

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



TESIS

**EFFECTO DEL CORTE TERMICO POR EL PROCESO SMAC EN LA ZAC EN EL
ACERO ASTM A514-B.
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

PRESENTADO POR:

- Br. SANTOS DIAZ TAFUR
- Br. JIMMY ANTHONY DURAND DAVALOS

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

ASESOR:

Dr. Ing. PEDRO CAMERO HERMOZA

CUSCO – PERÚ

2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

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

La que suscribe, asesora del trabajo de investigación de tesis titulado: "EFECTO DEL CORTE TERMICO POR EL PROCESO SMAC EN LA ZAC EN EL ACERO ASTM A514-B. (INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)", presentado por: SANTOS DIAZ TAFUR con Nro. de DNI: 44209968 y JIMMY ANTHONY DURAND DAVALOS con Nro. de DNI: 71559399 para optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico. Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por una vez, 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 9 %.

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 hoja del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 25 de Mayo de 2023


.....
Dr. Ing. PEDRO CAMERO HERMOZA

Nro. de DNI: 23956513

ORCID del Asesor Nro. 0000-0001-5366-9187

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid 27259:235851169

NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS DIAZ SANTOS - DURAND JIMMY.d
ocx**

AUTOR

DIAZ TAFUR SANTOS Y DURAND DAV

RECuento DE PALABRAS

17259 Words

RECuento DE CARACTERES

87137 Characters

RECuento DE PÁGINAS

97 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

7.3MB

FECHA DE ENTREGA

May 24, 2023 5:24 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

May 24, 2023 5:26 PM GMT-5**● 9% de similitud general**

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

- 8% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 3% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossr

● Excluir del Reporte de Similitud

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

PRESENTACIÓN

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

Señores Docentes Miembros del Jurado:

Cumpliendo con las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente de la Escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica y con el objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a vuestra disposición la tesis colectiva intitulada:

EFFECTO DEL CORTE TERMICO POR EL PROCESO SMAC EN LA ZAC EN EL ACERO ASTM A514-B. (Investigación tecnológica)

Este trabajo de investigación, recoge la necesidad de innovar y hacer conocer una tecnología en el área de la metalurgia transformativa, principalmente en el proceso de corte de metales. El conocimiento del uso de electrodos revestidos en el corte de metales por el proceso SMAC (Corte por arco con electrodo revestido).

El presente trabajo es un aporte en la mejora de la tecnología usada actualmente, principalmente en la industria de la manufactura metálica de la región del Cusco, además será una fuente de consulta para ingenieros, técnicos y estudiantes interesados.

Santos Diaz Tafur.

Jimmy Anthony Durand Davalos

DEDICATORIA

El siguiente trabajo de investigación va dedicado con todo mi corazón a Dios quien me encamino siempre por el buen camino y a la memoria de mi padre que inculcó en mi la perseverancia en momentos difíciles y a mis más cercanos familiares como mi madre, tía y hermano que confiaron en mí y me brindaron el soporte emocional, el deseo de superación constante para poder lograr mis metas.

Santos Diaz Tafur.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis con todo mi corazón a mi familia. En especial a mi madre y mi padre, a mi hermana y mi hermano, que están en los buenos y malos momentos, que creen en mí, que se sacrifican muchas cosas para que pueda salir adelante, por su incondicional apoyo en cada paso, por su cariño, paciencia y por estar a mi lado. A mi familia en general que es mi mayor motivación.

Jimmy Anthony Durand Davalos

AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por darnos la vida y en su inmenso amor permitirnos gozar con salud, sus bendiciones y la razón de ser, que cada día nos da la oportunidad de seguir el rumbo de nuestras vidas que se nos dio como regalo por parte del Ser Supremo. A nuestro asesor Dr. Pedro Camero Hermoza que por su enseñanza de seguir perseverante para la culminación de nuestro trabajo de investigación y cuya motivación fue útil para poder lograr todos los objetivos que nos planteamos al inicio de nuestra investigación

Agradecemos a los todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por impartirnos sus conocimientos para nuestra formación profesional y nutrir nuestro interés en las diferentes áreas de la metalúrgica, de igual forma, nuestro agradecimiento

Al Instituto de Educación Superior Tecnológico Privado Didascalio “Cristo Rey” por dar la facilidad en la utilización de sus instalaciones para la realización de la parte experimental

Santos Diaz Tafur

Primeramente, a Dios por darnos la vida y en su inmenso amor permitirnos gozar con salud, sus bendiciones y la razón de ser, que cada día nos da la oportunidad de seguir el rumbo de nuestras vidas que se nos dio como regalo por parte del Ser Supremo.

A nuestros padres a quienes les debemos toda la vida por darnos su comprensión, su amor y su enseñanza de seguir luchando, que son ellos quienes nos enseñaron a levantarnos de cada caída en el camino de la vida.

Agradecemos a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por su dedicación en impartirnos sus conocimientos para nuestra formación profesional, de igual forma, nuestro agradecimiento al Instituto de Educación Superior tecnológico Privado Didascalio “Cristo Rey” por brindarnos sus instalaciones para la realización de la parte experimental.

Jimmy Anthony Durand Davalos

RESUMEN

El presente trabajo de investigación evaluó el efecto del calor producido en la zona afectada por el calor mediante el proceso de corte térmico SMAC en los aceros ASTM A514.

Se ha tenido como procedimiento para la evaluación en las características de la ZAC la selección de 12 probetas de acero ASTM A514 Gr B, el dimensionamiento, preparación de las 12 probetas (corte), para luego seleccionar las variables del proceso que fueron la intensidad de corriente, selección del tipo de corriente (Corriente alterna y continua) y selección del electrodo (SUPERCORTE). Se ejecutó el corte térmico con las dimensiones de 114 x 108 x 25.4 mm, para luego realizar la preparación de probetas para el ensayo de dureza. Asimismo se utilizó el durómetro con un cono de diamante para los ensayos de dureza Rockwell C. Se obtuvieron los resultados que se analizaron calculando el ancho de la ZAC y la dureza del acero ASTM A514 GR B. Se ha tomado muestras para cada probeta para calcular la dureza. Con los datos obtenidos se aplicó la técnica para el control de dureza (promedio de durezas antes y después del corte). El criterio que se empleó en la determinación es la prueba de rangos de signos de Wilcoxon para muestras relacionadas.

El resultado obtenido es la comprobación de que el calor generado por el proceso de corte térmico SMAC no produce efectos negativos en las características mecánicas (dureza) de la ZAC en el acero ASTM A514 GR B. Teniendo como resultados los datos de dureza antes del corte de 27.21 en promedio de las 12 probetas y resultados después de realizar el corte de 27.5 en promedio. Demostrando que la alteración de la dureza por medio del proceso SMAC es muy baja y no altera las características mecánicas en la ZAC.

Palabras clave: Corte térmico, acero ASTM A514, proceso SMAC

ABSTRACT

This research work evaluated the effect of heat produced in the heat affected area by the SMAC thermal cutting process on ASTM A514 steels.

The procedure for evaluating the characteristics of the HAZ was the selection of 12 ASTM A514 Gr B steel specimens, the sizing, preparation of the 12 specimens (cutting), to then select the process variables that were the current intensity, selection of current type (AC and DC current) and electrode selection (SUPERCUT). The thermal cut was executed with the dimensions of 114 x 108 x 25.4 mm, to then perform the preparation of test pieces for the hardness test. The durometer with a diamond cone was also used for the Rockwell C hardness tests. The results were analyzed by calculating the width of the HAZ and the hardness of the ASTM A514 GR B steel. Samples were taken for each test piece to calculate the hardness. With the data obtained, the technique was applied for hardness control (average hardness before and after cutting). The criterion used in the determination is the Wilcoxon sign range test for related samples.

The result obtained is the verification that the heat generated by the SMAC thermal cutting process does not produce negative effects on the mechanical characteristics (hardness) of the HAZ in ASTM A514 GR B steel. Having as results hardness data before cutting 27.21 on average of the 12 specimens and results after cutting 27.5 on average. Demonstrating that the hardness alteration through the SMAC process is very low and does not alter the mechanical characteristics in the HAZ.

Keywords: Thermal cutting, ASTM A514 steel, SMAC process

INTRODUCCION

El proceso de corte térmico consiste en separar el metal mediante el uso de calor, esto lograra fundir el metal que se está cortando. Se generará variaciones en las propiedades mecánicas del metal, en especial la dureza. El corte formará una zona conocida como zona afectada por calor (ZAC).

Esto motivó a que se realice una investigación de los efectos que produce el corte térmico por SMAC en la zona afectada por calor en el acero ASTM A514-B.

En el primer capítulo se detalla el planteamiento del problema, el problema general y específico, la justificación e importancia, los objetivos, las hipótesis, las variables dependientes e independientes, el tipo de investigación, la población y la muestra, y Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos. En el capítulo dos se detalla los antecedentes de investigación y los fundamentos teóricos acerca de los procesos de corte térmico de metales, Corte con Arco de Metal Recubierto (SMAC), características y aplicaciones del acero al carbono ASTM A514, electrodos revestidos de corte, revestimientos y dureza Rockwell (Hardness Rockwell Series C).

En el capítulo tres se explica el desarrollo experimental, la maquinaria y equipo, materiales de investigación, obtención y preparación de probetas, cálculos realizados en la experimentación, muestreo no aleatorio, límites de tolerancia, interpretación de la variación de la dureza en la ZAC y procedimientos de la prueba de rangos de signos de Wilcoxon

ÍNDICE

PRESENTACIÓN.....	ii
DEDICATORIA	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT.....	viii
INTRODUCCION	ix
ÍNDICE	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
SIMBOLOGIA	xviii
CAPÍTULO I	1
FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Problema General y Específicos	2
1.2.1. Problema General.....	2
1.2.2. Problemas Específicos	2
1.3. Justificación e Importancia	3
1.3.1. Importancia	3
1.4. Justificación	3
1.4.1. Justificación Tecnológica.....	3
1.4.2. Justificación Económica	3
1.4.3. Justificación Social	4
1.4.4. Justificación Ambiental.....	4
1.5. Objetivos.....	4
1.5.1. Objetivo General.....	4
1.5.2. Objetivos Específicos.....	4
CAPÍTULO II.....	5
MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	5
2.1.1. Antecedentes Nacionales	5

2.2.	Antecedentes Internacionales.....	6
2.3.	Clasificación de los Procesos de Corte	8
2.4.	Clasificación Según ANSI / AWS	8
2.5.	Procesos de Corte Térmico de Metales.....	10
2.5.1.	Corte con Oxígeno (OC).....	10
2.5.2.	Corte con Fundente Químico (FOC).....	10
2.5.3.	Corte con Polvo Metálico (POC).....	11
2.5.4.	Corte con Gas Oxicombustible (OFC).....	12
2.5.5.	Corte por Arco con Oxígeno (AOC).....	13
2.5.6.	Corte con Lanza de Oxígeno (LOC).....	15
2.5.7.	Corte con Arco (AC).....	17
2.5.8.	Corte con Arco de Carbón y Aire (CAC-A)	17
2.5.9.	Corte con Arco de Carbón (CAC).....	18
2.5.10.	Corte con Arco de Metal con Gas (GMAC)	18
2.5.11.	Corte con Arco de Tungsteno con Gas (GTAC).....	19
2.5.12.	Corte con Arco de Plasma (PAC)	20
2.5.13.	Otros Procesos de Corte.....	21
2.5.14.	Corte con Haz de Electrones (EBC).....	21
2.5.15.	Corte con Rayo Láser (LBC)	22
2.5.16.	Corte por Chorro de Agua (WJC).....	23
2.5.17.	Corte con Chorro de Agua Abrasiva.....	25
2.6.	Corte con Arco de Metal Recubierto (SMAC)	26
2.7.	Efectos del calor aplicado durante el proceso de corte térmico	28
2.8.	Principales constituyentes estructurales de los aceros	30
2.8.1.	Ferrita.....	30
2.8.2.	Perlita.....	30
2.8.3.	Austenita	31
2.8.4.	Martensita	31
2.9.	Curva TTT	32
2.10.	Diagrama Fe-C.....	33
2.10.1.	Línea Ac ₃	34
2.10.2.	Línea Ac ₁	34
2.11.	Acero al Carbono ASTM A514	35
2.11.1.	Características del Acero ASTM A514.....	35

2.11.2.	Acero ASTM A514 Grado B	35
2.12.	Electrodos Revestidos para Corte	37
2.13.	Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco	37
2.14.	Zona Afectada por el Calor (ZAC)	39
2.14.1.	Cálculo del Ancho de la ZAC	41
2.15.	Electrodos Revestidos	42
2.15.1.	Fabricación de la Varilla	42
2.15.2.	Fabricación del Revestimiento	43
2.16.	Revestimientos	44
2.16.1.	Composición del Revestimiento	44
2.16.2.	Funciones del Revestimiento	45
2.16.2.1.	Función Eléctrica	45
2.16.2.2.	Función Física	45
2.16.2.3.	Función metalúrgica	46
2.17.	Características y Propiedades de los Electrodoes	46
2.17.1.	Electrodos celulósicos	49
2.17.2.	Electrodos de rutilo (electrodos de gran rendimiento)	50
2.18.	Selección del Tipo de Corriente	51
2.19.	Electrodos Revestidos para Corte	52
2.20.	Dureza Rockwell (Hardness Rockwell Series c.)	52
2.21.	El método de Wilcoxon	55
2.22.	La prueba de Shapiro-Wilk	56
2.23.	El procedimiento de la prueba de Shapiro-Wilk	56
CAPÍTULO III		58
HIPÓTESIS Y VARIABLES		58
3.1.	Hipótesis	58
3.1.1.	Hipótesis General	58
3.1.2.	Hipótesis Específicas	58
3.2.	Variables Independientes y Dependientes	58
3.2.1.	Variables Independientes	58
3.2.2.	Variable Dependiente	59
3.2.3.	Variables Operativas	59
3.3.	Nivel o Tipo de Investigación	59
3.4.	Población y Muestra	59

3.4.1.	Población.....	59
3.4.2.	Muestra	60
3.5.	Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	60
3.5.1.	Técnicas	60
3.5.2.	Equipos y Materiales.....	60
3.6.	Viabilidad.....	60
CAPÍTULO IV.....		61
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		61
4.1.	Desarrollo Experimental	61
4.1.1.	Diagrama de flujo del experimento.....	61
4.2.	Maquinaria y Equipo Utilizados en la Investigación	62
4.2.1.	Fuente De Poder.....	62
4.2.2.	Durómetro	63
4.3.	Materiales para la Investigación	64
4.3.1.	Probetas De Acero ASTM A514-B.....	64
4.3.2.	Electrodo de Corte	65
4.4.	Obtención y Preparación de Muestras	66
4.4.1.	Características de las Probetas	66
4.5.	Corte de las Probetas.....	67
4.6.	Cálculos Realizados en la Experimentación	69
4.6.1.	Cálculo del Calor Neto o Energía Neta que se Transfiere a la Pieza	69
4.6.2.	Cálculo del ancho de ZAC	70
4.6.3.	Cálculo de Dureza.....	72
4.7.	Muestreo no Aleatorio	78
4.8.	Límites de Tolerancia.....	78
4.9.	Interpretación de la Variación de la Dureza en la ZAC	81
4.10.	Procedimiento de la Prueba de Rangos de Signos de Wilcoxon.....	82
4.10.1.	Definición de las Hipótesis.	82
4.10.2.	Criterio de rechazo de la hipótesis nula	82
4.10.3.	Variación porcentual de la dureza.....	84
CAPÍTULO V.....		86
RESULTADOS Y DISCUSIÓN		86
5.1.	Análisis e Interpretación de los Resultados	86
5.1.1.	La dureza del acero ASTM A514-B	86

