (perlita+ferrita) en el límite de la soldadura con crecimiento de granos hacia el metal base.

Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Las imágenes mostradas en las Tablas 25 y 26, muestran microestructuras con la formación de carburos debido al enfriamiento rápido post soldadura, con 90%-95% de matriz martensítica según lo estimado en el diagrama de la Figura 66, la cual predice el porcentaje de martensita presente en una microestructura en función a la proporción de carbono en la composición química del electrodo (0.6 % C).

Tabla 26

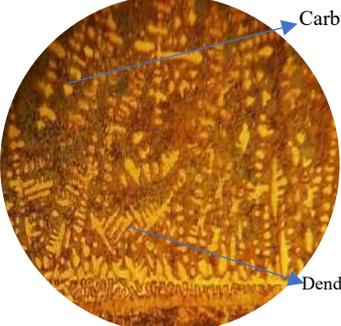
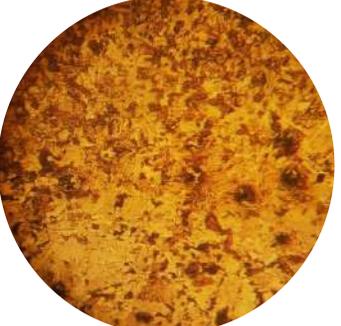
Metalografía: Hardox 450 + OK 83.58 + 1 capa de recubrimiento.

MUESTRA: 2	RECUBRIMIENTO-1 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Acero Hardox 450, Recubrimiento: OK 83.58 1 capa	 <p data-bbox="857 464 959 638">Carburos Matriz Martensita</p> <p data-bbox="435 827 959 926">Formación de carburos de cromo alargados en una matriz martensítica y austenita retenida.</p>	 <p data-bbox="980 814 1495 940">Formación de granos finos de austenita retenida y martensita en el límite de la soldadura con tendencia de crecimiento de granos en dirección del metal base.</p>
<p data-bbox="282 947 1279 972"><i>Nota.</i> Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)</p>		

Además, se observa una tendencia del crecimiento de granos de perlita (ferrita y cementita) de la ZAC direccionada al metal base, tal efecto se produce debido a la gradiente de temperatura existente entre dichas zonas y por la velocidad de enfriamiento por debajo de la temperatura de austenización. La presencia del alto porcentaje de martensita en la microestructura se genera por la alta velocidad de enfriamiento (8.5 °C/segundo) de acuerdo al diagrama de transformación de enfriamiento continuo (CCT) (Figura 18).

Tabla 27

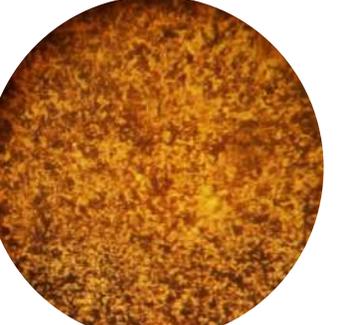
Metalográfica: Chronit T1 400+Citodur 1000+ 1 capa de recubrimiento

MUESTRA: 3	RECUBRIMIENTO-1 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Chronit 400, recubrimiento: Citodur 1000 1 capa		
Formación de carburos en red superpuestos en una matriz de martensita y austenita retenida.		Presencia de carburos en mínima cantidad, austenita retenida, martensita, ferrita y perlitas de granos finos, crecimiento de granos en dirección del metal base.

Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Tabla 28

Metalográfica: Hardox 450 + Citodur 1000+1 capa de recubrimiento.

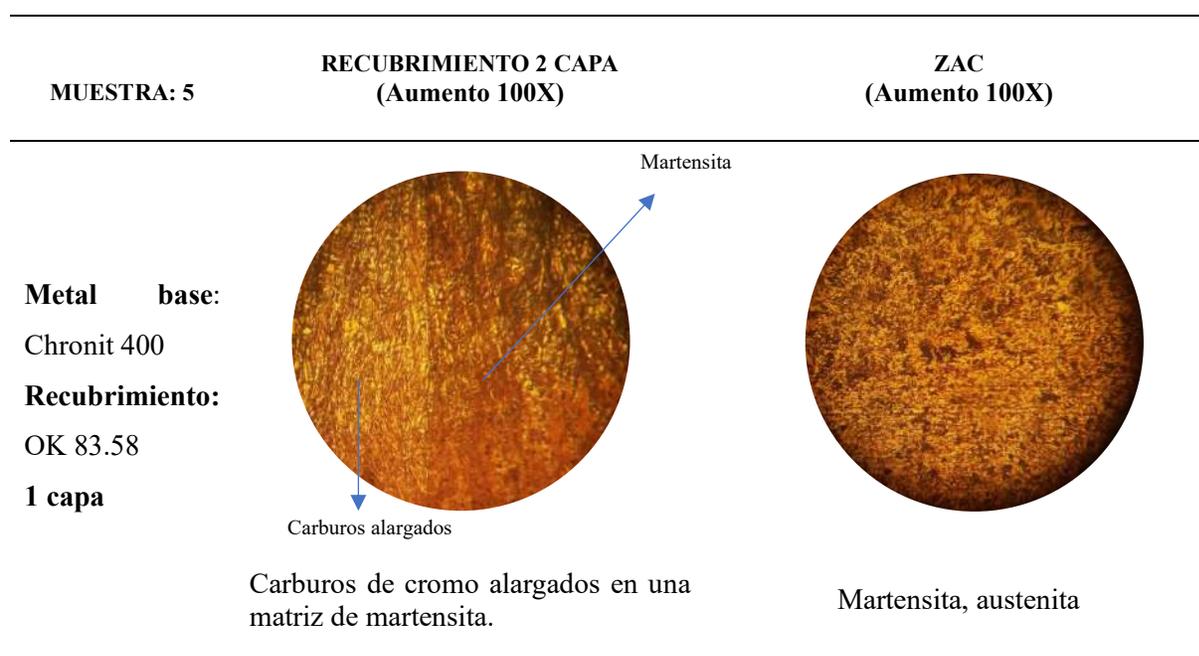
MUESTRA: 4	RECUBRIMIENTO-1 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Hardox 450 recubrimiento: Citodur 1000 1 capa		
Carburos de cromo en red, alargados y hexagonales en una matriz de martensita y austenita.		Martensita, ferrita y perlita de granos finos crecimiento de granos y presencia de carburos de cromo.

Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

La Tabla 27 y 28, muestra microestructuras hipoeutécticas y eutécticas con presencia de carburos de cromo en red, alargados y hexagonales en una matriz de martensita. La presencia de carburos por el alto porcentaje del cromo en la composición química del electrodo Citodur 1000. Además, se observa presencia de dendritas de austenita ramificadas debido a la alta velocidad de enfriamiento por debajo del punto de solidificación.

Tabla 29

Metalográfica: Chronit T1 400 + OK 83.58+ 2 capas de recubrimiento.

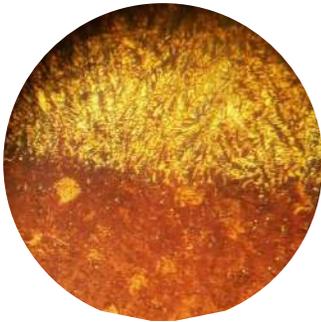
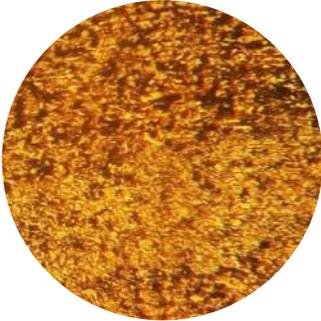


Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Las imágenes de la Tabla 29 y 30 muestran microestructuras con dos capas de recarga con la aplicación del electrodo OK 83.58 Plus, presenta microestructuras similares a las obtenidas con una capa de revestimiento, mostrando presencia de carburos de cromo alargados en una matriz de martensítica en listones y austenita retenida.

Tabla 30

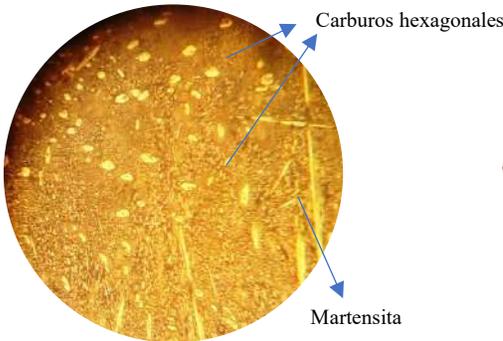
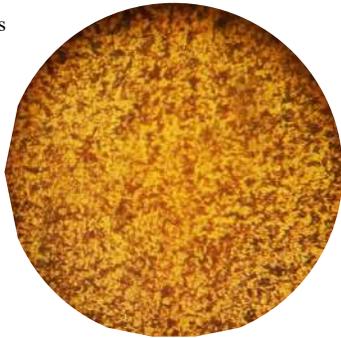
Metalográfica: Hardox 450 + OK 83.58 + 2 capas de recubrimiento.

MUESTRA: 6	RECUBRIMIENTO 2 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Hardox 450 Recubrimiento: OK 83.58. 2 capas	 <p>Carburos de cromo alargados y hexagonales en una matriz martensítica.</p>	 <p>Presencia de martensita y carburos en mínima proporción (perlita+ferrita)</p>

Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Tabla 31

Metalográfica: Chronit T1 400+Citodur 1000+2 capas de recubrimiento

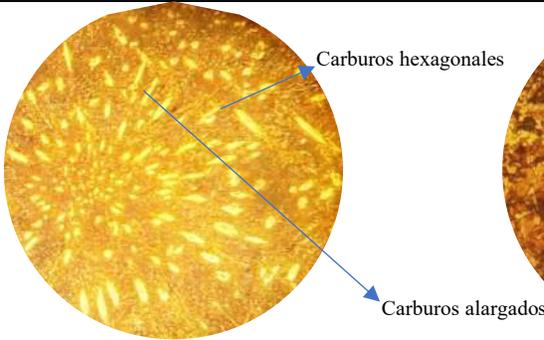
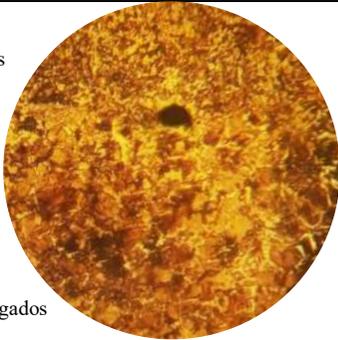
MUESTRA: 7	RECUBRIMIENTO 2 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Chronit 400 Recubrimiento: Citodur 1000. 2 capas	 <p>Carburos de cromo hexagonales y diminutos granos de carburos en una matriz de martensita.</p>	 <p>Presencia de ferrita y perlita.</p>

Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Las Tablas 31 y 32, muestran microestructuras de doble capa de recubrimiento con el electrodo Citodur 1000, las cuales evidencian una microestructura en forma de redes de carburo hexagonal y carburos alargados en una matriz de martensita. El alto porcentaje de carburos es favorecido por la composición química del electrodo de recargue (3.8% de carbono y 36% de Cromo). Se reafirma lo mencionado por (Vidal & Hoyos, 2017) en su investigación, donde menciona que la presencia de carburos grandes de forma hexagonal en una matriz de carburos más pequeños, se debe a los altos porcentajes de carbono por encima de 4% y cromo mayor a 12%, formando microestructuras hipereutéticas; las cuales son las que ofrecen mejor resistencia al desgaste abrasivo.

Tabla 32

Metalográfica: Hardox 450 + Citodur 1000+2 capas de recubrimiento.

MUESTRA: 8	RECUBRIMIENTO 2 CAPA (Aumento 100X)	ZAC (Aumento 100X)
Metal base: Hardox 450 Recubrimiento: Citodur 1000. 2 capas		
	Carburos de cromo hexagonales y alargados en una matriz austenítica y martensítica.	Perlita+ferrita.

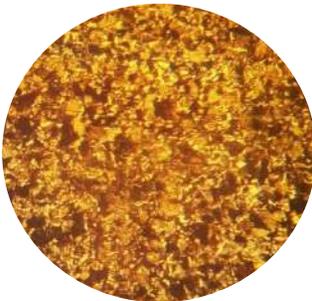
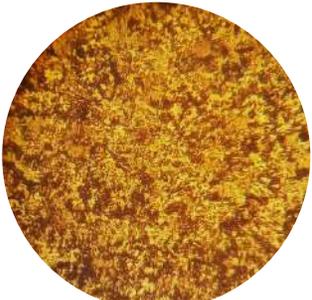
Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

La Tabla 33, muestra microestructuras similares en los metales base, la diferencia radica en el tamaño de grano que presenta cada probeta (grano grueso y grano fino) el cual varía según

el cambio térmico experimentado y los ciclos térmicos a los que fueron expuestos. Una microestructura recomendable que ofrece buena dureza y alta resistencia es la perlita de grano fino. Por otra parte, es importante mencionar que las microestructuras mostradas en todas las tablas son similares a las mostradas en la Figura 30, la cual predice las microestructuras de un acero de acuerdo al porcentaje de carbono y porcentaje de aleantes en el acero.

Tabla 33

Microestructura del metal base del acero Hardox 450 y Chronit T1 400.

METAL BASE	
(Aumento 400X)	
Hardox 450	
Chronit T1400	
Observación	Granos gruesos de perlita y ferrita en ambos metales base.

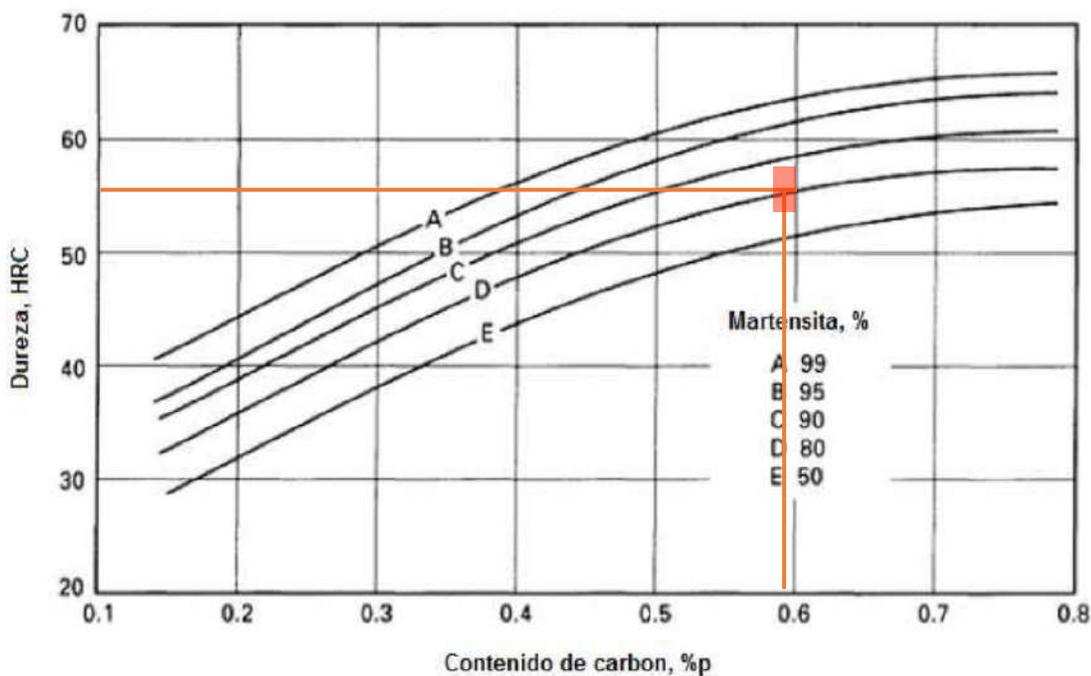
Nota. Obtenido del registro fotográfico del laboratorio de Metalurgia Física UNSAAC (2024)

Finalmente con las observaciones de microscopía óptica y resultados del ensayo de desgaste por abrasión de arena seca según la norma ASTM G65, se puede inferir que los carburos grandes de

como hexagonales presentes en la microestructura son las que tienen mayor resistencia al desgaste de aceros revestidos, siendo la forma y el tamaño de los carburos un factor determinante para la buena resistencia al desgaste y dureza de un recubrimiento, alineándose a los resultados obtenidos por Kumar & Verma, (2017), así mismo, las microestructuras reveladas son similares a las obtenidas por (Vidal & Hoyos, 2017) en su Tesis de investigación.

Figura 66

Diagrama de la relación del contenido de carbono y dureza.



Nota. Curvas del porcentaje de martensita de acuerdo a la relación del contenido de carbono y la dureza de un acero. Fuente: Adaptado de (Guemes & Martin, 2012)

6.3. Resultados de medición de la dureza.

Se sometieron un total de 16 probetas a ensayo de dureza mediante el método Rockwell en la escala C (HRC). La dureza promedio fue obtenida a partir de la medición en dos puntos diferentes sobre la superficie de cada probeta como se detalla en el informe de resultados mostrado en la sección Anexos.

La Tabla 34 muestra las durezas promedio de ensayos en la superficie de las probetas recubiertas. Se distingue que el valor de dureza superficial promedio más alto (58.25 HRC) es el revestimiento con Citodur 1000 con una capa de recargue, seguido de la dureza superficial de dos capas de revestimiento (56.9 HRC) con el mismo electrodo; ambos con el metal base Chronit 400. Los resultados de dureza obtenidas se asemejan con los valores predichos en la Figura 29, el cuál proporciona los valores de dureza y microestructura de acuerdo a la composición química del electrodo (% C y otros metales aleantes).

Tabla 34

Resultados de medición de durezas Rockwell C

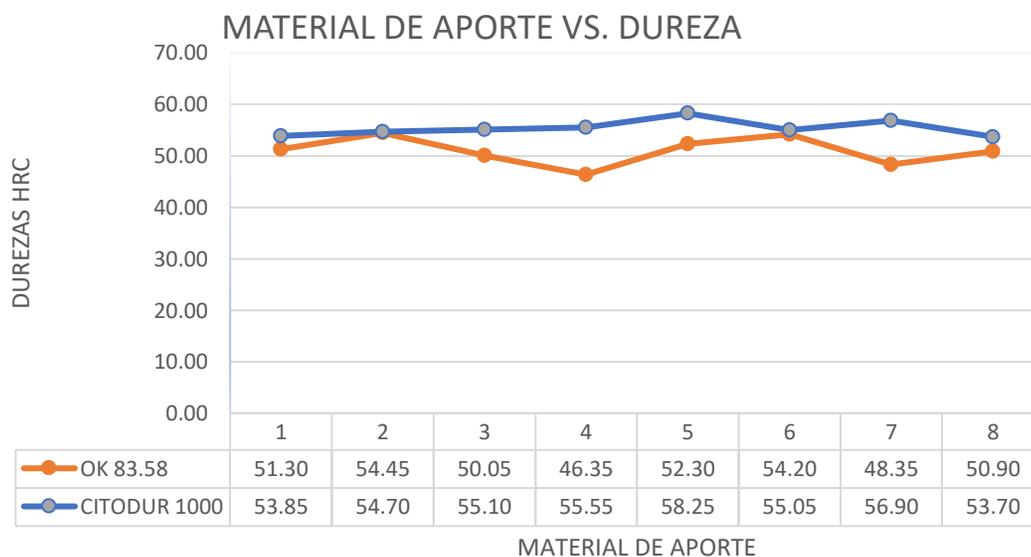
PROBETA	ACEROS	ELECTRODOS	N° CAPAS	PROMEDIO
				DUREZAS (HRC)
1	Chronit T1 400	OK 83.58	1 capa	51.30
2	Hardox 450	OK 83.58	1 capa	54.45
3	Chronit T1400	Citodur 1000	1 capa	53.85
4	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa	54.70
5	Chronit T1 400	OK 83.58	2 capas	50.05
6	Hardox 450	OK 83.58	2 capas	46.35
7	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 capas	55.10
8	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas	55.55
9	Chronit T1 400	OK 83.58	1 capa	52.30
10	Hardox 450	OK 83.58	1 capa	54.20
11	Chronit T1 400	Citodur 1000	1 capa	58.25

12	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa	55.05
13	Chronit T1 400	OK 83.58	2 capas	48.35
14	Hardox 450	OK 83.58	2 capas	50.90
15	Chronit T1 400	Citodur 1000	2 capas	56.90
16	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas	53.70

Nota. Resultados obtenidos en Laboratorio de Metalurgia Física-UNSAAC.