5.1.2.	El diámetro del electrodo y su influencia en el calor neto aportado	87
5.1.3.	Intensidad de trabajo y el ancho de la zona afectada por el calor	88
5.1.4.	Dureza después del corte.....	89
5.1.5.	La dureza por lado de probeta (Izquierda -derecha)	90
5.1.6.	Tipo de corriente y el porcentaje de variación de dureza en la ZAC después del corte.....	91
CONCLUSIONES		92
RECOMENDACIONES.....		94
BIBLIOGRAFIA		95
ANEXOS		97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parámetros de corte procesos SMAC.....	29
Tabla 2 Composición química (porcentual).....	36
Tabla 3 Propiedades mecánicas del acero ASTM 514- B.....	37
Tabla 4 Eficiencias térmicas de diferentes procesos de soldadura.....	38
Tabla 5 Clasificación de electrodos revestidos según AWS.....	47
Tabla 6 Clasificación de electrodos revestidos	48
Tabla 7 Clasificación de electrodos revestidos	49
Tabla 8 Comparación entre uso de corriente continua y alterna	51
Tabla 9 Escalas de dureza Rockwell.....	53
Tabla 10 Especificaciones técnicas.....	62
Tabla 11 Composición química del acero ASTM 514 GR B.....	64
Tabla 12 Parámetros de corte.....	66
Tabla 13 Parámetros para el corte de las probetas	67
Tabla 14 Resultado de valores de calor neto aportado.....	70
Tabla 15 Resultados del cálculo del ancho de la ZAC.....	71
Tabla 16 Calculo de dureza.....	75
Tabla 17 Resultado de medición de durezas	79
Tabla 18 Durezas promedio de las probetas, antes y después del corte térmico.....	81
Tabla 19 Resultados de la prueba de WILCOXON	83
Tabla 20 Muestra las expresiones	84
Tabla 21 Cálculo de la variación porcentual de la dureza.....	85
Tabla 22 Dureza promedio por lado de probeta ensayada	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Esquema del proceso de corte con gas oxicomcombustible.....	13
Figura 2	Esquema del corte por arco con oxígeno en operación	15
Figura 3	Esquema del corte por arco con oxígeno en operación	16
Figura 4	Clasificación de los procesos de corte.....	17
Figura 5	Esquema del corte con haz de electrones	21
Figura 6	Proceso de corte con rayo láser.	22
Figura 7	Esquema del proceso de corte con rayo láser.....	23
Figura 8	Proceso de corte por chorro de agua.....	25
Figura 9	Proceso de corte con chorro de agua abrasiva.....	26
Figura 10	Desplazamiento del electrodo en línea recta	27
Figura 11	Desplazamiento del electrodo en el corte térmico.....	28
Figura 12	Curva de enfriamiento continuo	32
Figura 13	Diagrama de fase Fe- C	33
Figura 14	Líneas Ac_3 y Ac_1 dentro del diagrama Fe-C.....	34
Figura 15	Esquema de las zonas existentes en la soldadura por fusión.....	40
Figura 16	Cono de diamante.....	54
Figura 17	Diagrama de flujo del experimento	61
Figura 18	Fuente de poder	62
Figura 19	Durómetro	64
Figura 20	Electrodo de corte.....	65
Figura 21	Caracterización de las probetas	67
Figura 22	Corte de probetas.....	68
Figura 23	Esquema de obtención de una muestra para realizar la prueba de dureza.....	72
Figura 24	Perfil de la probeta para medición del perfil de dureza.	73
Figura 25	Toma de muestras.....	74
Figura 26	Toma de muestras.....	74
Figura 27	Probetas seleccionadas	74
Figura 28	Sección de probeta.....	78
Figura 29	Dureza del acero ASTM A514-B antes del corte térmico.....	86
Figura 30	Efecto del diámetro del electrodo en el calor neto	87
Figura 31	Relación de la intensidad y el ancho de la ZAC.....	88
Figura 32	Dureza del acero ASTM A514-B después del corte térmico	89

Figura 33 Influencia del tipo de corriente en la variación porcentual de la dureza en la ZAC..... 91

SIMBOLOGIA

SAE = Sociedad de ingenieros automotores (Society of automotive engineers).
AISI = Instituto Americano del hierro y acero (American Iron and Steel Institute)
SMAW = Shield metal arc welding (soldadura por arco electrodo revestivo)
AWS= Sociedad americana de soldadura (American Welding Society)
SMAC = Corte con Arco Metálico Protegido
OC = Corte con oxígeno.
FOC = Corte con fundente químico.
POC = Corte con polvo metálico.
OFC = Corte con gas combustible y oxígeno.
OFC – A = Corte oxiacetilénico.
OFC – H = Corte con oxihidrogeno.
OFC – N = Corte con oxígeno y gas natural.
OFC- P = Corte con oxipropano.
AOC = Corte con arco y oxígeno.
AC = Corte con arco.
AAC = Corte con arco de carbón y aire.
CAC = Corte con arco de carbón.
GMAC = Corte con arco metálico y gas.
GTAC = Corte con arco de tungsteno y gas.
MAC = Corte con arco metálico.
PAC = Corte con arco y plasma.
EBC = Corte con haz de electrones.
LBC = Corte con haz de rayos laser.
mm = Milimetro.
CC = Corriente continua.
CA= Corriente alterna.
ANSI= Instituto americano de normas nacionales (American national standards institute)
ZF = Zona de fusión.
ZAC = Zona afectada por el calor.

MB = Metal base.

V = voltios.

A = Amperios

v = velocidad de soldeo.

T_{\max} = Temperatura máxima

T_o = Temperatura inicial de la chapa.

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

C = Calor específico del metal sólido.

H_{net} = energía aportada neta.

t = Espesor de la chapa a soldar.

ρ = Densidad del material (g/mm^3)

ρC = Calor específico volumétrico.

Y = Ancho de la zona afectada térmicamente.

k = Conductividad térmica del metal

% = Porcentaje.

CDEN = Corriente directa electrodo al polo negativo.

CDEP = Corriente directa electrodo al polo positivo.

HRc = Dureza Rockwell C

h = Altura.

T_f = Temperatura de fusión del metal.

CAPÍTULO I.

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.1.Planteamiento del Problema

En la mayoría de industrias de producción y recuperación de piezas metálicas se usa el acero ASTM A514. Este tipo de acero no son comercializados en el mercado en dimensiones para uso directo en los trabajos a realizar, sino que estas deben ser fraccionadas o cortadas a dimensiones requeridas por cada industria en función de sus diseños, a veces los cortes deben realizarse en el lugar de trabajo donde no existe fluido eléctrico para la utilización de otros procesos térmicos de corte, por lo que debe recurrirse a maquinas moto soldadoras que generen energía eléctrica. El calor aplicado para el corte térmico de metales y aleaciones genera una modificación en las zonas contiguas al corte, estas modificaciones están ligado a la microestructura y por ende a las propiedades mecánicas, los cuales podrían causar efectos negativos en su resistencia con consecuencias funestas.

El corte dentro de los procesos de fabricación está estrechamente ligado a la utilización de materiales abrasivos, pero con ciertas limitaciones cuando se trata de aceros de espesores superiores a 10 mm debido al consumo excesivo de los mismos y a la baja velocidad de corte, también presentan inconvenientes de uso y seguridad cuando se realizan trabajos en lugares poco accesibles y con poca maniobra para realizar el corte.

La calidad del producto en este caso está relacionada con la poca inalterabilidad de las propiedades mecánicas de los aceros después de un corte sobre todo cuando se trata de aceros que por su contenido de carbono y elementos aleantes son susceptibles al cambio estructural de los mismos, propiedades que deben ser considerados para posteriores trabajos de unión por soldadura.

A partir de estos inconvenientes surgió la necesidad de delimitar la zona afectada por el calor (ZAC), los cambios microestructurales y propiedades mecánicas del acero posterior a la aplicación de cortes utilizando electrodos E900 (SUPERCORTE) mediante el proceso SMAC por ser el más convencional y gracias a su efectividad para espesores superiores a 10 mm mediante una técnica adecuada de corte, para poder retirar de esta zona el material excedente o dañado sin generar una ZAC de gran tamaño o delimitar el área alterada por el corte con electrodo que debe ser removida, así contar con el material debidamente adecuado para posteriores uniones soldadas o reparaciones y evitar mayores alteraciones en sus propiedades mecánicas que conlleven a posteriores reparaciones y pérdidas económicas y medioambientales.

El presente trabajo de investigación hace referencia de manera directa a la determinación de los efectos del corte mediante un electrodo de corte térmico utilizando el proceso SMAC sobre el acero ASTM A514-B en sus propiedades mecánicas

1.2. Problema General y Específicos

1.2.1. Problema General

¿Cuál es el efecto que produce el corte térmico por el proceso SMAC en la dureza de la ZAC (zona afectada por el calor) en el acero ASTM A514-B?

1.2.2. Problemas Específicos

- a. ¿La intensidad de corriente ampliara la región de la zona afectada por el calor en el corte térmico por el proceso SMAC en el acero ASTM A514-B?
- b. ¿Qué efecto produce el diámetro del electrodo en el corte térmico por el proceso SMAC en la ZAC (zona afectada por el calor) en el acero ASTM A514-B?

- c. ¿Cuál es la alteración porcentual de la dureza que ocasiona la variación del tipo de corriente en el corte térmico por el proceso SMAC en el acero ASTM A514-B?

1.3. Justificación e Importancia

1.3.1. Importancia

Los diferentes estándares de calidad en las industrias, han llevado consigo la necesidad de la utilización de nuevos procedimientos y estudios de las diferentes técnicas de corte, y que cumplan con la función de separación del material mas no de la alteración en sus propiedades del metal cortado, encaminadas a asegurar la confiabilidad del metal para que se desempeñe de la mejor forma.

La importancia de este trabajo de investigación es determinar el grado de susceptibilidad al cambio de las propiedades mecánicas principalmente la dureza por efecto de la temperatura aplicada por el proceso SMAC en la zona afectada por el calor en los aceros ASTM A514-B.

1.4. Justificación

1.4.1. Justificación Tecnológica.

Permitirá el conocimiento tecnológico del efecto de las variables de corte del proceso SMAC en el metal, el cual contribuirá en la calidad del producto a efecto de su posterior uso para ser unidas por soldadura.

1.4.2. Justificación Económica

Al contribuir a mejorar la calidad del producto se estará aumentando la producción con lo que se estará optimizando en el consumo de energía, lo que se traducirá en un ahorro económico.

1.4.3. Justificación Social

El conocimiento y desarrollo de nuevos procedimientos, permitirán que profesionales y técnicos dedicados al conformado de metales y aleaciones adquieran nuevos conocimientos. Este conocimiento producirá una oferta de técnicos altamente calificados lo cual redundará en el mejoramiento de su condición socio-económica.

1.4.4. Justificación Ambiental

En comparación con otros procesos de corte térmico, contribuye a obtener mínimo desecho metálico que contaminen el medio ambiente.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Evaluar el efecto del calor producido en la zona afectada por el calor por el proceso de corte térmico SMAC en los aceros ASTM A514-B.

1.5.2. Objetivos Específicos

- a. Evaluar el efecto de la intensidad de corriente en el corte térmico por el proceso SMAC en la ZAC (zona afectada por el calor) en el acero ASTM A514-B
- b. Evaluar el efecto del diámetro del electrodo en el corte térmico por el proceso SMAC en la ZAC (zona afectada por el calor) en el acero ASTM A514-B
- c. Determinar el porcentaje de variación de la dureza que ocasiona el tipo de corriente usado en el corte térmico por el proceso SMAC en la ZAC (zona afectada por el calor) en el acero ASTM A514-B

CAPÍTULO II.

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la Investigación

2.1.1. Antecedentes Nacionales

a) Perez Peña, (2020) en su trabajo de tesis intitulado “Automatización de una máquina cortadora plasma para materiales metálicos de espesores entre 1 y 50 mm”, realizado en la Pontificia Universidad Católica del Perú en el año 2020, plantea como objetivo general diseñar una máquina automática por corte plasma de productos de acero tales como: láminas de espesores variables, tubos, perfiles y elementos de máquinas, utilizando una mesa de movimientos cartesianos y una cortadora plasma manual la cual se acopla al cabezal de corte. Se realizaron una serie de pruebas de corte automático y al final se concluyó que es posible la fabricación de máquina con sistemas más eficientes o con características más deseables el cual abarata los costos de producción.

b) Wilson Carlos Gómez Hurtado, (2019), en su trabajo de investigación intitulado “Corte por Plasma con la Técnica de Control Numérico Computarizado, para Mejorar la Calidad de Corte de Metales Del I.E.S.T.P. Nueva Esperanza 2019”, realizado en el año 2019 en la Universidad Cesar Vallejo de la ciudad de Trujillo-Perú, se plantea como objetivo general determinar la influencia de la aplicación de tecnología de control numérico computarizado en corte por plasma para mejorar la calidad de corte de metales en la institución arriba mencionado, para lo cual se utilizaron planchas de acero al carbono ASTM A36 con dimensiones de 1.20 m. x 2,40 m. x 1” los cuales fueron cortados usando la tecnológica CNC (control numérico computarizado) en el corte por plasma. Después de la experimentación se llegó a la conclusión que la aplicación de la

tecnología de control numérico computarizado en corte con plasma, en el IDEX Nueva Esperanza es de mucha importancia porque va reducir tiempos de trabajo y costos, ya que, con estas calidades de corte, las piezas cortadas no necesitan trabajos adicionales para mejorar su precisión o acabado superficial.