Figura 67

Material de aporte vs. dureza.



Nota. Elaborado por los autores.

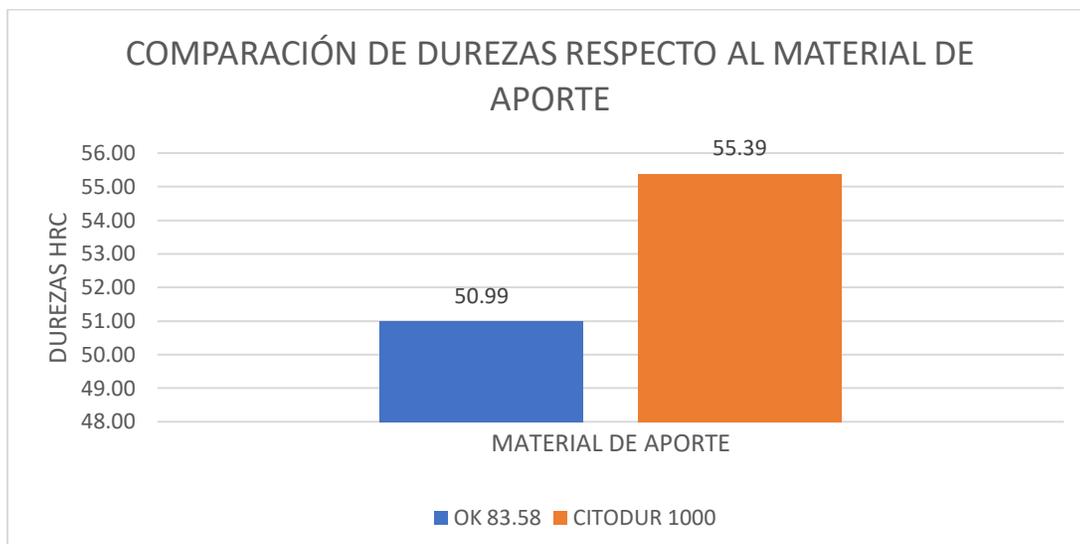
Interpretación de la Figura 67:

Según la Figura 67, se obtuvieron valores de durezas superiores para las 8 probetas recubiertas con el electrodo Citodur 1000 con una y dos capas de recargue en comparación con las probetas recubiertas con el electrodo OK 83.58. El rango de durezas obtenidas para una y dos capas no son lejanas entre sí, manteniendo un margen de diferencia mínima, obteniéndose valores entre 51.30 HRC dureza mínima y 54.7 HRC dureza máxima para una capa de recubrimiento, y

los valores obtenidos para dos capas de recargue fluctúan en un rango de 46.35 HRC dureza mínima y 56.9 HRC dureza máxima respectivamente.

Figura 68

Comparación de durezas promedios para cada material de aporte.



Nota. Elaborado por los autores.

Interpretación de la Figura 68:

La Figura 68 ilustra una comparación de las durezas promedio obtenidas entre los dos materiales de aporte, sin considerar el número de capas de recubrimiento. La barra naranja indica la dureza promedio de 55.39 HRC para el consumible Citodur 1000 mayor que la dureza promedio de 50.99 HRC para el consumible OK 83.58 representada por la barra azul. Se puede deducir que se obtuvieron mejores resultados en cuanto a dureza superficial con la aplicación del electrodo Citodur 1000.

Interpretación de la Figura 69:

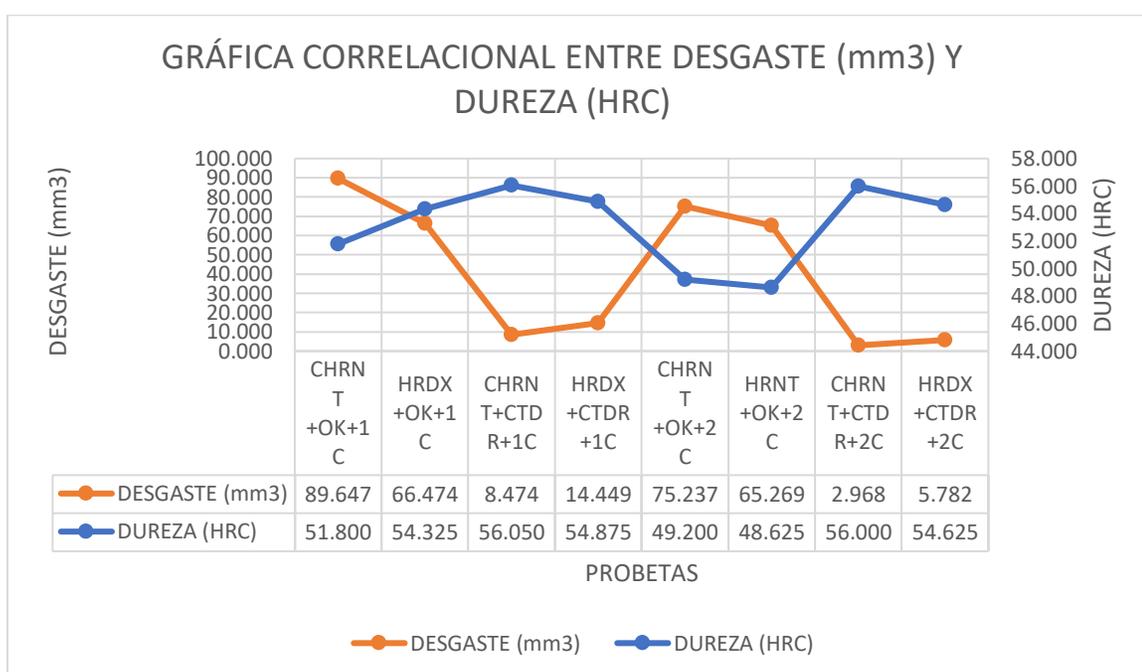
La Figura 69 muestra la correlación entre el desgaste (mm^3) (Eje Y izquierdo) y la dureza (HRC) (Eje Y derecho) de probetas revestidas de acuerdo a las diferentes combinaciones (Eje X) sometidas a ensayo de desgaste y dureza superficial. La línea naranja representa el desgaste de las

probetas, mientras que la línea azul la dureza de las mismas. Por la dirección de las líneas se interpreta que el desgaste y dureza tienen una correlación inversa, a medida que la dureza incrementa, el desgaste disminuye y viceversa. Las probetas revestidas con el electrodo Citodur 1000 exhiben una combinación ideal de dureza elevada y desgaste reducido.

6.4. Correlación entre desgaste y dureza.

Figura 69

Correlación entre desgaste y dureza.



Nota. Elaborado por los autores.

Según la gráfica:

- Chronit T1 400 + OK 83.58 con 1 Capa: Presenta un alto desgaste (89.647 mm³) y una dureza moderada (51.800 HRC).
- Hardox 450 + OK 83.58 con una 1 Capa: Tiene un menor desgaste (66.474 mm³) y una dureza ligeramente mayor (54.325 HRC).

- Chronit T1 400 + Citodur 1000 + 1 Capa: Muestra un desgaste muy bajo (8.474 mm³) y una alta dureza (56.050 HRC).
- Hardox + Citodur 1000+ 1 Capa: Tiene un desgaste relativamente bajo (14.449 mm³) y una dureza alta (54.875 HRC).
- Chronit T1 400 + OK 83.58 +2 C: Vuelve a mostrar un alto desgaste (75.237 mm³) y una dureza moderada (49.200 HRC).
- Hardox 450 + OK 83.58+ 2 Capas: Presenta un desgaste moderado (65.269 mm³) y una dureza más baja (48.625 HRC).
- Chronit T1 400 + Citodur 1000 + 2 Capas: Exhibe el desgaste más bajo (2.968 mm³) y una alta dureza (56.000 HRC).
- Hardox + Citodur 1000 + 2 Capas: Tiene un desgaste muy bajo (5.782 mm³) y una dureza alta (54.625 HRC).

Si se incrementa la dureza de un material, es probable que experimente menos desgaste en comparación con probetas más blandas. Esto sugiere que aumentar la resistencia al desgaste puede lograrse eficazmente mediante el aumento de la dureza del material.

Sin embargo, en la Figura 69 se puede distinguir que:

- En cada una de las combinaciones, la dureza superficial con dos capas de recubrimiento es menor con respecto a las combinaciones con recubrimiento con una capa.
- Recubrimientos con una capa de recargue poseen mayor dureza y mayor desgaste.
- Recubrimientos con dos capas de recargue poseen menor dureza y menor desgaste.

Según los resultados obtenidos, se puede determinar que la dureza es un indicador de la resistencia al desgaste. Sin embargo, la resistencia al desgaste por abrasión está influenciada directamente por el número de capas de recubrimiento y la microestructura de la capa depositada.

6.5. Análisis de costos y beneficios.

Teniendo en cuenta las pruebas de laboratorio del ensayo de desgaste por abrasión y el ensayo de dureza, se realizó un cálculo aproximado de la eficiencia y rentabilidad de los impulsores de las bombas centrífugas artesanales recubiertas con electrodos Citodur 1000 y OK 83.58 Plus, comparando con materiales que se utilizan actualmente, el acero ASTM A36 como acero base para la fabricación artesanal del impulsor, recubiertas con el electrodo E7018.

Tabla 35

Costos de producción del impulsor con acero ASTM A36.

Materiales (costos directos)	Precio (S/.)
Acero ASTM A36 (1/4" ×300mm×600mm)	150
Electrodo E7018 Kg	15
Mano de obra	150
Transporte	100
Total	S/. 415

Nota. Costos de materiales al 04/2024.

Según la Tabla 35, el costo de producción de un impulsor de una bomba centrífuga artesanal usando como metal base el acero ASTM A36 y como recubrimiento protector el electrodo E7018 es aproximadamente de 415.00 Soles.

Tabla 36

Costo de materiales para el impulsor propuesto..

Materiales	Precio (soles)
Acero Chronit T1 400 (1/4" ×300mm×600mm)	243
Acero Hardox 450 (1/4" ×300×600)	243

Electrodo Citodur 1000 (5mm×450mm) Kg	140
Electrodo OK 83.58 Plus (5mm×450mm) Kg	50
Mano de obra	150
Transporte	100

Nota: Costo de materiales al 04/2024.

Determinación del costo de producción.

$CostoProd. = PrecioAcero + N^{\circ}Capas * (PrecioElectrodo(Kg)) + Mano\ de\ obra + Transporte$

- Impulsor con acero Chronit T1 400, y recubierto con dos capas del electrodo Citodur 1000:

$$Costo\ de\ prod. = 243 + 2 * 140 + 150 + 100 = 773.00\ Soles$$

- Impulsor con acero Chronit T1 400, recubierto con dos capas del electrodo OK 83.58 Plus:

$$Costo\ de\ prod. = 243 + 2 * 50 + 150 + 100 = 593.00\ Soles$$

- Impulsor con acero Hardox 450, recubierto con dos capas del electrodo Citodur 1000:

$$Costo\ de\ prod. = 243 + 2 * 140 + 150 + 100 = 773.00\ Soles$$

- Impulsor con acero Hardox 450, recubierto con dos capas del electrodo OK 83.58 Plus:

$$Costo\ de\ prod. = 243 + 2 * 50 + 150 + 100 = 593.00\ Soles.$$

Los costos de producción de los impulsores propuestos son relativamente similares, la diferencia de los precios de los electrodos es determinante para marcar una variación en el costo de producción, siendo el electrodo Citodur 1000 el que tiene mayor precio.

Realizando una comparación del costo de producción de impulsores de bombas centrífugas utilizados actualmente en la minería aluvial y los impulsores que se proponen en la investigación, la diferencia es aproximadamente de s/ 150 a s/ 300 soles por impulsor fabricado, pero si nos centramos en el tiempo de vida útil que los impulsores presentan en función a la resistencia al

desgaste por abrasión y dureza, se podría indicar que hay una marcada diferencia. Por lo tanto, se infiere que los impulsores propuestos serán más eficientes y productivos

Tabla 37

Costos de producción combinación de acero y recubrimiento.

Material base	Electrodo	Dureza HRC	Costo de producción (S/.)
Chronit T1 400	Citodur 100	56	773
Hardox 450	Citodur 100	54.625	773
Hardox 450	OK 83.58 Plus	48.625	593
Chronit T1 400	OK 83.58 Plus	49.2	593
ASTM A36	E 7018	45	415

Nota. Costos de producción para cada combinación, especificando la dureza HRC de las mismas.

Según Oerlikon, (2008) menciona que el tiempo de recambio del impulsor de una bomba centrífuga artesanal se realiza cada 3 días aproximadamente, además indica que la superficie posee una dureza de 45 HRC. De acuerdo a ello, se hizo una comparación del ciclo de vida entre el impulsor tradicional, y el impulsor fabricado con el acero Chronit T1 400 revestido con dos capas del electrodo Citodur 1000.

$$45 \text{ HRC} \rightarrow 3 \text{ Días}$$

$$56 \text{ HRC} \rightarrow X \text{ Días}$$

$$\frac{56 \text{ HRC} * 3 \text{ DÍAS}}{45 \text{ HRC}} = 3.73 \text{ DÍAS}$$

$$3.73 \text{ días, multiplicado por 2 capas de recubrimiento} = 7.46 \text{ Días.}$$

El ciclo de recambio del impulsor, con el empleo de recubrimientos con dos capas de Citodur 1000 incrementa en más del doble de días de duración.

- Determinación de la frecuencia de recambio mensual del impulsor por desgaste:

$$\frac{30 \text{ días}}{3 \text{ días}} = 10 \text{ veces de recambio mensual para el impulsor tradicional}$$

$$\frac{30 \text{ días}}{7.5 \text{ días}} = 4 \text{ veces de recambio mensual para el impulsor propuesto}$$

- Determinación de gastos de mantenimiento:

Se debe tener en consideración el alto costo de transporte fluvial en la minería aluvial de la región Madre de Dios, un aproximado de 100 Soles, además se asume 400 Soles por el costo de reparación del impulsor tradicional y 600 Soles por el impulsor propuesto.

- Costo de mantenimiento para el impulsor tradicional.

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 10(\text{transporte} + \text{costo de reparación})$$

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 10(100 + 400)$$

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 5000 \text{ soles}$$

- Costo de mantenimiento para el impulsor propuesto.

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 4(\text{transporte} + \text{costo de reparación})$$

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 4(100 + 600)$$

$$\text{Gastos mantenimiento mensual} = 2800 \text{ soles}$$

Haciendo una diferencia entre el gasto mensual ocasionado por el mantenimiento del impulsor tradicional y el impulsor propuesto. Se puede observar que la cantidad recuperada es aproximadamente 2200 soles mensuales.

$$5000 - 2800 = 2200 \text{ soles}$$

Conclusiones

De acuerdo a los resultados de las pruebas experimentales, análisis microestructural y estadístico, se llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Conforme al objetivo general planteado; se concluye que la resistencia al desgaste por abrasión depende de la microestructura de la capa depositada y el número de pases de revestimiento. El tamaño y forma de los carburos presentes en la microestructura de un recubrimiento son determinantes para la buena resistencia al desgaste. El análisis estadístico de los ensayos de pérdida de volumen por desgaste abrasivo afirma que el tipo de electrodo de recubrimiento es el factor con mayor incidencia sobre la variable respuesta.

La ecuación de regresión que predice la pérdida de volumen (Y) está representada por:

$$Y = 0.05016 - 0.00834 X_1 - 0.03177 X_2 - 0.00579 X_3 + 0.01287 X_1 * X_2 + 0.00408 X_1 * X_3 - 0.00123 X_2 * X_3 - 0.00564 X_1 * X_2 * X_3$$

2. Los recubrimientos con el electrodo Citodur 1000 muestran pérdidas de volumen promedio menor, 2.968 mm³ (56 HRC) y 5.782 mm³ (54.625 HRC) (Figura 69), con una microestructura conformada de carburos de cromo hexagonales y alargados en una matriz martensítica y austenita. En contraste, los recubrimientos con el electrodo OK 83.58 muestra pérdidas de volumen promedio altas de 75.237 mm³ (49.200 HRC) y 65.269 mm³ (48.625) (Figura 69), con microestructuras conformadas de carburos de cromo alargados en matriz martensítica.
3. La aplicación de dos capas de recubrimiento ofrece mejor resistencia al desgaste, se determinó un promedio de pérdida de volumen mínimo de 2.968 mm³ (56 HRC) y máximo de 75.237 (49.200 HRC) (Figura 69). En comparación con las obtenidas con una capa de recubrimiento, se determinó un promedio de pérdida de volumen mínimo de 8.474 mm³ (56.050 HRC) y máximo 89.647 mm³ (51.800 HRC) (Figura 69). En ambos casos se

observó formación de carburos de cromo hexagonales en mayor y menor proporción respectivamente.

4. La resistencia al desgaste y dureza fueron relativamente superiores para los recubrimientos en el acero Chronit T1 400 (pérdida de volumen min. 2.968 mm³-56.00 HRC) con una microestructura de carburos de cromo hexagonales en la capa de recubrimiento. En comparación con los recubrimientos en el acero Hardox 450 (pérdida de volumen min. 5.782 mm³-54.652 HRC) con microestructura de carburos de cromo alargados en la capa de recubrimiento, en ambos casos en una matriz martensita y austenita.

Recomendaciones

- Por las características del abrasivo, los resultados de las pruebas de desgaste según la norma ASTM G65 realizadas en laboratorio son aplicables para la fabricación de impulsores de bombas centrífugas para la extracción de grava en minería aluvial de la zona de Madre de Dios.
- Se recomienda realizar estudios de desgaste por impacto a las probetas evaluadas ya que la cavitación, erosión y percusión son factores que están presentes también en el trabajo de las bombas centrífugas artesanales.
- Para aplicaciones de extracción de grava en la minería aluvial, se recomienda fabricar los impulsores de bombas artesanales a base de acero antiabrasivo Chronit 400, con dos pases de recubrimiento con el electrodo Citodur 1000.
- Realizar controles periódicos de los cambios de temperatura durante el proceso de corte de metales para evitar variaciones en la microestructura de las probetas recubiertas.
- Para posteriores ensayos de desgaste por abrasión de metales, se recomienda diseñar un tribómetro de desgaste por abrasión bajo la norma ASTM G65.