2.2. Antecedentes Internacionales

a) Arcos Villacis Pablo Antonio, (2010) en su trabajo de investigación titulado “Análisis comparativo de los procesos de corte por plasma, oxicorte y arc air aplicados a metales”, realizado en la Escuela Politécnica de Quito, Ecuador, plantea analizar y comparar los diferentes procesos de corte térmico a través de pruebas de corte y metalografía como también comparar los costos económicos que representan cada uno de ellos. Los procesos de corte a utilizar que se han evaluado son: corte con gas oxicom bustible, corte por arco con plasma y corte con arco por aire y electrodo de carbono, para realizar los cortes con los diferentes procesos se ajustaran los parámetros correspondientes. Al final de la investigación también se ha determinado que el corte por plasma produce menor ancho de zona afectada térmicamente debido a que produce un arco concentrado debido al diseño de la boquilla y altas velocidades de corte, también se ha determinado que el costo por metro lineal de corte por plasma es el más económico en virtud a las velocidades de corte, alta eficiencia del proceso y el costo de sus consumibles, también presenta una buena calidad de corte a pesar del alto consumo energético.

b) Paredes Balseca, (2017), en su tema de tesis “Análisis del proceso de corte por plasma en planchas de acero en la empresa ATU artículos de acero S.A. y su incidencia en la productividad”, realizado en el 2017 en la Universidad Tecnológica Indoamerica de la ciudad de Quito – Ecuador, plantea como objetivo analizar la incidencia que produce en la producción de

acero A36 el corte por plasma, para lo cual se han utilizado discos producidos por la empresa ATU artículos de Acero S.A. Después de realizar la experimentación se ha determinado que es viable la implementación del proceso de corte por plasma en la referida empresa, con una recuperación de la inversión en un corto tiempo.

c) Jorge Maldonado Villa; Julián Portocarrero Hermann; César Rodríguez Adaime; Juan José Valbuena Cocunubo; Marlon Efrén Acuña Lizarazo (2013) en el artículo intitulado “Evaluación del comportamiento térmico de materiales compuestos de matriz polimérica en prototipos de toberas para cohetes de órbita baja”, realizado en el año 2013 en la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez (EMAVI) Cali, Colombia, plantea como objetivo un método para el desarrollo de prototipos de tobera para cohetes de órbita baja”, realizado en el año 2013 en la Escuela Militar de Aviación Marco Fidel Suárez (EMAVI) Cali, Colombia, plantea como objetivo un método para el desarrollo de prototipos de tobera para cohetes de órbita baja, compuesto de dos zonas de matriz polimérica (termofijas y elastoplásticas), reforzadas de acuerdo con su desempeño: una zona térmica (ZT) con características ablativas, endurecida por dispersión con polvo cerámico tipo I o II, y una zona estructural (ZE) con características de resistencia mecánica, con fibrorrefuerzo híbrido y con de fibras de carbono, vidrio y pizarra. Adicionalmente, se les evaluó el desempeño mediante simulación de las condiciones reales de operación en ensayos de tracción y de impacto por llama de oxicorte para determinar pérdida de peso, de espesor, diferencial de temperatura y cambio de propiedades mecánicas, etcétera, lo que llevó a encontrar un positivo comportamiento del sistema. La matriz que presentó el mejor desempeño térmico fue la elastoplástica endurecida por dispersión con el polvo cerámico tipo II; sin embargo, el mejor desempeño estructural lo ofreció el prototipo 9, el cual posee también una matriz polimérica.

2.3. Clasificación de los Procesos de Corte

La preparación de las juntas para las uniones soldadas es de vital importancia para garantizar la calidad de los depósitos de soldadura. Los soldadores tienen que conocer los procesos de corte térmico para preparar adecuadamente los materiales que ellos tienen que soldar. El corte térmico consiste en separar o eliminar el metal de la zona de corte mediante el uso del calor.

A continuación, se muestra un resumen de los procesos de corte más usados en la industria metal mecánica según la clasificación de la ANSI/AWS.

2.4. Clasificación Según ANSI / AWS

- Corte con Oxígeno (OC)
- Corte con fundente químico (FOC)
- Corte con polvo de metal (POC)
- Corte con gas Oxicomcombustible (OFC)
- Corte con oxiacetileno
- Corte con metilacetileno-propadieno-estabilizado
- Corte con gas oxinatural
- Corte con oxihidrógeno
- Corte con oxipropano
- Corte con oxipropileno
- Corte con arco de oxígeno (AOC)

- Corte con lanza de oxígeno (LOC)
- Corte con Arco (AC)
- Corte con arco de carbón aire (AC-A)
- Corte con arco de carbón (CAC)
- Corte con arco de metal con gas (GMAC)
- Corte con arco de tungsteno con gas (GTAC)
- Corte con arco de metal recubierto (SMAC)
- Corte con arco de plasma (PAC)

Otros Cortes:

- Corte con haz de electrones (EBC)
- Corte con rayo de láser (LBC)
- Aire
- Evaporación
- Gas inerte
- Oxígeno
- Corte por chorro de agua
- Corte con chorro de agua abrasiva.

2.5. Procesos de Corte Térmico de Metales

2.5.1. Corte con Oxígeno (OC)

El corte con oxígeno (OC) abarca un grupo de procesos de corte empleados para separar o eliminar metales mediante una reacción exotérmica del oxígeno con el metal base. En el caso de algunos metales resistentes a la oxidación, la reacción puede facilitarse con el uso de un fundente químico o un polvo metálico. (JEFFUS L, 2009).

2.5.2. Corte con Fundente Químico (FOC)

Este proceso está pensado primordialmente para el corte de aceros inoxidable. El fundente está diseñado para reaccionar con los óxidos de los elementos de aleación, como el cromo y el níquel, produciendo compuestos con puntos de fusión cercanos a los de los óxidos de hierro. Se requiere un aparato especial para introducir el fundente en el área del corte. Con la adición de fundente los aceros inoxidable se pueden cortar a una velocidad lineal uniforme sin tener que oscilar el soplete, lográndose velocidades de corte cercanas a las alcanzables con espesores equivalentes de acero al carbono. Las puntas son de mayor tamaño y el flujo de oxígeno de cortar es un poco más alto que para los aceros al carbono.

Para emplear el proceso de fundente se requiere una unidad de alimentación del fundente. El oxígeno de cortar pasa a través de la unidad de alimentación y transporta el fundente al soplete. El fundente está en un surtidor diseñado para operar a las presiones normales del oxígeno de corte, y de ahí es transportado a través de una manguera a un soplete de corte convencional de tres mangueras. Una mezcla de oxígeno y fundente sale por el orificio del oxígeno de cortar en la punta del soplete. Se siguen procedimientos de operación especiales para evitar la acumulación de fundente en la manguera del oxígeno de cortar y en el soplete. (JEFFUS L, 2009).

2.5.3. Corte con Polvo Metálico (POC)

El proceso de corte con polvo metálico (POC) es una técnica para suministrar a un soplete de OFC un flujo de material pulverizado rico en hierro. El material en polvo acelera y propaga la reacción de oxidación y también la acción de fusión y astillado de los materiales difíciles de cortar. El polvo se dirige hacia el interior del corte ya sea a través de la punta de corte o por una o más espreas externas a la punta. Cuando se usa el primer método, el polvo transportado por gas se introduce en el corte a través de orificios especiales de la punta de corte. Cuando el polvo se introduce externamente, el gas que lo transporta imparte a las partículas velocidad suficiente para que atraviesen la envoltura de precalentamiento y lleguen al chorro de oxígeno de cortar. El corto tiempo que pasan en la envoltura de precalentamiento basta para producir la reacción deseada en la zona de corte.

Las escorias fundidas que resultan son expulsadas de la zona de reacción por el chorro de oxígeno, de modo que continuamente se exponen superficies metálicas nuevas al chorro de oxígeno y al polvo. Se emplea hierro en polvo y mezclas de polvos metálicos, como hierro y aluminio.

Los aceros resistentes a la oxidación se pueden cortar con el método del polvo aproximadamente a las mismas velocidades que aceros al carbono de espesor equivalente con puro oxígeno. El flujo de oxígeno de cortar debe ser un poco más alto en el proceso de polvo.

Los surtidores de polvo para el proceso de OCP son de dos tipos generales. Uno de ellos es un dispositivo neumático mientras que el otro utiliza un dispositivo vibratorio en el que la cantidad de polvo surtida desde la tolva está controlada por un vibrador usado cuando se requiere un flujo uniforme y exacto de polvo. (CESOL, 2012)

2.5.4. Corte con Gas Oxicombustible (OFC).

Conocida popularmente como el “corte con flama”, usa el calor de combustión de ciertos gases combinando con la reacción exotérmica de metal con el oxígeno. El soplete de corte que se usa en estos procesos está diseñado para proporcionar una mezcla de gas combustible y oxígeno a la región de corte.

El mecanismo principal de la remoción de material en el corte con oxígeno y gas combustible (OFC) es la reacción química del oxígeno con el metal base.

El propósito de la combustión del oxígeno y el gas es elevar la temperatura en la región de corte para soportar la reacción. Por lo general, estos procesos se usan para cortar placas metálicas ferrosas, en las cuales ocurre una rápida oxidación del hierro.

El mecanismo de corte para metales no ferrosos es distinto. Estos metales se caracterizan por temperaturas de fusión más bajas que los metales ferrosos y hay más resistencia a la oxidación. En estos casos, el calor de la combustión de la mezcla de oxígeno y gas combustible, tiene una función más importante en la creación de la ranura.

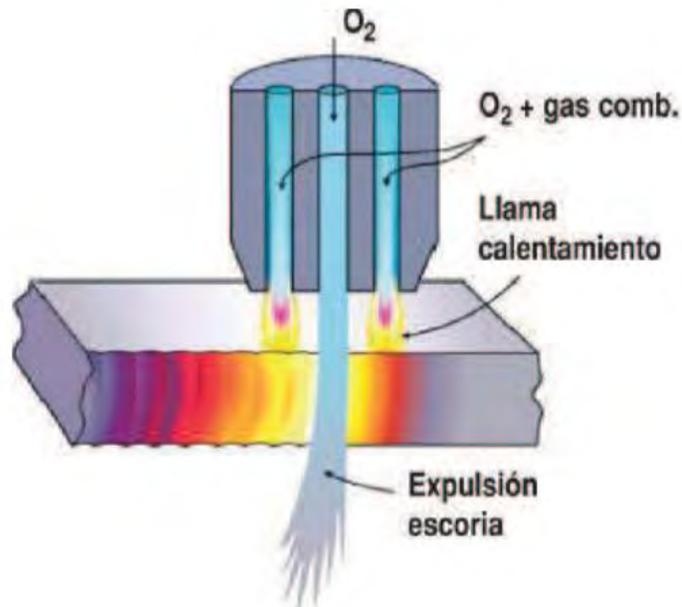
Los combustibles utilizados incluyen el Acetileno, el MAPP (metilacetilenopropadieno), gas natural, hidrógeno, el propileno y el propano.

Los procesos de OFC se realizan en forma manual o con máquina. Los sopletes operados en forma manual se usan para trabajo de reparación, corte de metal desechado, desbastado de protuberancias de fundición en arena, y en operaciones similares que generalmente requieren una mínima precisión. Para trabajo de producción, el corte con flama de máquina permite velocidades mayores y una mejor precisión. Con frecuencia, este equipo se controla en forma numérica para

permitir que se corten formas perfiladas. En la figura 1, se muestra un esquema de este proceso.
(CESOL, 2012)

Figura 1

Esquema del proceso de corte con gas oxicombustible.



Fuente (TWI Ltd., 2020).

2.5.5. Corte por Arco con Oxígeno (AOC)

El corte con arco de oxígeno (Arc Oxygen Cutting, AOC) es un proceso de corte con oxígeno que emplea un arco entre la pieza de trabajo y un electrodo tubular consumible a través del cual se dirige un chorro de oxígeno hacia la pieza de trabajo. El acero de media aleación se corta empleando el arco para elevar la temperatura del material hasta su punto de ignición en la presencia de oxígeno.

La reacción de combustión que tiene lugar se sostiene así misma, ya que libera suficiente calor para mantener la temperatura de ignición en todos los lados del corte. El arco eléctrico proporciona el precalentamiento necesario para iniciar el corte.

En el caso de metales resistentes a la oxidación, el mecanismo de corte es más bien una acción de fusión. Aquí, la cubierta del electrodo suministra un fundente que ayuda al metal derretido a salir del área de corte.

Los cortes por arco con oxígeno en hierro colado y aceros de carbono medio y baja aleación son propensos a la aparición de grietas en la cara del corte. El grado y la frecuencia del agrietamiento dependen de la composición y de la templabilidad del acero.

El AOC puede realizarse empleando fuentes de potencia de CA o CC de intensidad de corriente constante con la suficiente capacidad. Es preferible la polaridad directa o corriente continua de electrodo negativo (CCEN) para cortes rápidos.

Para cortar en aire, se recomienda una porta electrodo totalmente aislado. En el corte subacuático es indispensable una porta electrodos totalmente aislado equipado con un inhibidor de retro destello adecuado.

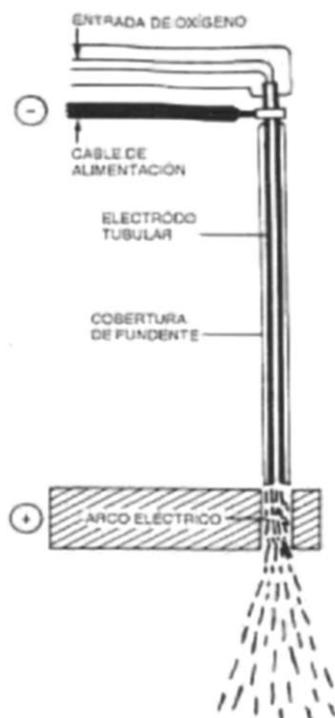
Los electrodos para corte por arco con oxígeno se desarrollaron primordialmente para el corte subacuático y posteriormente se aplicaron al corte en aire. En ambas aplicaciones, los electrodos de oxígeno pueden cortar metales ferrosos y no ferrosos en cualquier posición.

El AOC ha sido utilizado con éxito en fundiciones y depósitos de chatarra para cortar aceros de baja y media aleación, acero inoxidable, hierro colado y metales no ferrosos en cualquier posición. La utilidad del proceso varía con el espesor y la composición del material utilizado.

Los bordes del metal cortado con soplete de arco de oxígeno son un tanto irregulares y por lo regular requieren cierta preparación superficial para poder soldarlos. En la figura 2, se muestra un esquema de este proceso. (CESOL, 2012)

Figura 2

Esquema del corte por arco con oxígeno en operación



Fuente: American Welding Society; (1996)

2.5.6. Corte con Lanza de Oxígeno (LOC)

El corte con lanza de oxígeno (LOC) es un proceso de corte con oxígeno que utiliza oxígeno suministrado a través de un tubo o lanza consumible de acero. El precalentamiento necesario para iniciar el corte se logra de manera distinta. La primera versión de LOC empleaba un tubo simple de hierro negro como lanza, a través de la cual fluía oxígeno. Se usaba un soplete de gas oxicomcombustible de corte o de soldadura para calentar el extremo de corte de la lanza hasta un color

rojo cereza, momento en el cual se iniciaba el flujo de oxígeno. El tubo de hierro arde con una reacción exotérmica auto sostenida, y el soplete de calentamiento se retira. Cuando el extremo ardiente de la lanza se acerca a la pieza de trabajo, ésta se funde por el calor de la flama.

Una versión mejorada de la lanza lleva una serie de alambres de acero de bajo carbono empacada en el tubo de acero. Esto aumenta la vida de corte y la capacidad de la lanza.

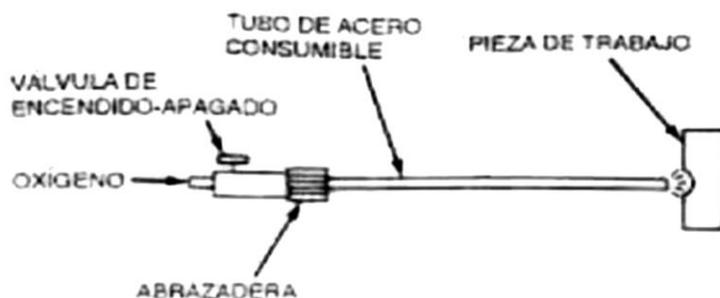
El LOC puede servir para horadar casi cualquier material: Se le ha utilizado con éxito en aluminio, hierro colado, acero y concreto reforzado.

El proceso se ha utilizado para abrir agujeros de espita en hornos y para eliminar material solidificado de recipientes, cucharones y moldes. Puede servir para cortar tabiques refractarios, mortero y escoria.