Bibliografía

- American Society for Metals. (1992). *Friction, lubrication, and wear technology* (First edition, Vol. 18). ASM International Handbook Committee.
- Askeland, D., Fulay, P., & Wright, W. (2012). *Ciencia e ingeniería de materiales* (S. Cervantes, Ed.; sexta edición). Cengage Learning.
- ASTM International. (2016). ASTM G65. *ASTM*.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to physical metallurgy*. In McGraw Hill Book Company (Second Edition). McGraw-Hill.
- AWS. (2004). *Welding Handbook: Welding Processes, part 1*. In American Welding Society (Vol. 2).
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (Second Edition). Wiley.
- BOHLER. (2022). *Manual de aceros especiales*.
<https://www.voestalpine.com/highperformancemetals/peru/es/descargas/>
- Borrero, A., & Gil, C. (1995). *Bombas centrífugas*. Universidad Autónoma de Occidente.
- Calderón, J. (2021). Modelo uliram para determinar nuevas composiciones químicas para materiales de aporte. *Tesis Digitales UNMSM*.
- Carbajal, D., Cortés, E., & Pérez, J. (2014). *Influencia del tipo de electrodo y número de pases de soldadura sobre la resistencia al desgaste por abrasión en el proceso de Hardfacing*. Universidad Libre. <https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/7840>
- Dirección de Promoción Minera. (2023). *Anuario minero 2022, Ministerio de Energía y Minas*. www.gob.pe/minem
- Guemes, Algreo., & Martin, Nuria. (2012). *Ciencia de materiales para ingenieros* (Primera edición). Pearson. <http://fullengineeringbook.blogspot.com>

- Hernández, R., & Mendoza, C. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. In McGraw Hill México (Primera edición). Mc Graw Hill.
- Hobart Filler Metals Application Departmen. (2020). *Hardfacing Technical Welding Guide*. Hobart Brothers Company. www.osha.gov
- Horwitz, H. (1976). *Soldadura: Aplicaciones y práctica*. In Alfaomega (Primera edición). Alfaomega.
- Howard, C. (1992). *Manual de soldadura moderna* (E. Jones, Ed.; Segunda Edición, Vol. 2). Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Ingemecánica. (2015). *Características mecánicas del acero*. <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>
- ISO/TR 13393:2009. (2009). *Welding consumables-Hardfacing classification-Microstructures*. <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:tr:13393:ed-1:v1:en>
- Jauja, M. (2014). *Estudio experimental de la resistencia al desgaste por abrasión para depósitos con recubrimiento protector de soldadura, empleando el electrodo: E6-UM-60 (clasificación DIN 8555), Proceso SMAW*. [Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2913>
- Jeffus, L. (2012). *Welding Principle and Applications*. In IEEE Transactions on Information Theory (Vol. 58, Issue 3).
- Karassik, I. J., Messina, J. P., Cooper, P., & Heald, C. C. (2008). *Pump Handbook* (4th ed.). McGraw-Hill

- Konat, Ł., Zemlik, M., Jasiński, R., & Grygier, D. (2021). Austenite grain growth analysis in a welded joint of high-strength martensitic abrasion-resistant steel Hardox 450. *Materials*, 14(11), 2850. <https://doi.org/10.3390/ma14112850>
- Kou, S. (2002). *Welding Metallurgy*. In *Welding Metallurgy*. <https://doi.org/10.1002/0471434027>
- Kumar, I., & Verma, S. C. (2017). *Effect of Multilayer Hardfacing on Metallurgical and Wear Behaviour of Mild Steel using SMAW Process*. *SJ Impact Factor*:6, 887.
- Krüger, S., Martin, N., & Dupont, P. (2010). *Assessment of wear erosion in pump impellers*. In *Proceedings of the 26th International Pump Users Symposium (pp. 51–56)*. Turbomachinery Laboratory, Texas A&M University.
- Maleque, M. A., & Salit, M. S. (2013). *Mechanical Failure of Materials*. In *SpringerBriefs in Materials*. https://doi.org/10.1007/978-981-4560-38-2_2
- Mendoza, J. (2014). *Aceros resistentes a la abrasión*. In *Avances en Tratamientos Térmicos (pp. 49–55)*. Aceros Bohler del Perú.
- Ministerio del Ambiente. (2016, September 23). *Manual de buenas prácticas en minería aurífera aluvial para facilitar una adecuada recuperación de áreas*. Ministerio Del Ambiente. <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/110>
- Noriega, A. (2013). *Resistencia al desgaste por abrasión de recargues duros fabricados con electrodos con 5% de FeTi y contenido variable de FeV* [Pontificia Universidad Católica del Perú]. <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4938>
- Phillips, D. H. (2015). *Welding Engineering: An Introduction*. In *Welding Engineering: An Introduction*. <https://doi.org/10.1002/9781119191407>

- Ramakesavulu, G. (2017). *Study of Wear Characteristics of Hardfaced Layers made by E430 and E410 Electrodes using SMAW Process*. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, V(VIII).
<https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.8233>
- Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura* (Tercera edición). McGraw-Hill.
- Ship Structure Ccommittee. (1991). *Carbon equivalence and weldability of microalloyed steels*. <http://www.shipstructure.org/pdf/357.pdf>
- Soldexa. (2015). *Manual de soldadura y catálogos de productos*. (Sétima edición).
www.soldexa.com.pe
- SSAB. (2023). *Hardox® 450: Excelencia en Resistencia y Durabilidad*.
<https://www.ssab.com/es-mx/marcas-y-productos/hardox/programa-de-producto/450>
- Stachowiak, G. (2005). *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*. In *Wear – Materials, Mechanisms and Practice*. <https://doi.org/10.1002/9780470017029>
- Vidal, F., & Hoyos, N. (2017). *Resistencia al desgaste abrasivo de un recubrimiento duro aplicado por soldadura eléctrica de arco revestido* [Universidad de Córdoba].
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/handle/ucordoba/657>
- Zubicaray Viejo. (2000). *Bombas: teoría, diseño y aplicaciones* (Primera edición). Limusa.

ANEXOS

MATRIZ DE CONSISTENCIA.

RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON RECUBRIMIENTOS DUROS MEDIANTE EL PROCESO SMAW. CASO TAMBOPATA-MADRE DE DIOS. (Investigación Tecnológica)				
Problema	Objetivo	Hipótesis	VARIABLES - Dimensiones	Metodología
<p>Problema general: PG: ¿Cómo influirá la aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en la resistencia al desgaste del impulsor de una bomba centrífuga artesanal elaborada en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450?</p>	<p>Objetivo general: OG: Evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 aplicados mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.</p>	<p>Hipótesis general: HG: La resistencia al desgaste por abrasión en impulsores de bombas centrífugas artesanales elaborados en aceros antiabrasivos Chronit T1 400 y Hardox 450 se incrementa significativamente con la aplicación de recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 mediante el proceso SMAW.</p>	<p>VARIABLES dependientes: VD: Resistencia al desgaste abrasivo.</p> <p>Dimensiones:</p> <p>IVD-1: Pérdida de volumen según ASTM G65</p> <p>IVD-2: Dureza</p> <p>IVD-3: Microestructura</p>	<p>Tipo de Investigación: Investigación tecnológica.</p> <p>Nivel de investigación: Correlacional con enfoque cuantitativo y diseño experimental.</p> <p>Población: La población en estudio se centra en los impulsores de bombas centrífugas artesanales elaborados en aceros antiabrasivos (Chronit T1 400 y Hardox 450) con recubrimientos duros (OK 83.58 plus, Citodur 1000) mediante el proceso SMAW.</p> <p>Muestra: -16 muestras o probetas para pérdida de volumen y dureza dureza. -8 muestras probetas para metalografía.</p> <p>Diseño experimental: Diseño factorial completo 2³ con dos réplicas, tres factores con dos niveles cada uno. 16 corridas para caracterización del sistema con interacción.</p> <p>Técnicas de recolección de información: Experimental y observación</p> <p>Técnica de análisis de datos: Estadística inferencial y descriptiva, Regresión lineal múltiple y análisis de imágenes.</p>
<p>Problemas específicos: PE1: ¿Influirá el material de aporte OK 83.58 Plus y Citodur 1000 en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?</p> <p>PE2: ¿Influirá el número de pases de recubrimiento de 1 capa y 2 capas en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?</p> <p>PE3: ¿Influirá el tipo de acero antiabrasivo Chronit T1 400 y Hardox 450 en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal?</p>	<p>Objetivos específicos: OE1: Determinar la influencia del material de aporte: OK 83.58 Plus y Citodur 1000, de acuerdo a la pérdida de volumen, la microestructura y la dureza del recubrimiento; aplicado mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.</p> <p>OE2: Determinar el efecto del número de pases de recubrimiento basado en la pérdida de volumen, la microestructura y la dureza del recubrimiento; aplicado mediante el proceso SMAW en aceros antiabrasivos empleados en impulsores de bombas centrífugas artesanales.</p> <p>OE3: Determinar la influencia del tipo de acero antiabrasivo Chronit T1 400 y Hardox 450 en la resistencia al desgaste del recubrimiento del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.</p>	<p>Hipótesis específicas: HE1: La aplicación de los recubrimientos duros OK 83.58 Plus y Citodur 1000 mejora la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.</p> <p>HE2: La aplicación de 2 capas de recubrimiento brinda mayor resistencia al desgaste por abrasión en comparación al recubrimiento de 1 capa en el impulsor de una bomba centrífuga artesanal.</p> <p>HE3: El uso de metales base Chronit T1 400 y Hardox 450 influyen positivamente en la resistencia al desgaste por abrasión del impulsor de una bomba centrífuga artesanal.</p>	<p>VARIABLES independientes: VI-1: Electroodos de Recubrimientos Duros</p> <p>Dimensiones: IVI1-1: Material de aporte. (OK 83.58 plus, Citodur 1000)</p> <p>VI-3: Capas o Pases de recubrimiento.</p> <p>Dimensiones: IVI3: Numero de pases (1° Y 2° Pases).</p> <p>VI-2: Acero.</p> <p>Dimensiones: IVI2-1: Tipo de acero (Chronit T1 400, Hardox 450)</p>	

Nota: Elaboración propia.

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.

RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON RECUBRIMIENTOS DUROS MEDIANTE EL PROCESO SMAW. CASO TAMBOPATA-MADRE DE DIOS.						
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	INSTRUMENTOS
Resistencia al desgaste abrasivo. (VD)	El desgaste se puede describir como el proceso de deterioro que ocurre en una superficie sólida debido al contacto o rozamiento con sustancias, lo cual provoca una disminución gradual del volume del material. (American Society for Metals, 1992)	Los resultados de la prueba de desgaste por abrasión deben expresarse en términos de la disminución de volumen, medida en milímetros cúbicos, siguiendo el método empleado durante la prueba.	Pérdida de volumen	volumen desgastado	cm^3	Tribómetro de desgaste de arena seca y rueda de caucho según norma ASTM G65.
		Se emplea una esfera como indentador con un diámetro "D". Luego se determina el diámetro "d" de la marca o huella dejada en la superficie después de aplicar una fuerza "F".	Dureza	Diámetro de la huella del indentador.	Rockwell (RC)	Pruebas de dureza mediant el Ensayo de Dureza HRC con uso de durómetro de banco de la marca LECO LCR-500.
		Se ataca con reactivo químico para revelar la microestructura presente y las fases en el acero, se emplea microscopio optico para observar la microestructura.	Microestructura	Fases	Martensita Carburos	Microscopio metalográfico PETIP. Observacion microscópica
Recubrimientos Duros (VI)	Implica la deposición de recubrimientos duros, ejemplo Citodur 1000, OK83.58 y otros. Sobre una parte de metal mediante varios métodos de soldadura, con el fin de crear una superficie que sera capaz de soportar la abrasión, los impactos, etc. ya sea de manera individual o combinada. (Horwitz, 1976)	Composición química y diseño de acuerdo al tipo de electrodo y uso según catálogo.	Material de aporte o electrodo	Composición química.	Porcentaje (%)	Recomendado en la ficha técnica.
Pases de recubrimiento (VI)	Se refieren a las múltiples capas de material aplicadas sobre una superficie base para mejorar sus propiedades, como la resistencia al desgaste, Estas capas pueden consistir en diferentes metales o aleaciones y se aplican mediante varios métodos de soldadura, como la soldadura por arco, entre otros. (AWS, 2015)	Cantidad de veces que se aplica material de recubrimiento duro en capas sucesivas durante el proceso de soldadura.	Capas de revestimiento	Número de pases.	Primera capa Segunda capa	Definido por ficha técnica. Soldadura manual mediante el procedimiento SMAW.
Aceros antiabrasivos (VI)	El acero se compone de hierro mezclado con carbono, cuyo porcentaje puede oscilar entre 0.02% y 2.11%. (AWS, 2004) Existen diferentes tipos de aceros según los requerimientos, ejm. aceros antiabrasivos como, Hardox 450 y Chronit 400, etc. con elementos de aleación como manganeso, cromo, níquel y molibdeno, etc.	Clasificación y categorización de los aceros basada en sus propiedades químicas, mecánicas y metalúrgicas según catálogo.	Tipos de acero antiabrasivos	Propiedades mecánicas (dureza)	Brinell (HB)	Definido por ficha técnica. Referenciado en el catálogo

Nota: Elaboración propia.

FICHA DE TÉCNICA DEL ELECTRODO CITODUR 1000.

SMAW

Recubrimiento Protector



CITODUR 1000

Electrodo para recargue de gran resistencia a la corrosión oxidación y abrasión severa. El material depositado es una fundición blanca con alto contenido de cromo (36%), por lo que, se recomienda aplicar 2 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 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.

Clasificación	
AWS A5.13 / ASME SFA-5.13	EFeCr-A8
DIN 8555	E10 - UM 60 CGRZ

Análisis Químico de Metal Depositado (valores típicos) [%]

C	Mn	Si	P	S	Mo	Ni	Cr	Cu	Otros
4,00	1,10	0,60	máx. 0,020	máx. 0,020	-	-	36,00	-	-

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
Sin tratamiento	-	-	-	-	58 - 62 HRC

Conservación del Producto
<ul style="list-style-type: none"> Mantener en un lugar seco y evitar humedad. No requiere almacenamiento bajo horno. Resecado de 300°C a 350°C por 2 horas.

Posiciones de Soldadura

Parámetros de Soldado Recomendados

Para corriente alterna(AC) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP							
Diámetro	[mm]	1,60	2,50	3,25	4,00	5,00	6,30
	[pulgadas]	1/16	3/32	1/8	5/32	3/16	1/4
Amperaje mínimo	-	-	-	120	150	180	-
Amperaje máximo	-	-	-	140	160	230	-

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 todas 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.

FICHA TÉCNICA DEL ELECTRODO OK 83.58 PLUS

Electrodo Revestido (SMAW)
Recubrimiento protector



OK 83.58 PLUS

Revestimiento tipo ajedrez en cucharones y dientes de excavadoras, recuperación de piezas para trituradoras, molinos y mezcladores, sinfín de alimentadores, chapas de desgaste para revestimiento duro en partes de máquinas expuestas al desgaste por minerales, piedra, arena, suelo, coque, etc.

CLASIFICACIÓN ELECTRODO	~AWS A5.13 EFe3 DIN 8555: E 6-UM-60-R			
TIPO DE CORRIENTE	CC (+) / CA ≥ 70 V			
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL METAL DEPOSITADO (VALORES TÍPICOS)				
Condición		Dureza (HRC)		
Como soldado (Resistente al calor a 500 °C)		55 HRC		
ANÁLISIS QUÍMICO DE METAL DEPOSITADO [%] (VALORES TÍPICOS)				
C	Si	Mn	Cr	Mo
0.60	0.60	0.70	6.80	0.50
PARÁMETROS DE SOLDEO Y DEPOSICIÓN				
Diámetro in (mm)	Intensidad de Corrientes (A)	Voltage (V)	n (kg / 100 varillas)	H (kg metal/ 1 hora de arco)
3/16 (5.00)	190 - 240	20 - 27	17.8	2.9
Información para pedidos				
OK 83.58 PLUS 5.00x150mm 25.00kg LT			810721	



FICHA TÉCNICA DE ACERO CHRONIT T1 400.

PLANCHAS ANTIABRASIVAS

TIPO T1 500 – 400 BHN

Descripción: La plancha anti abrasiva es un producto de acero plano fabricada especialmente para que tenga una larga duración en condiciones severas. Los diseñadores, ingenieros y operarios de planta prefieren las planchas antiabrasivas cuando buscan extender la vida útil de componentes críticos y reducir su peso. Es adecuada en diversas áreas dentro de la construcción y minería. Vienen en presentaciones de 2.4mts, 3.0mts y 6.0mts. Para otras dimensiones, previa consulta.

Aplicaciones: Se utilizan para la fabricación convoys, excavadoras, hojas de corte de árboles, placas de desgaste, revestimiento de canaletas y secadoras, tolvas, trituradoras, vertederos, volquetes, entre otras.

Norma de fabricación: NM500 – NM 400

Composición Química:

ELEMENTO	400	500
C	0.20	0.30
Si	0.50	0.50
Mn	1.80	1.80
P	0.025	0.025
S	0.010	0.010
Mo	0.50	0.50

ELEMENTO	400	500
Ni	0.80	1.00
Cr	1.00	1.50
V	0.08	0.08
Nb	0.05	0.05
B	0.005	0.005

Propiedades Mecánicas:

NORMA TÉCNICA	Limite de Fluencia (F)	Resistencia a la Tracción (R)	Elongación (A)	Dureza
	Kg/mm ²	Kg/mm ²	%	HB
ANTI ABRASIVA 400	102	132	12	400
ANTI ABRASIVA 500	132	168	8	500

FICHA TÉCNICA DEL ACERO HARDOX 450

HARDOX[®]
ACERO ANTIDESGASTE

Ficha Técnica: Versión 2008-05-10

Hardox 450

Página: 1 (2)

ACERO ANTIDESGASTE

Hardox 450 es un acero antidesgaste con una dureza aproximada de 450 HBW, concebida para aplicaciones que exigen resistencia al desgaste junto a buenas propiedades para el conformado en frío. Hardox 450 presenta muy buena soldabilidad.

Aplicaciones

Cajas de volquetes, containers, trituradoras, cribas, tolvas, alimentadores dosificadores, elevadores, canchales para minas, cucharas, cuchillas para cargadores, transportadores, cuchillas de corte, piñones y poleas para cadenas, moquinas cargadoras, camiones, máquinas de movimiento de tierras, excavadoras, tuberías as sometidas a desgaste, transportadores de tornillo sin fin, prensas, etc.

Composición química
(análisis de colada)

Espesor de acero (pulg.)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B	CEV	CET
	máx %	valores típicos	valores típicos								
$1/8$ - $1/4$	0.21	0.70	1.60	0.025	0.010	0.25	0.25	0.25	0.004	0.41	0.30
$1/4$ - $3/8$	0.21	0.70	1.60	0.025	0.010	0.50	0.25	0.25	0.004	0.47	0.34
$3/8$ - $1/2$	0.23	0.70	1.60	0.025	0.010	1.00	0.25	0.25	0.004	0.57	0.37
$1/2$ - 2	0.23	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	0.25	0.60	0.004	0.59	0.36
2 - $3 1/2$	0.26	0.70	1.60	0.025	0.010	1.40	1.00	0.60	0.004	0.72	0.41

*1 Acero de espesor inferior a $1/8$ pulg., solo tras acuerdo especial.

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

El acero es de grado fino.

Dureza

HBW
425-475

Propiedades mecánicas

Valor típico de acero de
 $1/2$ pulg. plate espesor

Límite elástico	Carga de rotura	Alargamiento
R_{eL}	R_m	A_5
KSI	KSI	%
175	205	14

Resiliencia

Valor típico de acero de
 $1/2$ pulg. plate espesor

Ensayo de temperatura	Energía de impacto
Charpy-V, probeta longitudinal	
°C	ft-lbs (J)
-40 (40 F)	30 (40)

Ensayos

Ensayo de dureza Brinell, según EN ISO 6506-1, en superficie maquinada 0.02 - 0.80 pulgs bajo la superficie de acero, por colada y 40 Tr. Los ensayos se realizan para cada variación de $1/8$ pulg. en el espesor de aceros de la misma colada.