El proceso de LOC se puede usar bajo el agua. Es preciso encender la lanza antes de meterla al agua, pero de ahí en adelante el proceso se realiza prácticamente igual que en el aire. El violento burbujeo que se produce restringe la visibilidad. En la figura 3, se muestra un esquema d este proceso. (CESOL, 2012)

Figura 3

Esquema del corte por arco con oxígeno en operación



Fuente: American Welding Society (1996)

2.5.7. Corte con Arco (AC)

En la figura 4, se muestra la clasificación de los procesos de corte térmico Arco eléctrico, según la American Welding Society.

Figura 4

Clasificación de los procesos de corte



Fuente: American Welding Society (AWS) (1996)

2.5.8. Corte con Arco de Carbono y Aire (CAC-A)

En el corte con arco de carbono y aire (CAC-A), el arco se genera entre un electrodo de carbono y metal, y se usa un chorro de aire a alta velocidad para alejar la parte fundida del metal. Éste procedimiento se usa con el propósito de formar una ranura para separar la pieza o para formar una cavidad en ella. La cavidad prepara los bordes de las placas para las soldaduras por fusión.

El corte con arco de carbono y aire se usa en una variedad de metales incluidos el hierro colado, el acero al carbono, los aceros de baja aleación y el acero inoxidable, así como diversas

aleaciones no ferrosas. La salpicadura del metal fundido es un riesgo y una desventaja del proceso. (CESOL, 2012)

2.5.9. Corte con Arco de Carbón (CAC)

El corte por arco con electrodo de carbón es el proceso de corte más antiguo y hoy en día ya casi no se usa. El proceso empleaba un arco entre un electrodo de carbono (grafito) y el metal base para fundir la superficie de la pieza de trabajo.

Como el proceso depende de la gravedad para la eliminación del metal derretido, sólo puede usarse en posición vertical o sobre cabeza. Una variación aprovechaba la fuerza del arco a amperajes mayores para ayudar a expulsar el metal del área de corte. Los cortes producidos requerían mucha limpieza para quitar la escoria. Antes de soldarse, los bordes cortados requerían abrasión para eliminar el área fundida remanente en el metal, pues absorbía una gran cantidad de carbono del electrodo. (CESOL, 2012)

2.5.10. Corte con Arco de Metal con Gas (GMAC)

El corte con arco de metal y gas (Gas Metal Arc Cutting, GMAC) es un proceso de corte con arco que emplea un electrodo consumible continuo y un gas protector.

El GMAC se desarrolló poco después de la introducción del proceso de soldadura por arco de metal y gas, y ocurrió por primera vez accidentalmente durante una operación de soldadura, cuando se observó que, si se utilizaba una velocidad de alimentación del electrodo excesiva, se podía penetrar la placa. Cuando se desplazó el soplete se realizó el corte.

Las principales desventajas del GMAC son el elevado consumo de electrodos de soldadura y las altas corrientes de corte (hasta 2000 amperios) requeridas.

El GMAC se ha utilizado para cortar figuras en acero inoxidable y aluminio. Si se emplea equipo de soldadura normal y un electrodo de acero al carbono de 2.4mm (3/32pulg) es posible cortar un acero inoxidable de hasta 238mm de espesor y aluminio hasta 76mm de espesor. (CESOL, 2012)

2.5.11. Corte con Arco de Tungsteno con Gas (GTAC)

El corte con arco de tungsteno y gas puede servir para separar metales no ferrosos y acero inoxidable con espesores de hasta 13mm (1/2pulg) empleando equipo estándar de soldadura por arco de tungsteno y gas.

Entre los metales cortados están el aluminio, magnesio, cobre, bronce de silicio, níquel, cuproníquel y diversos tipos de aceros inoxidables. Este proceso de corte puede emplearse a mano o mecanizarse. Se usa el mismo circuito para cortar y para soldar, pero se requiere una mayor corriente para cortar una placa de un espesor dado que para soldarla.

El arco puede encenderse ya sea con una chispa de alta frecuencia o frotando el electrodo contra la pieza de trabajo. Conforme el soplete se desplaza sobre la placa, una pequeña porción de ésta se funde por el calor del arco, y el chorro de gas expulsa el metal derretido para producir el corte. Al término del corte, el soplete se levanta de la pieza de trabajo para interrumpir el arco.

La calidad del corte en el lado libre suele ser aceptable, pero al otro lado requiere una limpieza considerable.

Se pueden usar sopletes estándar para soldadura por arco de gas de tungsteno. Para cortar se recomienda una fuente de potencia de CC de corriente constante, ya sea de rectificador o motogenerador, con un voltaje de circuito abierto mínimo de 70 V.

2.5.12. Corte con Arco de Plasma (PAC)

Un plasma se define como un gas súper calentado e ionizado eléctricamente. El corte con arco de plasma (Plasma Arc Cutting, PAC) usa una corriente de plasma que opera a altas temperaturas en el rango de 10.000 a 14.000 °C (18.000 a 25.000 °F) para cortar metal por fusión.

En la acción de corte, se dirige la corriente del plasma a alta velocidad hacia la pieza de trabajo; esta misma acción funde e impulsa el metal fundido por la ranura. El arco de plasma se genera entre un electrodo dentro del soplete y la pieza de trabajo (ánodo). El plasma fluye a través de una boquilla enfriada con agua, que controla y dirige la corriente a la posición deseada. El chorro de plasma resultante es una corriente de alta velocidad bien alineada con temperaturas extremadamente altas en su centro, y con el calor suficiente para cortar a través de un metal, que en algunos casos tiene un espesor de 150 mm.

Los gases usados para crear el plasma incluyen el nitrógeno, el argón, el hidrógeno o una mezcla de éstos. Tales fluidos se denominan los gases primarios en el proceso. Con frecuencia se dirigen gases secundarios o agua para rodear el chorro de plasma, a fin de ayudar a confinar el arco y limpiar la ranura de metal que se forma.

La mayoría de las aplicaciones del PAC implican el corte de láminas de metal y placas planas. Las operaciones incluyen el barrenado y el corte a lo largo de una trayectoria definida.

El corte con arco de plasma puede utilizarse para cortar casi cualquier metal eléctricamente conductor. Con frecuencia los metales cortados en el PAC incluyen aceros al carbono simple, el acero inoxidable y el aluminio.

2.5.13. Otros Procesos de Corte

2.5.14. Corte con Haz de Electrones (EBC)

El corte con haz de electrones (EBC) es uno de los varios procesos industriales que usan haces de electrones. Además del corte, otras aplicaciones de esta tecnología incluyen el tratamiento térmico y la micro soldadura.

El corte con haz de electrones utiliza una corriente de electrones a alta velocidad enfocada hacia la superficie de la pieza de trabajo para remover material mediante fusión y vaporización.

Un cañón de haz de electrones genera una corriente continua de electrones que se aceleran aproximadamente a 75% de la velocidad de la luz y se enfocan a través de un lente magnético sobre la superficie de trabajo. El lente es capaz de reducir el área del haz a un diámetro tan pequeño como 0.025mm. Al chocar contra la superficie, la energía cinética de los electrones se convierte en energía térmica de una densidad muy alta, la cual funde o vaporiza el material en un área localizada.

El corte con haz de electrones se usa para diversas aplicaciones de corte de alta precisión sobre cualquier material conocido, las cuales incluyen el taladrado y el corte de ranuras.

Figura 5

Esquema del corte con haz de electrones



Fuente: <https://www.ucursos.cl>.

2.5.15. Corte con Rayo Láser (LBC)

El corte con rayo láser (LBC) usa la energía luminosa para remover un material mediante vaporización y desgaste. Los tipos de láser utilizados para este proceso son de gas de dióxido de Carbono y de estado sólido. Figura 6, se muestra el corte por rayo láser.

Figura 6

Proceso de corte con rayo láser.



Fuente: <https://www.ucursos.cl>.

En el corte con rayo láser, la energía del haz de luz coherente se concentra no sólo en forma óptica, sino también en términos de tiempo. El haz de luz se dirige para que la energía liberada produzca un impulso contra la superficie de trabajo, lo que a su vez produce una combinación de evaporación y fusión, con la salida de material fundido desde la superficie de trabajo a alta velocidad.

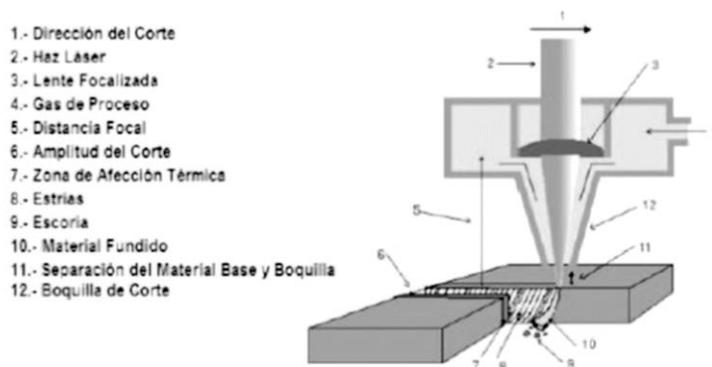
El LBC se usa para ejecutar diferentes tipos de operaciones de taladrado, corte en tiras, ranurado, grabado y marcado. El rango de materiales de trabajo que se pueden cortar mediante éste proceso es virtualmente ilimitado. Las propiedades ideales, incluyen una alta absorción de energía

luminosa, baja reflectividad, buena conductividad térmica, bajo calor específico, bajo calor de fusión y bajo calor de evaporación.

Los resultados con láser son altamente reproducibles, y los sistemas de láser han alcanzado tiempos de operación eficaz del 95%. La alta precisión y los bordes de buena calidad son muy comunes incluso en el corte tridimensional con láser. Los rayos láser también tienen flexibilidad para compartir la potencia y el tiempo, lo que permite maximizar la efectividad de costos de la operación del rayo de tiempo completo. En la Figura 7 se muestra el esquema de corte

Figura 7

Esquema del proceso de corte con rayo láser



Fuente: <https://www.ucursos.cl>.

2.5.16. Corte por Chorro de Agua (WJC)

El corte por chorro de agua (Waterjet Cutting) conocido también como maquinado hidrodinámico, corta una amplia variedad de materiales, tanto metales como no metales. Este proceso usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte.

Para obtener un chorro fino de agua se utiliza una pequeña abertura de boquilla con diámetro de 0.1 a 0.4mm. Para proporcionar al chorro una energía suficiente para poder cortar, se usan presiones hasta de 400 MPa y el chorro alcanza velocidades hasta de 900 m/s. Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte hecho de acero inoxidable y una boquilla de zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el más costoso.

La distancia de separación es la distancia entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que golpee la superficie. Una distancia de separación normal es de 1/8 de pulgada. (3.2 mm). El tamaño del orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados. Para cortar materia prima más gruesa se requieren corrientes de chorro más densas y mayores presiones.

La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte. La velocidad de avance típica varía desde 12 in/min (5mm/s) hasta 1200 in/min (500mm/s), dependiendo del material de trabajo y su grosor. Por lo general, el WJC se hace en forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipulación de la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada. En la Figura 8 se muestra el esquema de corte.

Figura 8

Proceso de corte por chorro de agua



Fuente: <https://www.ucursos.cl>.

2.5.17. Corte con Chorro de Agua Abrasiva

Cuando se usa un WJC sobre partes metálicas, por lo general deben agregarse partículas abrasivas a la corriente a chorro para facilitar el corte. Por tanto, este proceso se denomina corte con chorro de agua abrasiva. Entre los materiales abrasivos comunes están el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un mineral de silicato). Las partículas abrasivas se agregan a la corriente de agua a aproximadamente 0.5 lb/min (0.23 Kg/min) después de que salen de la boquilla para el WJC.

Los parámetros de proceso restantes incluyen algunos que son comunes para el WJC; el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación. Los diámetros del orificio de la boquilla varían de 0.010 a 0.0250 pulgadas (0.25 a 0.63 mm), este rango es más grande que en el WJC y permite que la corriente contenga velocidades de flujo más altas y mayor energía antes de la eyección de los abrasivos. Las presiones del agua son similares a las del WJC.

Las distancias de separación son menores para reducir el efecto de la dispersión del fluido de corte, el cual contiene partículas abrasivas en esta etapa. En la Figura 9 se muestra el esquema de corte.

Figura 9

Proceso de corte con chorro de agua abrasiva



Fuente: <https://www.ucursos.cl>.

2.6.Corte con Arco de Metal Recubierto (SMAC)

El Corte con arco de metal revestido (Shielded Metal Arc Cutting, SMAC) es un proceso de corte en arco que utiliza un electrodo revestido. De preferencia debe usarse una fuente de potencia de corriente constante que opere con corriente continua de polaridad directa (CCEN). La función principal de la cubierta del electrodo durante el corte es como aislante eléctrico para que el electrodo pueda insertarse en el hueco del corte sin hacer cortocircuito con los lados, y también funge como estabilizador del arco, concentrando e intensificando su acción. La eficacia de este procedimiento en el corte de grandes espesores es una función de la manipulación del electrodo.

También hay en el mercado electrodos con cubiertas hechas especialmente para corte. En la tabla 1 se indican los parámetros de corte para el proceso SMAC. El corte por arco con electrodos revestidos no permite obtener la limpieza y precisión del oxicorte o plasma, pero resulta

relativamente rápido y razonablemente económico. Es particularmente efectivo para cortes de desguace sobre aceros y fundiciones, para el corte de pequeñas piezas y para el trabajo en zonas de difícil acceso.

El fundamento de esta técnica resulta sencillo. Si tenemos en cuenta que en el arco se alcanzan temperaturas de 3600 a 5500°C, mientras que el acero, por ejemplo, funde a unos 1350°C, llegamos a la conclusión de que el corte es realmente un proceso de fusión localizada.

Para realizar un corte por arco, con electrodos revestidos, proceder como sigue:

1. Ajustar el grupo con la misma polaridad que la utilizada para soldar con el tipo de electrodo seleccionado.
2. El diámetro depende del espesor a cortar y de la máxima intensidad que pueda suministrar el generador utilizado.
3. Situar la pieza en posición horizontal e iniciar corte en el extremo inferior del borde. Cuando el diámetro del electrodo es mayor que el espesor a basta con desplazar el electrodo a lo largo de la pieza sin ningún tipo de balanceo ver figura 10, se la posición del electrodo.

Figura 10

Desplazamiento del electrodo en línea recta

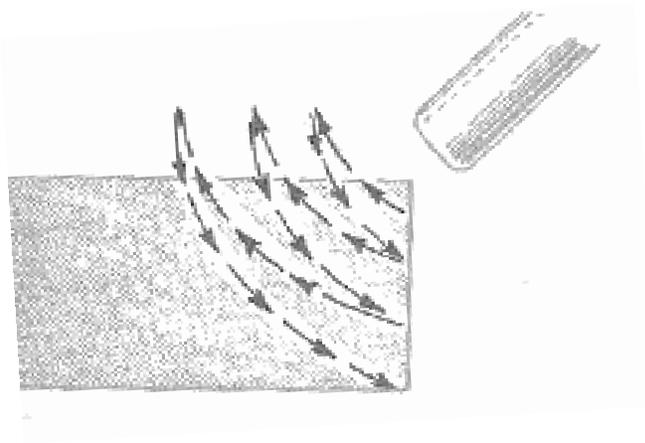


Fuente: Pere Molera Sola (1992)

4. Si el espesor a cortar es mayor que el diámetro el electrodo además del movimiento de avance es necesario comunicar al electrodo un movimiento como el que se indica en la figura 11 que consiste en levantar el electrodo con un movimiento rápido y a continuación empujar hacia abajo sobre el baño para facilitar la eliminación del metal fundido

Figura 11

Desplazamiento del electrodo en el corte térmico



Fuente: Pere Molera Sola (1992)

2.7.Efectos del calor aplicado durante el proceso de corte térmico

En el proceso SMAC pueden producirse enfriamientos muy rápidos de algunas zonas, lo que puede producir puntos duros, los cuales pueden ser origen de fisuras o grietas en la sección de corte. Además, hay que tener en cuenta que mientras una zona de la pieza se encuentra en estado de fusión, el resto de la misma tiene temperaturas variables entre amplios límites: desde zonas que están a una temperatura próxima a la de fusión hasta otras que se mantienen a temperatura ambiente.

Esto implica que mientras en unas zonas la estructura cristalina está totalmente rota o a punto de romperse, en otras se está iniciando la recristalización.

Cuando se cortan aceros de alto contenido en carbono, si no se toman medidas para evitar los cambios de estructura, bien sea estableciendo velocidades optimas de corte área que afectada por el cambio térmico quedara susceptible a cambios en su propiedades mecánicas y alteraciones microestructurales

Si se corta una pieza de acero de gran elasticidad, el calor aplicado durante este proceso puede disminuir la elasticidad, con lo que se inutiliza la pieza.

También hay que tener en cuenta, que, si se corta una pieza endurecida por temple, este proceso, normalmente, disminuye la dureza de la misma.

Tabla 1

Parámetros de corte procesos SMAC

Marca de electrodo (OERLIKON)	Diámetro del electrodo		Amperaje de trabajo (A)	Velocidad de desplazamiento para el corte con electrodo revestido
	pulg	mm		mm/s (rango de velocidades)
SUPERCORTE	1/8	3.2	260	2.0 - 3.0
SUPERCORTE	1/8	3.2	270	2.0 - 3.0
SUPERCORTE	1/8	3.2	300	2.0 - 3.0
SUPERCORTE	5/32	4.0	260	2.0 - 3.0
SUPERCORTE	5/32	4.0	270	2.0 - 3.0
SUPERCORTE	5/32	4.0	300	2.0 - 3.0

NOTA:

- (1) Los valores de amperaje están determinados por el manual del fabricante del electrodo Supercorte Anexo 1 variando estos por la operacionalización y la eficiencia de la corriente.
- (2) Los datos de la tabla pueden ser reflejados para su homólogo de SUPERCORTE que es electrodo NAZCACORTE.
- (3) Los datos del rango de velocidades se determinaron por experimentación y basados en la fuente: "Técnica y práctica de la soldadura"; Giachino, Joseph W., Weeks, William (1988)

Es preferible una máquina de corriente continua para el SMAC, pero también puede usarse una fuente de corriente alterna.

El SMAC se ha usado para recortar rebabas en fundiciones no ferrosas y para chatarra no ferrosa para reciclaje. La pieza de trabajo debe colocarse de modo que la gravedad ayude a eliminar el metal derretido. En general, el proceso no sirve para preparar de manera satisfactoria bordes para soldadura sin un acabado considerable por abrasión o esmerilado. (JEFFUS L, 2009).

2.8.Principales constituyentes estructurales de los aceros

En los aceros, el carbono se encuentra disuelto o combinado en forma de cementita, rara vez en forma de grafito. Los principales constituyentes de los aceros son:

2.8.1. Ferrita

La ferrita es el hierro alfa (α). Es decir, hierro casi puro que puede contener en disolución pequeñas cantidades de carbono, silicio, fósforo y otras impurezas. En los aceros aleados la ferrita suele contener níquel, manganeso, cobre, silicio, aluminio, etc.

Al microscopio aparece como granos monofásicos con límites de grano menos rectos que la austenita. Tiene una resistencia a la tracción de unos 28 Kg/mm², una dureza de 52 HRb y un alargamiento del 35 %. Es la fase más blanda del acero, muy dúctil y maleable, magnético y de pequeña fuerza restrictiva

2.8.2. Perlita

La perlita es el constituyente eutectoide formado por capas alternadas de ferrita y cementita. Como todo eutectoide es de composición química definida: sólo depende de la presión del ambiente

Aparece en el enfriamiento lento de la austenita o por transformación isotérmica de la austenita a $650^{\circ} - 723^{\circ}\text{C}$. La separación de las láminas depende de la velocidad de enfriamiento. La perlita procedente del normalizado tiene un valor de dureza de 25 HRc.

2.8.3. Austenita

La austenita es una disolución sólida del carbono en el hierro gamma (γ). Puede contener hasta un 2.0 %C. A veces se encuentra junto con la martensita en los aceros a temperatura ambiente como resultado de enfriar muy rápidamente aceros de alto contenido en carbono de muy alta aleación: éste es el caso del acero inoxidable con 18 % en cromo y 8 % en níquel.

En la microestructura de la austenita aparecen cristales parecidos a la ferrita pero con contornos más rectilíneos y ángulos más vivos. Esta microestructura es la causa de las particulares propiedades de la austenita.

La austenita es blanda, muy dúctil y tenaz. Su resistencia a la tracción varía de 88 a 105 Kg/mm². Su dureza es de unos 32 HRc y su alargamiento del 30 al 60%.

2.8.4. Martensita

Es una estructura un poco desordenada en forma de agujas, que se obtiene enfriando rápidamente la austenita. Sus propiedades son:

- Gran dureza (50-68 HRc)
- Gran resistencia ($R = 175-200 \text{ Kg/mm}^2$)
- Poco dúctil y maleable: alargamiento máximo de 0.5-2.5%

2.9. Curva TTT

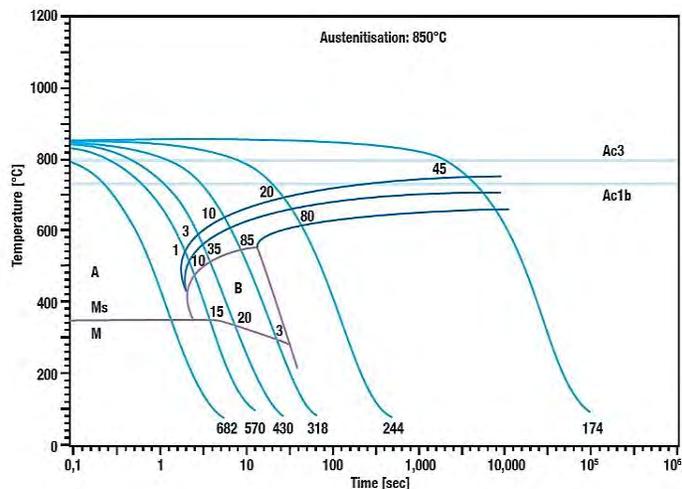
La curva TTT del acero, y en concreto suposición respecto al origen de tiempos, depende del tamaño de grano de la austenita y de la composición química del acero

Esa curva resultará más alejada del origen de tiempos cuanto mayor sea el tamaño de grano austenítico y cuantos más elementos en solución sólida tenga la austenita. Por ello se dice que el acero tiene tanta más templabilidad mayor facilidad para el temple cuanto más apartada del origen de tiempos se halle su curva TTT. Así, para un acero muy aleado su curva TTT estará muy desplazada del origen de tiempos y podría obtenerse martensita por simple enfriamiento al aire desde la temperatura de austenización como se muestra en la figura 12

Tenemos que tomar en cuenta también el enfriamiento puede ser CONTINUO (Tratamientos con Enfriamiento Continuo: Curvas CCT) y realizar se de diversas maneras: enfriando dentro del horno, al aire, en agua, en aceite

Figura 12

Curva de enfriamiento continuo

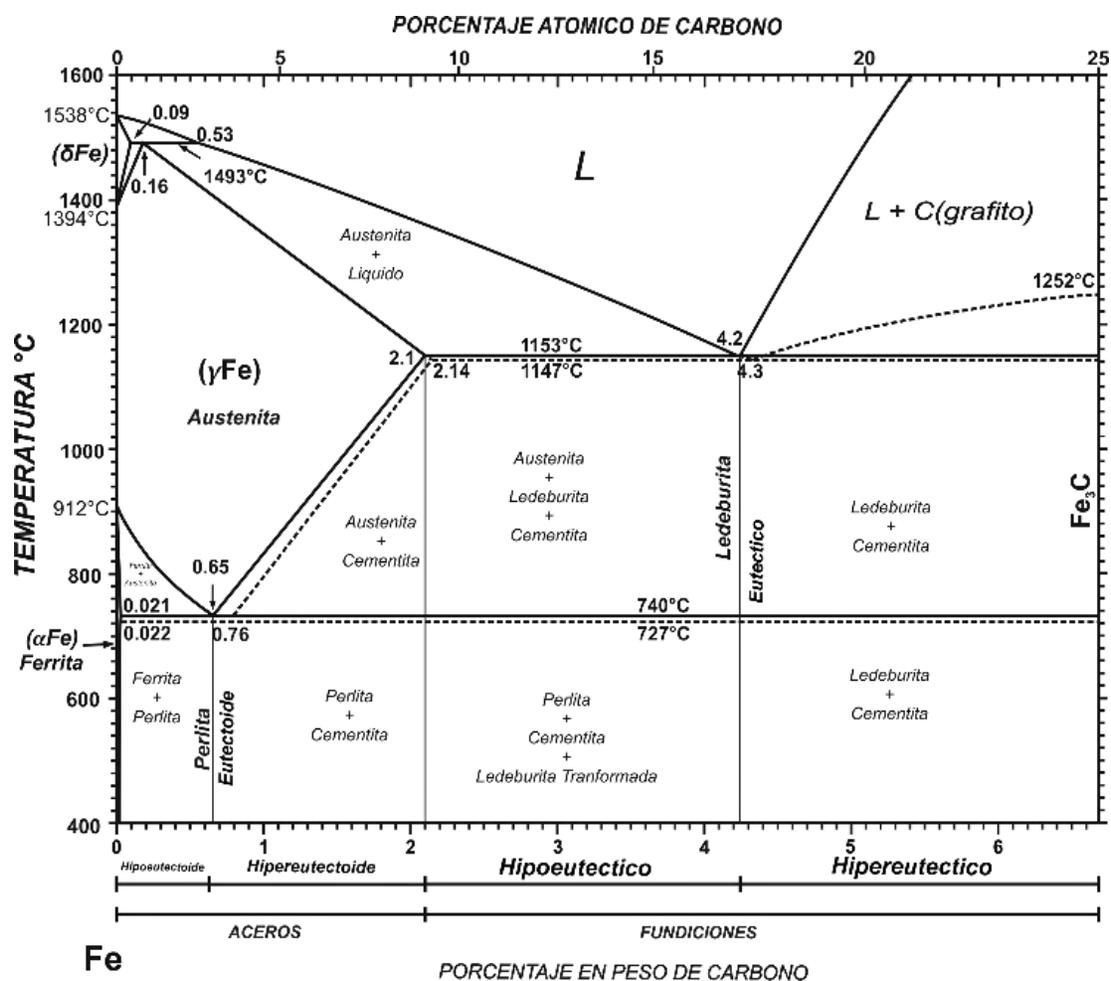


2.10. Diagrama Fe-C

También llamado diagrama de equilibrio o constitucionales y viene a ser la representación gráfica del sistema de aleación Fe-C, don se muestran tres variables independientes (presión, temperatura y composición) y como se supone que la presión permanece constante el diagrama indicara los cambios estructurales debido a la variación de la composición y temperatura. (H. Avner, 1988) ver figura 13

Figura 13

Diagrama de fase Fe- C

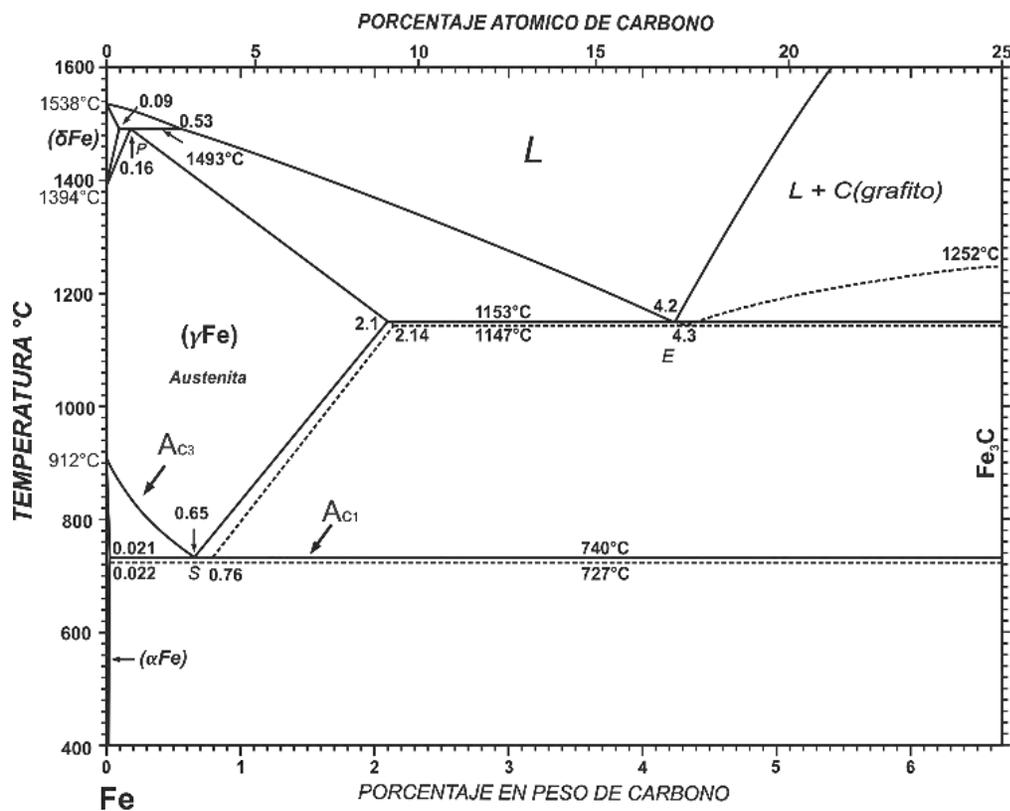


Fuente: ASM International, 1992

Existen temperaturas y puntos dentro del diagrama de fase Fe-C que nos servirán para comprender mejor los diferentes diagramas TTT

Figura 14

Líneas Ac_3 y Ac_1 dentro del diagrama Fe-C



Fuente: ASM International, 1992

2.10.1. Línea Ac_3

Línea de transformación alotrópica de austenita en ferrita o viceversa, si se toma un punto de esta línea se llegaría obtener la temperatura crítica de austenización completa (Ac_3)

2.10.2. Línea Ac_1

Línea que representa la temperatura eutécticoide

2.11. Acero al Carbono ASTM A514

Este tipo de acero es conocido también como acero T-1, para darle mayor resistencia se le da el tratamiento térmico de templado y revenido. Este acero está disponible en ocho grados: B, S, H, Q, E, F, A y P. Es un acero adecuado para trabajar a bajas temperaturas. Adecuado para temperaturas bajas. (Miromina Acero de Calidad, 2022)

2.11.1. Características del Acero ASTM A514

Las placas de acero de alta resistencia / baja aleación posee mayor resistencia que las placas tradicionales de acero al carbón, además de contar con gran ductilidad, facilidad de rolado y soldado, dureza y resistencia a la fatiga. Estas placas de acero pueden reducir sustancialmente los costos de producción al dotar la resistencia requerida con un peso mucho menor.