Condiciones de suministro

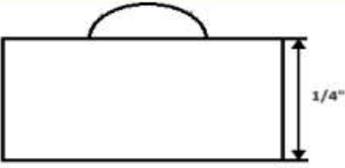
Q.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (1)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA							
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						PAGINA
Código de soldadura empleado:							
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco						
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra						
Proceso de soldadura	SMAW						
Tipo	Manual		Automático	X	Semiautomático		
Fecha	16/02/2023						
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN			
Tipo de junta	-			Ranura	-	Filete	-
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento			Plancha	1G	Tubería	-
Abertura de raíz	-			CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS			
Longitud de raíz	-						
Angulo de la ranura	-						
Soporte	-			Corriente:			
Material de aporte				DC	-	DCEP	X
Limpieza de la raíz	-			PULSO	-	DCEN	-
METAL BASE				TÉCNICA			
Especificación	HARDOX® 450 HBN			Aportación	Oscilación	X	Recta -
Grupo	1			Pase	Múltiple	-	Simple X
Grado	-			PRECALENTAMIENTO			
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento -			
Diámetro	-			Temperatura de interpase -			
METAL DE APORTE				POSTCALENTAMIENTO			
				Temperatura	-	Tiempo	-
METAL DE APORTE				PROTECCIÓN			
Especificación AWS	A5.1			Fundente	Revestimiento	Gas	-
Clasificación AWS	E7018-1 H4			Composición	-	Composición	-
Marca	NAZCA					Vel. De flujo	-
Diámetro	1/8"						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Nº pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje		
1	SMAW	NAZCA PRO E7018	1/8"	DCEP	90 A.	21 V.	2
DETALES DE LA SOLDADURA							
							
Elaborado por:	Edison W. Chancuña M.			Fecha:	16/02/2023		
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC		

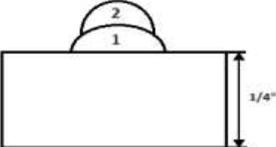
Nota: Elaboración propia.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (2)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA								
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA					PAGINA		
Código de soldadura empleado:								
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco							
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra							
Proceso de soldadura	SMAW							
Tipo	Manual		Automático	X	Semiautomático			
Fecha	16/02/2023							
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN				
Tipo de junta	-			Ranura	-		Filete	-
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento			Plancha	1G		Tubería	-
Abertura de raíz	-			CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS				
Longitud de raíz	-							
Angulo de la ranura	-							
Soporte	-			Corriente:				
Material de aporte				DC	-		DCEP	X
Limpieza de la raíz	-			PULSO	-		DCEN	-
METAL BASE				TÉCNICA				
Especificación	CHRONIT T1 400 HBW			Aportación	Oscilación	X	Recta	-
Grupo	1			Pase	Múltiple	-	Simple	X
Grado	-			PRECALENTAMIENTO				
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento				-
Diámetro	-			Temperatura de interpase				-
METAL DE APORTE				POSTCALENTAMIENTO				
				Temperatura	-		Tiempo	-
METAL DE APORTE				PROTECCIÓN				
Especificación AWS	A5.1			Fundente	Revestimiento	Gas	-	
Clasificación AWS	E7018-1 H4			Composición	-		Composición	-
Marca	NAZCA					Vel. De flujo	-	
Diámetro	1/8"							
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA								
N° pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)	
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje			
1	SMAW	NAZCA PRO E7018	1/8"	DCEP	90 A.	21 V.	2	
DETALES DE LA SOLDADURA								
								
Elaborado por:	Edison W. Chancuaña M.			Fecha:	16/02/2023			
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC			

Nota: Elaboración propia.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (3)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA							
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						PAGINA
Código de soldadura empleado:							
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco						
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra						
Proceso de soldadura	SMAW						
Tipo	Manual	Automático	X	Semiautomático			
Fecha	16/02/2023						
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN			
Tipo de junta	-			Ranura	-	Filete	-
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento			Plancha	1G	Tubería	-
Abertura de raíz	-			CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS			
Longitud de raíz	-						
Angulo de la ranura	-						
Soporte	-			Corriente:			
Material de aporte				DC	-	DCEP	X
Limpieza de la raíz	-			PULSO	-	DCEN	-
METAL BASE				TÉCNICA			
Especificación	HARDOX® 450 HBN			Aportación	Oscilación	X	Recta
Grupo	1			Pase	Múltiple	-	Simple
Grado	-			PRECALENTAMIENTO			
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento			-
Diámetro	-			Temperatura de interpase			-
				POSTCALENTAMIENTO			
				Temperatura	-	Tiempo	-
METAL DE APORTE				PROTECCIÓN			
Especificación AWS	A5.13			Fundente	Revestimiento	Gas	-
Clasificación AWS	E fe3 (DIN 8555:E 6-UM-60-R)			Composición	-	Composición	-
Marca	ESAB			Vel. De flujo			-
Diámetro	3/16"						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
Nº pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje		
1	SMAW	OK 83.58 PLUS	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
2	SMAW	OK 83.58 PLUS	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
DETALES DE LA SOLDADURA							
							
Elaborado por:	Edison W. Chancuaña M.			Fecha:	16/02/2023		
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC		

Nota: Elaboración propia.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (4)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA							
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA					PAGINA	
Código de soldadura empleado:							
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco						
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra						
Proceso de soldadura	SMAW						
Tipo	Manual		Automático	X	Semiautomático		
Fecha	16/02/2023						
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN			
Tipo de junta	-		Ranura	-	Filete	-	
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento		Plancha	1G	Tubería	-	
ABERTURA DE RAÍZ							
Abertura de raíz	-						
LONGITUD DE RAÍZ							
Longitud de raíz	-						
ANGULO DE LA RANURA							
Angulo de la ranura	-						
SOPORTE							
Soporte	-						
CORRIENTE							
Material de aporte			DC	-	DCEP	X	
Limpieza de la raíz	-		PULSO	-	DCEN	-	
METAL BASE				TÉCNICA			
Especificación	CHRONIT TI 400 HBW			Aportación	Oscilación	X	Recta
Grupo	1			Pase	Múltiple	-	Simple
Grado	-			PRECALENTAMIENTO			
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento			-
Diámetro	-			Temperatura de interpase			-
POSTCALENTAMIENTO							
				Temperatura		-	Tiempo
							-
METAL DE APORTE							
PROTECCIÓN							
Especificación AWS	A5.13			Fundente	Revestimiento	Gas	-
Clasificación AWS	Efe3 (DIN 8555:E 6-UM-60-R)			Composición	-	Composición	-
Marca	ESAB					Vel. De flujo	-
Diametro	3/16"						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
N° pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje		
1	SMAW	OK 83.58 PLUS	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
2	SMAW	OK 83.58 PLUS	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
DETALES DE LA SOLDADURA							
Elaborado por:	Edison W. Chancuaña M.			Fecha:	16/02/2023		
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC		

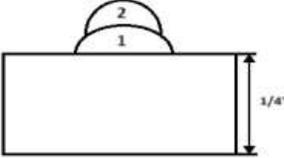
Nota: Elaboración propia.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (5)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA								
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						PAGINA	
Código de soldadura empleado:								
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco							
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra							
Proceso de soldadura	SMAW							
Tipo	Manual		Automático	X	Semiautomático			
Fecha	16/02/2023							
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN				
Tipo de junta	-			Ranura	-	Filete	-	
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento			Plancha	1G	Tubería	-	
Abertura de raíz				CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS				
Longitud de raíz	-							
Angulo de la ranura	-							
Soporte	-			Corriente:				
Material de aporte			DC	-	DCEP	X		
Limpieza de la raíz	-		PULSO	-	DCEN	-		
METAL BASE				TÉCNICA				
Especificación	HARDOX® 450 HBN			Aportación	Oscilación	X	Recta -	
Grupo	1			Pase	Múltiple	-	Simple X	
Grado	-							
PRECALENTAMIENTO								
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento				-
Diámetro	-			Temperatura de interpase				-
POSTCALENTAMIENTO								
			Temperatura	-	Tiempo		-	
METAL DE APORTE				PROTECCIÓN				
Especificación AWS	A5.13			Fundente	Revestimiento	Gas	-	
Clasificación AWS	EfeCr-A8			Composición	-	Composición	-	
Marca	NAZCA					Vel. De flujo	-	
Diámetro	3/16"							
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA								
Nº pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)	
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje			
1	SMAW	CITODUR 1000	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2	
2	SMAW	CITODUR 1000	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2	
DETALES DE LA SOLDADURA								
Elaborado por:	Edison W. Chancuaña M.			Fecha:	16/02/2023			
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC			

Nota: Elaboración propia.

ESPECIFICACIÓN PARA EL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) (6)

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA							
WPS	ESPECIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA						PAGINA
Código de soldadura empleado:							
Institución	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco						
Nombre del soldador	Raul Allauca Sierra						
Proceso de soldadura	SMAW						
Tipo	Manual		Automático	X	Semiautomático		
Fecha	16/02/2023						
DISEÑO DE LA JUNTA				POSICIÓN			
Tipo de junta	-			Ranura	-	Filete	-
Tipo de soldadura	Recargue o recubrimiento			Plancha	1G	Tubería	-
Abertura de raíz				CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS			
Longitud de raíz	-						
Angulo de la ranura	-						
Soporte	-			Corriente:			
Material de aporte				DC	-	DCEP	X
Limpieza de la raíz	-			PULSO	-	DCEN	-
METAL BASE				TÉCNICA			
Especificación	CHRONIT T1 400 HBW			Aportación	Oscilación	X	Recta
Grupo	I			Pase	Múltiple	-	Simple
Grado	-						
PRECALENTAMIENTO							
Espesor	1/4"			Temperatura de precalentamiento			-
Diámetro	-			Temperatura de interpase			-
POSTCALENTAMIENTO							
				Temperatura	-	Tiempo	-
METAL DE APORTE				PROTECCIÓN			
Especificación AWS	A5.13			Fundente	Revestimiento	Gas	-
Clasificación AWS	E ₇₀ Cr-A8			Composición	-	Composición	-
Marca	NAZCA					Vel. De flujo	-
Diametro	3/16"						
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA							
N° pases	Proceso	Material de aporte		Corriente		Voltaje (v)	Vel. De desplazamiento (mm/seg)
		Clase	Diámetro	Tipo de polaridad	Amperaje		
1	SMAW	CITODUR 1000	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
2	SMAW	CITODUR 1000	3/16"	DCEP	190 A.	21 V.	2
DETALES DE LA SOLDADURA							
							
Elaborado por:	Edison W. Chancuaña M.			Fecha:	16/02/2023		
Revisado por:	Ing. Alfredo T. Benito Aragón			Institución:	UNSAAC		

Nota: Elaboración propia.

CÁLCULO DE CARBONO EQUIVALENTE DEL ACERO CHRONIT T1 400.