La designación ASTM A514 es una especificación para acero estructural de alta resistencia de baja aleación de Columbio-Vanadio. Este acero es utilizado en aplicaciones, tales como construcción electrosoldada de estructuras en general o puentes, donde la tenacidad en las entalladuras es importante.

Debido a su alto límite elástico, este material es ideal para proyectos que requieren un acero liviano sin sacrificar la durabilidad o tenacidad. Se tiene este material en existencias en los Grados B, H, E, F y Q. El grupo de ASTM A514 está diseñado para una amplia gama de usos estructurales, así como maquinaria y equipo.

2.11.2. Acero ASTM A514 Grado B

Es una plancha laminada en caliente, es un acero de aleación para aplicaciones estructurales que requieren un alto límite elástico combinado con buena conformabilidad y dureza. La soldadura

de las planchas A514 Grado B debe realizarse de acuerdo con el código de soldadura aplicable. Las planchas A514 Grado B tienen buenas características de conformado en frío. (Miromina Acero de Calidad, 2022)

- **Aplicaciones del Acero ASTM A514 Grado B (ASTM A514 GR B)**

Es usado ampliamente en:

- Fabricación remolques de transporte,
- Equipos para construcción,
- Brazos de grúas,
- Elevadores de hombre móviles,
- Equipos agrícolas,
- Marcos y chasis de vehículos pesados, y
- Elementos estructurales de puentes grúas. (Miromina Acero de Calidad, 2022)

- **Composición química del acero ASTM A514 Grado B (ASTM A514 GR B)**

La tabla 2 muestra la composición química del acero ASTM A514 grado B, composición química porcentual (%).

Tabla 2

Composición química (porcentual)

Composición Química

Carbono (%) máx.	0.12-0.21
Manganeso (%) máx.	0.70-1.00
Fósforo (%) máx.	0.035
Azufre (%) máx.	0.040
Silicio (%) máx.	0.20-0.35
Cromo (%) máx.	0.40-0.65
Vanadio (%) máx.	0.03-0.08
Titanio (%) máx.	0.01-0.03
Boro (%) máx.	0.0005-0.005

Fuente: Chapel Steel (2022)

- **Propiedades Mecánicas**

Las propiedades mecánicas se detallan en la tabla 3

Tabla 3

Propiedades mecánicas del acero ASTM 514- B

Propiedades Mecánicas	
Límite de Fluencia (mín.)	690 MPa
Resistencia a la Tracción (mín.)	760-895 MPa
Alargamiento mínimo en 50mm.	16-18%
Dureza	22-31 HRc

Fuente: Chapel Steel (2022)

2.12. Electrodo Revestidos para Corte

Estos electrodos tienen como función principal la remoción del metal. Estos electrodos están diseñados para producir un arco fuerte donde es generada una reacción química (exotérmica) donde a través del calor, el material es fundido hacia afuera. (Labrador, 2020)

2.13. Factores que Influyen en los Cambios de Temperatura Durante la Soldadura por Arco

La distribución de temperaturas en el soldeo por arco manual con electrodos revestidos (SMAW) está influenciada por los siguientes factores: (Fosca, Introducción a la metalurgia de la soldadura, 2009)

- a. Aporte de calor (Heat input). Es la energía que se genera durante la soldadura. Se calcula por la ecuación 1.

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad Ec. 1$$

Donde:

H_{net} = Calor neto suministrado (j/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

f : Eficiencia térmica

Este aporte de calor está condicionado por la eficiencia del proceso de soldadura. En la tabla 4 se muestra las eficiencias térmicas para los diferentes procesos de soldadura. (Fosca, 2007)

Tabla 4

Eficiencias térmicas de diferentes procesos de soldadura

Proceso	f
SMAW	0.60 – 0.80
GMAW	0.70 – 0.85
TIG	0.60 – 0.65

SAW	0.90 – 0.95
-----	-------------

Fuente: Fosca (2009)

2.14. Zona Afectada por el Calor (ZAC)

En los procesos de soldadura y corte térmico en los que existe fusión, el metal adyacente al cordón de soldadura o ranura de corte puede quedar afectado beneficiosa o perjudicialmente por la misma operación.

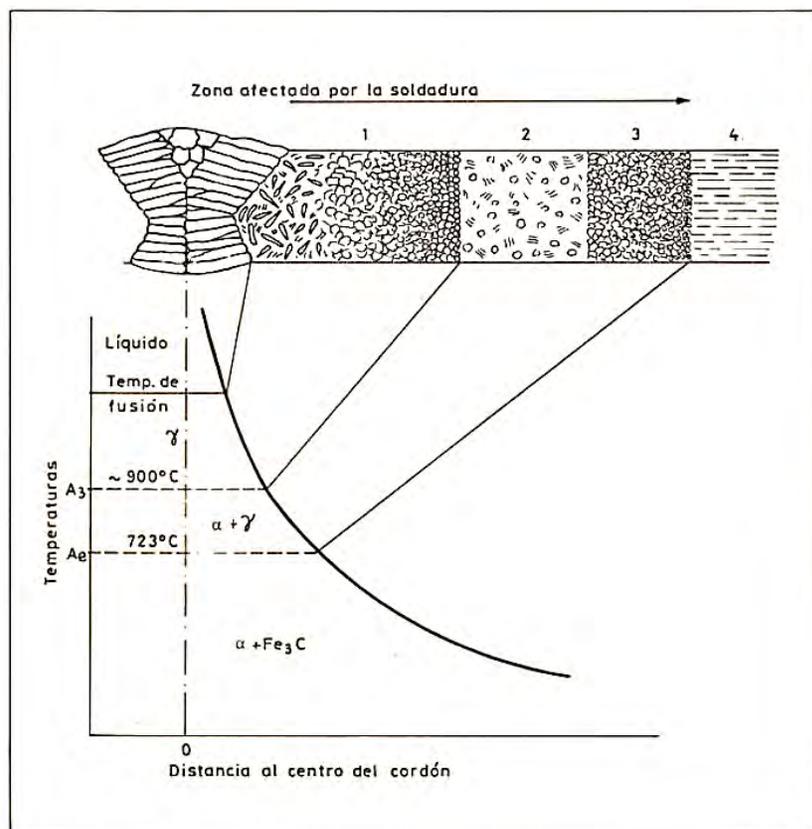
Durante el procedimiento de la soldadura o corte, esta zona se calienta y se enfría: experimenta un tratamiento térmico. En unos casos puede templarse y fragilizarse, y agrietarse en el enfriamiento, mientras que en otros se puede recocer y ablandar. Tales efectos del tratamiento térmico son deseables o no, según las aplicaciones del objeto metálico soldado o cortado.

El metal a soldar o cortar puede resultar deteriorado o mejorado en sus propiedades mecánicas, o bien quedar prácticamente inalterado.

En todas las soldaduras y corte por fusión y en algunas donde no hay fusión, pero se calienta a temperatura elevada, se produce algún crecimiento de grano. El metal cercano al cordón o ranura de corte que se calienta a temperatura superior, está más sujeto a crecimiento de grano que el más alejado.

Figura 15

Esquema de las zonas existentes en la soldadura por fusión



Fuente: Pere Molera Sola (1992)

El metal de grano grueso presenta menor ductilidad y tenacidad que el de grano fino y, cuando se trata de un acero templeable, posee mayor templeabilidad: se dificulta la precipitación de la perlita. Es muy fácil que se produzca martensita dura y son más probables las grietas después de la soldadura o corte, las cuales pueden conducir a la rotura.

Los efectos térmicos de la soldadura o corte se rigen por los mismos principios del tratamiento térmico convencional: diagramas transformación temperatura y tiempo (TTT). Pero en el tratamiento térmico del acero se desea obtener martensita dura, a la que se quita fragilidad con el

revenido, mientras que en la soldadura o corte lo que se pretende es que no se forme martensita y quede una microestructura de ferrita y perlita. Por este motivo, los aceros más fáciles de tratar térmicamente, por tener mucha templabilidad, suelen ser difícilmente de ser cortados o soldados, porque la martensita se forma aun con enfriamientos lentos, aumentando la fragilidad del acero

2.14.1. Cálculo del Ancho de la ZAC

Uno de los empleos más interesantes de la ecuación que nos da la temperatura máxima en un punto, es el cálculo de la anchura de la ZAC por la soldadura. Sin embargo, para calcular la anchura con exactitud debe identificarse, el extremo de la ZAC más alejado de la soldadura mediante un valor máximo de la temperatura en dicho extremo, este valor de la temperatura tiene, a su vez, que corresponder con algún cambio estructural o de las propiedades del material que se suelda.

La limitación más importante es que la ecuación sólo es aplicable a chapas delgadas en las cuales la conducción del calor se efectúa en direcciones paralelas al plano de la chapa. La ecuación se aplica en procesos de pasadas únicas de penetración completa, soldeo o corte térmico, con independencia del espesor de la chapa. De hecho, también se aplica a cualquier soldadura por arco de penetración completa con menos de 4 pasadas. La ecuación 2 puede aplicarse sobre la base de una por pasada, sin embargo, la temperatura entre pasadas, aquella a la cual la zona de soldadura se enfría entre una y otra pasada, puede considerarse como un valor de T_0 en la ecuación del máximo de temperatura. (Fosca, 2009)

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_0} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_0} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4,13. \rho. C. t} \right] \quad Ec. 2$$

2.15. Electroodos Revestidos

El material de aporte que se usa en el proceso se conoce como electrodo y consiste en una varilla metálica, generalmente acero, recubierta de un revestimiento concéntrico de flux extruido y seco. La fabricación de electrodos se realiza en dos líneas en paralelo: varilla o alma, y revestimiento. (Cona Guzman, 2005)

2.15.1. Fabricación de la Varilla

La materia prima, el alambión de 6 a 8 mm de diámetro, que la siderurgia suministra en rollos o bobinas, de aproximadamente 1.000 kg. El fabricante comprueba la composición a partir del análisis químico de un despunte de la bobina y posteriormente ésta pasa a una devanadora protegida por una campana metálica, en donde el alambión se retuerce y desprende el óxido adherido en el tren de laminado en caliente. A esta etapa se le denomina decapado mecánico. Al ser la fabricación de electrodos un proceso continuo, los extremos de cada bobina se empalman por resistencia eléctrica, eliminando las rebarbas de la soldadura con muela de esmeril.

Seguidamente el alambión pasa a las cajas de trefilado donde tiene lugar una reducción progresiva de diámetro hasta el deseado, utilizando sustancias lubricantes para facilitar la operación y evitar un endurecimiento del alambre, que le haga quebradizo. A continuación, se desengrasa o se lava con agua el polvo de jabón adherido a su superficie. Los diámetros del alma son normalmente 1.6, 2, 2.5, 3, 3.25, 4, 5 y 6 mm, siendo los más utilizados los señalados en negrita. Una máquina endereza y corta las varillas a un ritmo entre 580 y 1400 cortes/minuto, en función de su diámetro. (Cona Guzman, 2005)

2.15.2. Fabricación del Revestimiento

Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, como arena de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc. Se realiza un análisis individualizado de la calidad y composición de estos productos.

La selección, origen y dosificación de cada componente que va a intervenir en la composición del revestimiento es un secreto celosamente guardado por los fabricantes. Una vez escogido cada componente, se machaca y criba hasta conseguir la granulometría adecuada y se dosifica mediante un programa de computadora, pasando de un sistema de tolvas específicas de cada producto a una tolva central, donde seguidamente se homogenizan mediante vibradores distribuyéndose después la mezcla en tolvas destinadas a producción.

Para aglutinar la mezcla seca y darle consistencia se agrega silicato sódico o silicato potásico. Una vez obtenida la mezcla húmeda se vierte en una prensa en donde penetra la varilla por un lado saliendo recubierta en toda su longitud por el lado opuesto. Se comprueba la excentricidad del recubrimiento y se cepillan ambos extremos de la varilla revestida. Uno, para el ajuste de la pinza portaelectrodos y el otro, para facilitar el cebado de arco. Se marcan con la identificación del fabricante y el tipo de electrodo según American Welding Society, AWS.

El secado previo se lleva a cabo haciéndolos pasar por un horno de funcionamiento continuo, cuya temperatura se incrementa gradualmente para evitar que se agriete y se desprenda el revestimiento. Para electrodos tipo rutilo normal, el secado previo a una temperatura es de aproximadamente 100 °C es suficiente. Para electrodos básicos, después de este secado previo se pasan a hornos convencionales de aire para darles un secado final a 400-450 °C, con el fin de que

el contenido de H₂O a 1.000 °C según AWS, sea inferior a 0,4%. De esta forma, se asegura que el contenido de hidrógeno sea inferior a 10 CC. por cada 100 gr/metal depositado.

Posteriormente se empaquetan en cajas de cartón o metálicas. Aquéllas suelen protegerse de la humedad con plástico termorretráctil. En general, debe seguirse la regla de que los materiales de aporte deben embalsarse de tal forma que no sufran deterioros, ni se humedezcan, ni se sequen. (Cona Guzman, 2005)

2.16. Revestimientos

2.16.1. Composición del Revestimiento

La composición de los revestimientos suele ser muy compleja. Se trata generalmente de una serie de sustancias orgánicas y minerales. En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- Óxidos naturales: óxidos de hierro, ilemita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- Silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldepasto.
- Productos volátiles: celulosa, serrín.
- Fundentes.
- Productos químicos: carbonatos, óxidos.
- Ferroaleaciones: de Mn, Si, Ti.
- Aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico.

Sin embargo, la naturaleza, dosificación y origen de los componentes permanece en secreto por parte del fabricante que en la práctica se limita a garantizar la composición química del metal depositado y sus características mecánicas: carga de rotura, límite elástico, alargamiento y resiliencia (tenacidad). (Guzman, 2005)

2.16.2. Funciones del Revestimiento

2.16.2.1. Función Eléctrica

Suministra el encendido del arco y lo mantiene con facilidad durante la ejecución de la soldadura, lo anterior se logra por la descomposición de algunos elementos químicos al quemarse en el arco. A su vez generan una atmósfera de gas ionizado conductor de la electricidad. (Doctor Welding, 2021)

2.16.2.2. Función Física

Una misión fundamental del revestimiento es evitar que el metal fundido entre en contacto con el oxígeno, el nitrógeno y el hidrógeno del aire, ya sea por la formación de un gas protector alrededor del camino que han de seguir las gotas del metal fundido y después, mediante la formación de una abundante escoria que flota por encima del baño de fusión.

El revestimiento debe ser versátil y permitir generalmente la soldadura en todas las posiciones. En ello interviene dos factores:

- a. El propio espesor del revestimiento.
- b. Su naturaleza, que determina la viscosidad de la escoria, que es necesaria para mantener la gota en su lugar a través de su propia tensión superficial y para proteger el baño fundido del contacto con el aire.

El revestimiento del electrodo se consume en el arco con una velocidad lineal menor que el alma metálica del mismo. Como resultado, el recubrimiento queda prolongado sobre el extremo del alma y forma un cráter que sirve para dirigir y concentrar el chorro del arco, disminuyendo sus pérdidas térmicas. (Doctor Welding, 2021)

2.16.2.3. Función metalúrgica

El revestimiento dispone de elementos que se disuelven en el metal fundido con objeto de mejorar las características mecánicas del metal depositado.

La escoria:

- Reduce la velocidad de enfriamiento de la soldadura por su efecto aislante;
- Reduce el número de inclusiones en la soldadura, al eliminar un gran número de impurezas;
- Produce en el baño una verdadera micrometalurgia, desoxidando, desnitrurando, desfosforando y desulfurando el metal fundido;
- Aísla el baño de elementos con los que tiene gran afinidad: oxígeno, nitrógeno, hidrógeno ya sea a través de escorias o gases protectores. (Doctor Welding, 2021)

2.17. Características y Propiedades de los Electrodo

En la tabla 5, se observa la codificación de los tipos de electrodo, según la AWS.

Tabla 5*Clasificación de electrodos revestidos según AWS*

La American Welding Society (AWS), clasifica a los electrodos revestidos, para el sistema de soldadura por arco manual, como se especifica en la Tabla 1.1 Electroodos para acero al carbono	
Electrodos para aceros de baja aleación	AWS-A.5.5
Electrodos para aceros inoxidables	AWS-A.5.4

Fuente: “Manual de soldadura” AWS.

- **Electrodos para acero al carbono**

Estos electrodos se clasifican de acuerdo con los criterios siguientes:

- Tipo de corriente a utilizar.
- Tipo de recubrimiento.
- Posición de soldadura aconsejable.
- Composición química del metal depositado.
- Propiedades mecánicas del metal depositado.

- **Electrodos para aceros de baja aleación**

Estos electrodos se clasifican de acuerdo con idénticos criterios que los de acero al carbono, e incluyen las clases siguientes:

- Clase A: Aceros al carbono-molibdeno.
- Clase B: Aceros al cromo-molibdeno.
- Clase C: Aceros al níquel.

- Clase D: Aceros al manganeso-molibdeno.
- Clase N: Aceros al níquel-molibdeno.
- Clase G: Aceros de baja aleación, no incluidos en las otras clases. (BF México, 2017)

- **Electrodos para aceros inoxidables**

Estos electrodos se clasifican de acuerdo con su composición química, propiedades mecánicas y tipo de corriente e incluyen aceros en los que el cromo excede del 4% y el níquel no supera el 37% de la aleación.

En la Tabla 6 y 7, se especifica la clasificación de los electrodos revestidos según su denominación. (BF México, 2017)

Tabla 6

Clasificación de electrodos revestidos

E - 7018 - B3

Letra "E"	Dos o tres Primeros dígitos	Penúltimo dígito
Electrodo para soldar con arco metálico protegido (Eléctrica SMAW)	Resistencia mínima a la tensión del cordón depositado en miles de libras por pulgada cuadrada	Posición ideal de soldadura 1 = Toda posición 2 = Plana y filete horizontal 3 = Plana

Fuente: (BF México, 2017)

Tabla 7

Clasificación de electrodos revestidos

E - 70 18 - B 3

Numeración	Dos últimos dígitos					Letra	Número
	Corriente	Polaridad	Revestimiento	Arco	Penetración	Grupo de aleación	Aleante principal
XX10	CD	PI	Celulosa-Sodio	Enérgico	Alta		
XX11	CA - CD	PI	Celulosa potasio	Enérgico	Alta		
XX12	CA - CD	PD	Rutilo-sodio	Medio	Mediana	A 1	Molibdeno
XX13	CA - CD	PD - PI	Rutilo-Potasio	Suave	Ligera	B 1	Cromo-
XX14	CA - CD	PD - PI	Rutilo-polvo Fe	Suave	Ligera	B 2	Molibdeno
XX15	CD	PI	Bajo Hidrógeno	Medio	Mediana	C 1	Niquel
XX16	CA - CD	PI	Bajo Hidrógeno	Medio	Mediana	C 2	
XX18	CA - CD	PI	Bajo Hidrógeno	Medio	Mediana	C 3	
XX20	CA - CD	PD - PI	Oxido de Hierro	Medio	Mediana	D 1	Molibdeno
XX24	CA - CD	PD - PI	Rutilo	Medio	Mediana	D 2	Manganeso
XX27	CA - CD	PD	Polvo de Hierro	Medio	Mediana	M	Militar
XX28	CA - CD	PI	Bajo hidrógeno	Suave	Ligera	S	No clasificado

Fuente: (BF México, 2017)

2.17.1. Electrodo celulósicos

- **Características específicas**

En estos electrodos la celulosa, obtenida a partir de la pulpa de la madera, es el componente principal. Esta sustancia orgánica se descompone por el calor desarrollado en el arco, proporcionando un gas protector que aísla y protege de la oxidación al Mn y al resto de los componentes. Las reacciones de reducción se desarrollan en una atmósfera de hidrógeno que cubre el metal fundido.

- **Aplicaciones**

Aunque son adecuados para soldar en todas las posiciones, se suelen emplear exclusivamente para soldar tubería en vertical descendente, porque:

- Producen muy poca escoria.
- Se manejan con facilidad.
- Consiguen una buena penetración en el cordón de raíz, en esta posición.

Su uso está generalizado en oleoductos, y gasoductos en donde resulta ventajoso soldar en todas las posiciones, sin cambiar los parámetros de soldeo. También son adecuados en aplicaciones en donde se pretenda conseguir una buena penetración.

2.17.2. Electrodo de rutilo (electrodo de gran rendimiento)

- **Características específicas:**

Esta clase de electrodos fue desarrollada por Van Der Willigen en Holanda a partir del año 1947, añadiendo polvo de Fe al revestimiento. Parece lógico suponer que la posición sobremesa es la más fácil y favorable para la soldadura. En efecto, en esa posición el metal fundido se beneficia de la fuerza de la gravedad y se pueden conseguir las máximas velocidades de deposición. Después de ésta, la más ventajosa es la horizontal en ángulo. Por la economía que supone soldar en ambas posiciones se han desarrollado electrodos específicos que únicamente pueden emplearse en estas posturas de soldeo. Pertenecen a este grupo aquellos electrodos cuya penúltima cifra en su designación AWS es un 2. Se les llama también electrodos de contacto. El rendimiento de un electrodo, en general, es función de la naturaleza del revestimiento, del diámetro y de la intensidad de la corriente.

- **Aplicaciones:**

Estos electrodos requieren altas intensidades de corriente para lograr fundir, además del alma, el polvo de Fe agregado a su revestimiento, por lo que resulta necesario fuentes de energía potentes. Se seleccionan para reducir costes en soldadura, tanto en construcción naval como en talleres de calderería pesada.

2.18. Selección del Tipo de Corriente

La clase de corriente depende fundamentalmente del tipo de electrodo que se va a utilizar. A pesar de que la corriente continua es la más común, la amplia gama de electrodos actualmente en el mercado, que deben utilizarse con corriente alterna han hecho que crezca el uso de este tipo de corriente.

El coste de la energía con corriente alterna es menor que con corriente continua, pero representa una parte poco relevante del coste total de soldadura, no siendo un factor decisivo la selección del tipo de corriente. En la tabla 8 se presenta las características de la corriente continua y corriente alterna.

Tabla 8

Comparación entre uso de corriente continua y alterna

Características	Corriente continua	Corriente alterna
Pérdida de tensión en cables	Grande Los cables han de ser tan cortos como sea posible	Pequeña Preferible para soldar a gran distancia de la fuente.
Electrodos	Son válidos todos los tipos de electrodos.	El revestimiento debe contener sustancias que restablezcan el arco.
Encendido del arco	Fácil.	Más difícil sobre todo en electrodos de pequeño diámetro.
Mantenimiento del arco	Fácil.	Más difícil, excepto cuando se utilizan electrodos de gran rendimiento.

Características	Corriente continua	Corriente alterna
Efecto de soplo	Muy sensible, sobre todo cuando la soldadura está cerca de extremos de la pieza. El efecto se incrementa con la intensidad.	Es raro que se produzca. La alternancia de ciclos neutraliza los campos magnéticos.
Salpicaduras	Poco frecuentes.	Más frecuentes, debido a la pulsación.

Fuente: Henry Horwitz (1990)

2.19. Electrodo Revestidos para Corte

Estos electrodos están diseñados para cortar y perforar todos los metales, con CA o CC, electrodo negativo (DCEP). Son electrodos de alta velocidad y su revestimiento especial de tipo refractario evita que se precaliente el núcleo y concentra la fuerza del arco para lograr cortes parejos y limpios. (Labrador, 2020)

2.20. Dureza Rockwell (Hardness Rockwell Series c.)

El principio de esta, se diferencia de los otros en que para Rockwell la profundidad de la impresión está relacionada con la dureza más que el diámetro o las diagonales de la impresión. Esto agiliza la medida porque la máquina que mide la dureza Rockwell está diseñada para grabar la profundidad de penetración del indentador.

Hay varias escalas Rockwell, las más comunes son:

Escala B (Indentador redondo de acero de 1/16 pulgada de diámetro, 100Kg de carga). Se usa para medir la dureza de los metales no ferrosos

Escala C (indentador en forma de cono 120° de apertura, de diamante, 150 Kg de carga). Se usa para medir la dureza de los aceros.

Ventajas:

- a. Es muy rápido y se puede introducir dentro de una línea de producción para asegurar calidad
- b. El tamaño de la impresión producido es entre Vickers y Brinell
- c. No necesita absoluta regularidad de la superficie pues inicialmente se aplica una carga pequeña para acomodar el indentador y luego se aplica una carga grande para realizar la impresión.

Desventajas

- a. No es tan exacto como el de Vickers, que es más preferido en trabajos de investigación y desarrollo

En la tabla 9, se observa las diferentes escalas de dureza Rockwell.

Tabla 9

Escalas de dureza Rockwell

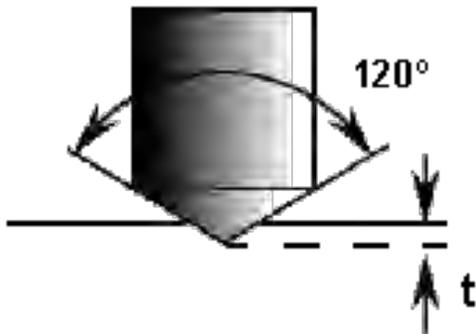
Símbolo de la escala	Penetrador	Carga mayor (kg)	Aplicaciones
A	Diamante	60	Aceros tratados y sin tratar. Materiales muy duros. Chapas duras y delgadas.
B	Esfera de 1/16 pulgada	100	Aceros recocidos y normalizados.
C	Diamante	150	Aceros tratados térmicamente.
D	Diamante	100	Aceros cementados.
E	Esfera de 1/8 pulgada	100	Metales blandos y antifricción.
F	Esfera de 1/16 pulgada	60	Bronce recocido.
G	Esfera de 1/16 pulgada	150	Bronce fosforoso y otros materiales.
H	Esfera de 1/8 pulgada	60	Metales blandos con poca homogeneidad, fundiciones con base hierro.
K	Esfera de 1/8 pulgada	150	Aplicaciones análogas al tipo anterior.

Fuente: (Santos, Yenque, Rojas, & Rosales, 2001)

El ensayo de dureza ROCKWELL C, utiliza como indentador un cono de diamante, tal como se muestra en la figura 16, y utiliza una carga de 150 kg.

Figura 16

Cono de diamante



Fuente: (Calle & Henao, 2020)

La dureza HR se calcula mediante la fórmula:

$$\text{HRC} = 150 - 500t \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

HRC = Dureza Rockwell C

t = Penetración

2.21. El método de Wilcoxon

El método de Wilcoxon, también conocido como la prueba de rangos con signo de Wilcoxon, es una prueba estadística no paramétrica utilizada para comparar las diferencias entre dos grupos relacionados o pareados.

Cuando nos interesa probar la igualdad de las medias de dos distribuciones continuas que evidentemente no son normales, y las muestras son independientes, es decir, que no hay emparejamiento de observaciones, la prueba de la suma de rangos de Wilcoxon o la prueba de dos muestras de Wilcoxon

Para implementar la prueba de Wilcoxon, se obtienen las diferencias para los n pares de observaciones.

Este método se utiliza cuando los datos no cumplen los supuestos de normalidad o cuando los datos están en una escala ordinal.

El procedimiento para realizar la prueba de Wilcoxon es el siguiente:

- Formar las diferencias entre las observaciones pareadas.
- Clasificar las diferencias en orden absoluto, de menor a mayor.
- Asignar rangos a las diferencias, comenzando desde 1 para la diferencia más pequeña y asignando el mismo rango a las diferencias con el mismo valor absoluto.
- Calcular la suma de los rangos positivos y la suma de los rangos negativos.
- Utilizar una tabla de valores críticos o un software estadístico para comparar las sumas de los rangos con un nivel de significancia deseado. Si la suma de los rangos es mayor o igual

que el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula y se concluye que hay una diferencia significativa entre los grupos.

Es importante destacar que el método de Wilcoxon es una prueba no paramétrica y no requiere supuestos sobre la distribución de los datos.

2.22. La prueba de Shapiro-Wilk

La prueba de Shapiro-Wilk es una prueba estadística utilizada para verificar si una muestra de datos sigue una distribución normal.

La hipótesis nula de la prueba de Shapiro-Wilk es que la muestra proviene de una población con distribución normal. La hipótesis alternativa es que la muestra no sigue una distribución normal.

2.23. El procedimiento de la prueba de Shapiro-Wilk

El procedimiento de la prueba de Shapiro-Wilk se basa en calcular un estadístico W que se utiliza para evaluar qué tan bien se ajustan los datos a una distribución normal. Si el valor p asociado al estadístico W es menor que un nivel de significancia predeterminado (por ejemplo, 0.05), se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los datos no siguen una distribución normal.

La prueba de Shapiro-Wilk es ampliamente utilizada en análisis estadísticos para determinar la normalidad de los datos antes de aplicar técnicas o pruebas que asumen distribución normal, como la prueba t de Student o el análisis de varianza (ANOVA). Es especialmente útil en muestras pequeñas, ya que otras pruebas de normalidad pueden no ser tan eficaces en este caso.

Es importante tener en cuenta que la prueba de Shapiro-Wilk es sensible a cambios en el tamaño de la muestra, por lo que los resultados pueden variar según el tamaño de la muestra analizada. Además, es una prueba paramétrica, lo que significa que se basa en supuestos sobre la forma de la

distribución. Si los datos no siguen una distribución normal, existen pruebas no paramétricas que pueden ser más apropiadas.

CAPÍTULO III.

HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis General

El calor generado por el corte por el proceso SMAC, modifica en forma no significativa las características mecánicas (dureza) en la ZAC en el acero ASTM A514-B

3.1.2. Hipótesis Específicas

- a. La intensidad de corriente si desplaza los límites de la zona afectada por el calor del acero ASTM A514 – B sometido al corte por el proceso SMAC.
- b. El diámetro del electrodo de corte modifica el calor neto aportado que altera la zona afectada por el calor de forma indirecta por su estrecha relación con la intensidad de trabajo de los mismo en el corte térmico por el proceso SMAC en el acero ASTM A514-B
- c. La alteración porcentual de la dureza no superara el 5% dentro de la zona afectado por el calor en el acero ASTM A514- B que fue sometido al corte térmico por el proceso SMAC.