Entrada de composición química (% en peso)				Equivalentes de carbono (% en peso)	
C(<0,8)	<input type="text" value="0.2"/>	Mes(<1,0)	<input type="text" value="0.5"/>	CE (IIW)	0,869
Si(<1,5)	<input type="text" value="0.5"/>	V(<0,1)	<input type="text" value="0.08"/>	CE (WES)	0,872
Manganeso(<3,0)	<input type="text" value="1.8"/>	Nb(<0,1)	<input type="text" value="0.05"/>	pcm	0,426
P(<0,025)		Ti(<0,1)	<input type="text" value="0"/>	CEn	0,873
S(<0,025)		Al(<0,1)	<input type="text" value="0"/>	Temperatura de transformación (°C) (Mn<2, Cu<1, Cr<2,5, Mo<0,5)	
Cu(<2,0)	<input type="text" value="0"/>	norte(<0,01)		Ac3	854,5
Ni(<10,0)	<input type="text" value="0.8"/>	O(<0,01)		Ac1	756.1
Cr(<10,0)	<input type="text" value="1"/>	B(<0,003)	<input type="text" value="0.003"/>	EM	351.2
<input type="button" value="Calcular"/>		<input type="button" value="Inicializar"/>		Código fuente actualizado el 12 de mayo de 2007 por NY	

Copyright © Sociedad Japonesa de Ingeniería de Soldadura. 2002-2023 TODOS los derechos reservados.

Nota: Determinación del carbono equivalente con simulador del “Japanese Welding Engineering Society”

Fuente: https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/calcl.jsp

CÁLCULO DE CARBONO EQUIVALENTE DEL ACERO HARDOX 450.

Chemical Composition Input(wt%)				Carbon Equivalents (wt%)	
C(<0.8)	<input type="text" value="0.21"/>	Mo(<1.0)	<input type="text" value="0.25"/>	CE(IIW)	0.643
Si(<1.5)	<input type="text" value="0.70"/>	V(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	CE(WES)	0.675
Mn(<3.0)	<input type="text" value="1.60"/>	Nb(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	Pcm	0.374
P(<0.025)		Ti(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	CEn	0.662
S(<0.025)		Al(<0.1)	<input type="text" value="0"/>	Transformation Temp (°C) (Mn<2, Cu<1, Cr<2.5, Mo<0.5)	
Cu(<2.0)	<input type="text" value="0"/>	N(<0.01)		Ac3	863.8
Ni(<10.0)	<input type="text" value="0.25"/>	O(<0.01)		Ac1	748.2
Cr(<10.0)	<input type="text" value="0.50"/>	B(<0.003)	<input type="text" value="0.003"/>	Ms	373.0
<input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Initialize"/>				May 12, 2007 updated Source code by N.Y	

Copyright © The Japan Welding Engineering Society. 2002-2023 ALL rights reserved.

Fuente: https://www-it.jwes.or.jp/weld_simulator/en/calc1.jsp

**INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DESGASTE POR
ABRASIÓN ASTM G65 (1/3).**



CA/LMSIM/120/2024

Lima, 11 de abril del 2024

Señor
EDISON WASHINGTON CHANCUAÑA MINGA
Presente-

Estimados Señores:

En relación con los ensayos realizados en nuestro laboratorio, correspondiente al servicio con código **MAT-FEB-0198-2024** y de acuerdo con el requerimiento indicado, hacemos extensiva la siguiente información adicional:

- ✓ **PROYECTO:** "RESISTENCIA AL DESGASTE DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRIFUGA ARTESANAL EN ACEROS ANTIABRASIVOS CON RECUBRIMIENTOS DUROS MEDIANTE EL PROCESO SMAW. CASO TAMBOPATA-MADRE DE DIOS"
- ✓ **TESISTAS:** EDISON WASHINGTON CHANCUAÑA MINGA – LUIS MIGUEL SALAS VALVERDE.
- ✓ **ASESOR:** ING. ALFREDO TOMAS BENITO ARAGON.

Atentamente,

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica


Dr. Ing. José Sebastián U. CIP 225139
Jefe del Laboratorio de Materiales

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DESGASTE POR ABRASIÓN ASTM G65 (2/3).



MAT-FEB-0198-1/2024

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 01

SOLICITADO POR : EDISON WASHINGTON CHANCUAÑA MINGA
DIRECCIÓN : Urb. Túpac Amaru – San Saebastian - Cusco
REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales – Analista 05.
MUESTRA : Probetas metálicas para ensayo de abrasión.
FECHA DE EMISIÓN : 2024.04.11.

RESULTADOS:

MUESTRA	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	VARIACIÓN (g)	OBSERVACIONES
1A	144,1269	143,4376	0,6893	---
2A	138,4873	138,0416	0,4457	---
3A	150,1642	150,0662	0,0980	---
4A	133,7261	133,5398	0,1863	---
5A	176,1578	175,5291	0,6287	---
6A	160,4112	159,8035	0,6077	---
7A	173,8855	173,8663	0,0192	---
8A	172,3433	172,2870	0,0563	---

Fecha de Ejecución: 2023.04.05.

OBSERVACIONES:

- Condición de la muestra: Visualmente en buen estado.
- La muestra ensayada fue proporcionada por el solicitante.
- El ensayo se realizó durante 10 minutos que equivale a una distancia lineal de recorrido de 1436 m.
- Diámetro de la rueda: 228 mm.
- Ancho de la rueda: 12,5 mm.
- Dureza de la rueda: 60 Shore A.
- Carga de la prueba: 130 N.
- Revoluciones de la rueda: 200 rpm.
- Flujo de arena: 325 g/min.
- Norma de Referencia: ASTM G65 – 16 (2021).

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.
 Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales.
 Los resultados no pueden ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

1 de 1

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP

Av. Universitaria 1801 – San Miguel.
 Lima – Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
 N° 1761 Lima 100 – Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
 (511) 626 - 2000
 Anexo: 4842

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
 Sección Ingeniería Mecánica

 Ing. José Sebastián G. CIF 20176
 Jefe del Laboratorio de Materiales

Nota: Informe emitido por el laboratorio de materiales PUCP.

INFORME DE RESULTADOS DE ENSAYO DE DESGASTE POR ABRASIÓN ASTM G65 (3/3).

LABORATORIO DE MATERIALES

CITEmateriales

Departamento de Ingeniería

Sección Ingeniería Mecánica



PUCP

CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

MAT-FEB-0198-2/2024

RESISTENCIA A LA ABRASIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.7

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 01

SOLICITADO POR : EDISON WASHINGTON CHANCUAÑA MINGA
DIRECCIÓN : Urb. Túpac Amaru – San Saebastian - Cusco
REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales – Analista 05.
MUESTRA : Probetas metálicas para ensayo de abrasión.
FECHA DE EMISIÓN : 2024.04.11.

RESULTADOS:

MUESTRA	MASA INICIAL (g)	MASA FINAL (g)	VARIACIÓN (g)	OBSERVACIONES
1B	146,4711	145,7618	0,7092	---
2B	145,9162	145,3249	0,5913	---
3B	140,3956	140,3614	0,0342	---
4B	135,4748	135,4357	0,0391	---
5B	160,9720	160,4269	0,5450	---
6B	136,3707	135,8603	0,5105	---
7B	170,3212	170,2941	0,0271	---
8B	163,4240	163,3901	0,0339	---

Fecha de Ejecución: 2024.04.05.

OBSERVACIONES:

- Condición de la muestra: Visualmente en buen estado.
- La muestra ensayada fue proporcionada por el solicitante.
- El ensayo se realizó durante 10 minutos que equivale a una distancia lineal de recorrido de 1436 m.
- Diámetro de la rueda: 228 mm.
- Ancho de la rueda: 12,5 mm.
- Dureza de la rueda: 60 Shore A.
- Carga de la prueba: 130 N.
- Revoluciones de la rueda: 200 rpm.
- Flujo de arena: 325 g/min.
- Norma de Referencia: ASTM G65 – 16 (2021).

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.
 Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales.
 Los resultados no pueden ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce

1 de 1

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP

Av. Universitaria 1801 - San Miguel.
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

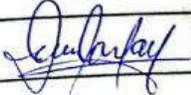
Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

Dr. Ing. José Sebastián G. CP 225715
Jefe del Laboratorio de Materiales

Nota: Informe emitido por el laboratorio de materiales PUCP.

RESULTADOS DE ENSAYO DE DUREZA HRC

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA LABORATORIO DE METALURGIA FÍSICA 					
ITEM	ACEROS	ELECTRODOS	Nº CAPAS	MEDICIÓN DE DUREZAS (HRC)	PROMEDIO DUREZAS (HRC)
1	Chronit 400	OK 83.58	1 capa	51,70	51,30
				50,90	
2	Hardox 450	OK 83.58	1 capa	54,90	54,45
				54,00	
3	Chronit 400	Citodur 1000	1 capa	55,20	53,85
				52,50	
4	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa	56,60	54,70
				52,80	
5	Chronit 400	OK 83.58	2 capas	50,70	50,05
				49,40	
6	Hardox 450	OK 83.58	2 capas	46,20	46,35
				46,50	
7	Chronit 400	Citodur 1000	2 capas	49,80	55,10
				60,40	
8	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas	56,00	55,55
				55,10	
9	Chronit 400	OK 83.58	1 capa	52,80	52,30
				51,80	
10	Hardox 450	OK 83.58	1 capa	55,10	54,20
				53,30	
11	Chronit 400	Citodur 1000	1 capa	58,40	58,25
				58,10	
12	Hardox 450	Citodur 1000	1 capa	54,20	55,05
				55,90	
13	Chronit 400	OK 83.58	2 capas	47,00	48,35
				49,70	
14	Hardox 450	OK 83.58	2 capas	52,30	50,90
				49,50	
15	Chronit 400	Citodur 1000	2 capas	57,60	56,90
				56,20	
16	Hardox 450	Citodur 1000	2 capas	54,70	53,70
				52,70	
Jefe de laboratorio:		Mgt. José Julio Farfán Yépez		Firma:	
Fecha:		23/04/2024			

Nota. Se hizo mediciones en dos puntos diferentes de la superficie de las probetas recubiertas, en la tabla se muestran el promedio de las mediciones en escala HRC. Resultados obtenidos en laboratorio de Metalurgia Física de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica – UNSAAC. 2024.