3.2. Variables Independientes y Dependientes

3.2.1. Variables Independientes

- Intensidad de corriente
- Diámetro del electrodo
- Tipo de corriente

3.2.2. Variable Dependiente

La dureza en la zona afectada por el calor del acero ASTM A514-B sometido al corte por el proceso SMAC

3.2.3. Variables Operativas

- Humedad ambiental
- Temperatura ambiental.

3.3. Nivel o Tipo de Investigación

Nivel y Tipo de Investigación

- **Nivel:**
 - a. **Descriptivo.** Esta investigación se la realiza describiendo el problema en una circunstancia espacial determinada, además esta investigación será la más adecuada para la problemática de la investigación, por su origen y su desarrollo.
 - b. **Explicativa.** La investigación intenta informar de un aspecto de la realidad, explicando su significatividad dentro de una teoría de referencia encargada de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto.

- **Tipo de investigación:**

Investigación experimental

3.4. Población y Muestra

3.4.1. Población

Acero ASTM A514

3.4.2. Muestra

Se usaron 12 probetas de acero ASTM A514 GR B.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

3.5.1. Técnicas

Se usará la técnica de la inspección visual, dado que las probetas serán objeto de ensayos no destructivos y destructivos. Esta información será sistematizada, analizada, procesada e interpretada para la obtención pertinente de las conclusiones inherentes al tema.

3.5.2. Equipos y Materiales

Durante el desarrollo del trabajo se usarán los siguientes equipos: máquina de soldar, EPPs, durómetro y como materiales electrodos de corte.

3.6. Viabilidad

El desarrollo del presente trabajo de investigación es viable, porque se cuenta con los equipos y materiales necesarios para el desarrollo de la experimentación y control de calidad.

CAPÍTULO IV.

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

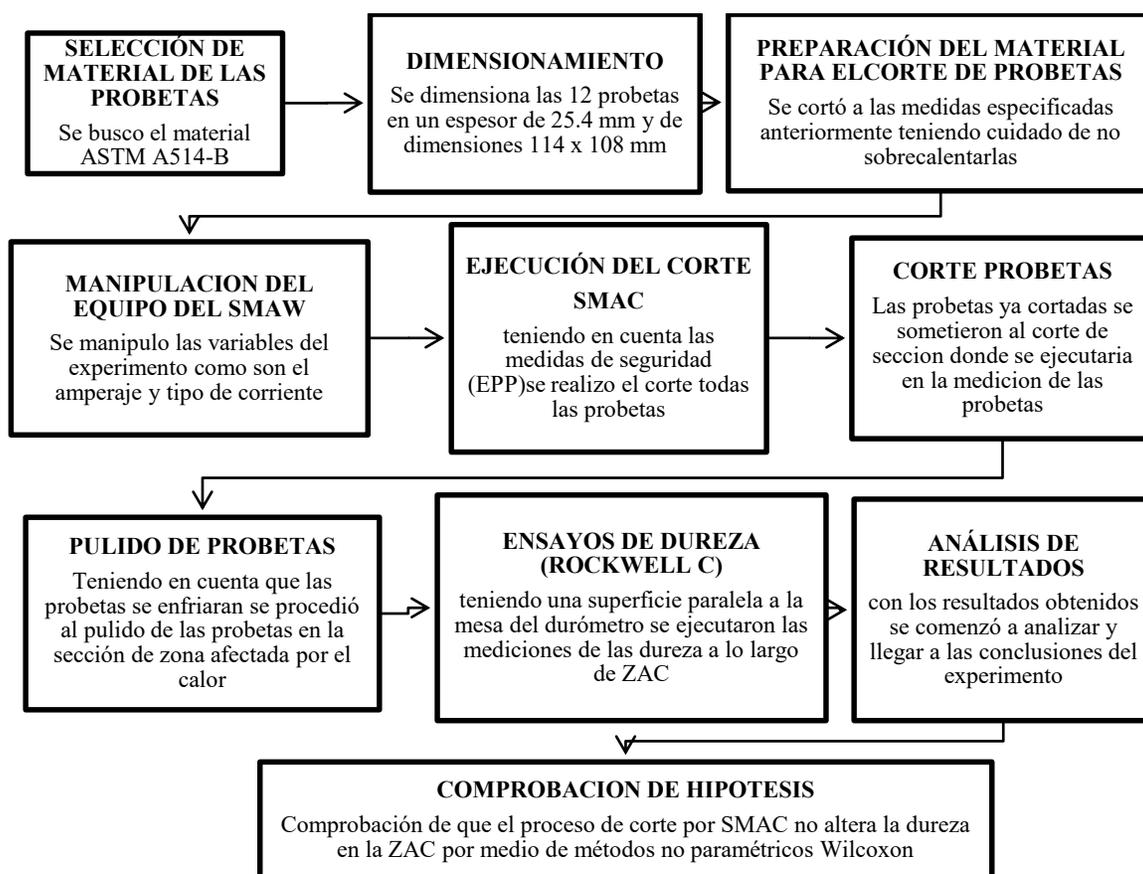
4.1. Desarrollo Experimental

4.1.1. Diagrama de flujo del experimento

El diagrama de flujo que se observa en la figura 17 ayuda a ver de mejor forma el proceso de comprobación y realización del experimento

Figura 17

Diagrama de flujo del experimento



Fuente: Elaboración propia

En resumen, el experimento nos ayuda a comprobar, que este proceso (SMAC), a pesar de trabajar en altos rangos de amperaje sus efectos no son nocivos para este tipo de aceros, es decir, se siguen manteniendo inalterables sus propiedades mecánicas y por ende en un siguiente proceso ya sea de soldeo de este material, se cumplirá con sus especificaciones técnicas.

4.2. Maquinaria y Equipo Utilizados en la Investigación

4.2.1. Fuente De Poder

Para el desarrollo de la investigación se utilizó una fuente de poder con las especificaciones técnicas que se detallan en la tabla 10

Tabla 10

Especificaciones técnicas

Modelo	TRC300 PRO
Proceso	Electrodo
Rango	50 – 300 A
C.T	290
Potencia	24KVA
Voltaje de entrada	220V
Dimensiones.	590x390x760mm.

Fuente: Soldadoras andinas S.A

En la figura 18, se observa la fuente de poder utilizada para la experimentación.

Figura 18

Fuente de poder



Fuente: Soldadoras andinas S.A

4.2.2. Durómetro

El durómetro usado para realizar las pruebas de ensayo, tiene las siguientes especificaciones:

- Carga máxima kgf: 150
- Altura máxima de prueba: 4-1/4"
- Profundidad de la garganta: 5-1/4"
- Profundidad máx. del husillo bajo la base: 2"
- Medida de la base: 7" x 18"
- Altura del durómetro: 24-1/2"
- Peso neto aproximado: 150 lbs
- Carga total en kgf (carga inicial 10 kgf): 60, penetrador Diamante 120°, escala de prueba Rockwell A, adecuado para prueba de Acero con dureza superficiales.
- Carga total en kgf (carga inicial 10 kgf): 100, penetrador bola 1/16", escala de prueba Rockwell B, adecuado para Metales reconocidos ferrosos y no ferrosos.
- Carga total en kgf (carga inicial 10 kgf): 150, penetrador

En la figura 19 se muestra el durómetro utilizado.

Figura 19

Durómetro



Fuente: Elaboración propia

4.3. Materiales para la Investigación

4.3.1. Probetas De Acero ASTM A514-B

Para el presente trabajo se usó el acero ASTM A514 GR B, cuya composición química se muestra en la tabla 11. En una cantidad de 12 probetas de dimensión 114 x 108 x 25.4 mm

Tabla 11

Composición química del acero ASTM 514 GR B

Composición Química	
Carbono (%) máx.	0.12-0.21
Manganeso (%) máx.	0.70-1.00
Fósforo (%) máx.	0.035
Azufre (%) máx.	0.040
Silicio (%) máx.	0.20-0.35
Cromo (%) máx.	0.40-0.65
Vanadio (%) máx.	0.03-0.08
Titanio (%) máx.	0.01-0.03
Boro (%) máx.	0.0005-0.005

Fuente: <https://www.chapelsteel.com/es/a514.html>

4.3.2. Electrodo de Corte

Se usó el electrodo denominado “SUPERCORTE”, de la empresa Oerlikon.

Es un electrodo diseñado para cortar y perforar todos los metales ferrosos y no-ferrosos, empleando fuentes de poder de amperaje constante en corriente continua o corriente alterna. No requiere de equipos auxiliares. El SUPERCORTE cuenta con un revestimiento especial que evita que el electrodo se recaliente, pudiendo incluso resistir mayores amperajes que el recomendado. Electrodo de muy fácil aplicación; para cortar, aplique como si estuviera cortando con un serrucho manteniendo un ángulo de 45° entre el electrodo y la pieza; para perforar mantenga el electrodo perpendicular a la superficie empujando y jalando en la dirección de perforado. Se corta con corriente alterna o corriente continua: Electrodo al polo positivo (DCEP). En la figura 20, se observa el electrodo de corte.

Figura 20

Electrodo de corte



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 12, se detallan los parámetros recomendados para el corte de metales.

Tabla 12

Parámetros de corte

Para corriente alterna (CA) o continua (DC): Electrodo al polo positivo DCEP						
Diámetro (pulg)	1/16"	3/32"	1/8"	5/32"	3/16"	¼"
Amperaje mínimo	_____	_____	120	180	210	_____
Amperaje máximo	_____	_____	140	230	280	_____

Fuente: Exsa. (2020). Catálogo de productos.

- **Aplicaciones del Electrodo “Supercorte”**
- Aplicable sobre materiales difíciles o imposibles de cortar por el proceso de oxicorte, como, por ejemplo: Hierro fundido, acero inoxidable, níquel y aleaciones, aluminio y aleaciones, cobre y aleaciones, etc.
- Recomendado para realizar muescas, remover defectos, descabezar pernos y remaches, hacer agujeros, etc.
- Electrodo ideal para realizar labores de corte y perforación en general.
- Los cortes y perforaciones quedan limpios y con buen acabado.

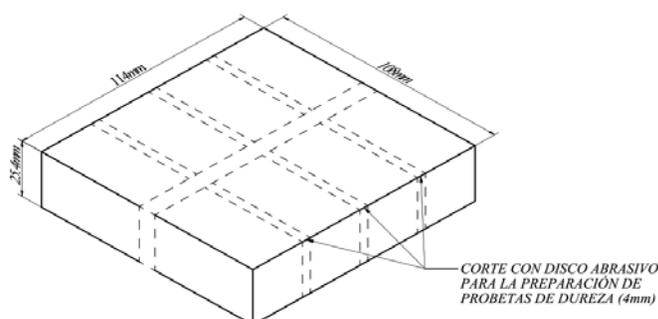
4.4. Obtención y Preparación de Muestras

4.4.1. Características de las Probetas

Las características de las probetas de acero ASTM A514 GrB, que fueron objeto de estudio en el presente trabajo y a las cuales se realizó un corte térmico, tienen las dimensiones de 114 x 108 x 25.4 mm como se ilustra la figura 21 y los anexos 1.

Figura 21

Caracterización de las probetas



Fuente: Elaboración propia

4.5.Corte de las Probetas

El corte de probetas se realizó con los parámetros que se indican en la tabla 13 y cuyo dimensionamiento está basado a la norma AWS D 1.1 2015.Y que se puede observar el proceso de corte en el anexo 02.

Tabla 13

Parámetros para el corte de las probetas

Código de probeta	Intensidad de trabajo (A)	Voltaje de trabajo (V)	Velocidad de avance (mm/s)
AC260 -3.2	260.0	36.6	2.5
AC270 -3.2	270.0	38.0	2.5
AC300 -3.2	300.0	41.5	2.5
AC260 -4.0	260.0	36.6	2.5
AC270 -4.0	270.0	38.0	2.5
AC300 -4.0	300.0	41.5	2.5
DC260 -3.2	260.0	36.6	2.5
DC270 -3.2	270.0	38.0	2.5
DC300 -3.2	300.0	41.5	2.5
DC260 -4.0	260.0	36.6	2.5
DC270 -4.0	270.0	38.0	2.5
DC300 -4.0	300.0	41.5	2.5

Fuente: Elaboración propia

La denominación de las probetas fue de la siguiente manera: los dos primeros dígitos indican el tipo de corriente del experimento AC indica corriente alterna y DC corriente directa o continua. A continuación, los tres números indican la variable del amperaje del equipo o fuente de poder que nos permitía variar y estos están en los rangos de 260, 270 y 300 amperios. Y por último el dígito que varía en los valores de 3.2 y 4.0 indica el diámetro del electrodo utilizado en el proceso de corte SMA.

En cuanto al voltaje de la Tabla 13 se observó en cuando oscilaba este durante el proceso del corte anotándose el resultado para cada probeta. Y para la velocidad tomamos un valor promedio de 2.5mm/s uno basándonos en la tabla 1 como también en la longitud del corte como la capacidad de corte de cada electrodo según su diámetro y amperaje suministrado

En la figura 22, se observa el proceso de corte.

Figura 22

Corte de probetas



Fuente: Elaboración propia

4.6. Cálculos Realizados en la Experimentación

4.6.1. Cálculo del Calor Neto o Energía Neta que se Transfiere a la Pieza

Para determinar el calor neto se calcula con la ecuación 1 del Capítulo II

$$H_{net} = \frac{V \times I}{v} \times f \quad Ec. 1$$

Donde:

H_{net} = Calor neto suministrado (J/mm)

I = Intensidad de corriente (A)

V = Tensión eléctrica (V)

v = Velocidad de soldeo (mm/seg)

f : Eficiencia térmica

En la tabla 14 se muestran los resultados obtenidos del aporte de calor neto aportado.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos reflejan un calor que va desde los **2850 J/mm** en valor más bajo hasta los **3735 J/mm** en su valor más alto, y esto debido a que el material por ser de gran espesor requería un poco más de amperaje del recomendado por las especificaciones técnicas pero que en práctica siempre se dan debido a bajas de tensión en la red de suministro eléctrico.

Tabla 14*Resultado de valores de calor neto aportado*

Código de probeta	Dureza HRC		Intensidad de corriente (A)	Tensión de corriente (V)	Velocidad de avance (mm/s)	Calor neto (J/mm)
	Dureza antes del corte (HRc)	Dureza después del corte (HRc)				
AC260 -3.2	27.5	26.6	260.0	36.6	2.5	2850.90
AC270 -3.2	26.5	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00
AC300 -3.2	27.0	27.8	300.0	41.5	2.5	3735.00
AC260 -4.0	27.0	27.3	260.0	36.6	2.5	2850.90
AC270 -4.0	26.5	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00
AC300 -4.0	27.0	28.2	300.0	41.5	2.5	3735.00
DC260 -3.2	28.0	27.3	260.0	36.6	2.5	2850.90
DC270 -3.2	28.5	27.3	270.0	38.0	2.5	3078.00
DC300 -3.2	27.0	27.8	300.0	41.5	2.5	3735.00
DC260 -4.0	27.0	27.2	260.0	36.6	2.5	2850.90
DC270 -4.0	27.0	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00
DC300 -4.0	27.5	28.0	300.0	41.5	2.5	3735.00

Fuente: Elaboración propia

4.6.2. Cálculo del ancho de ZAC

Para determinar el ancho de la zona afectada por el calor (ZAC) por efecto del calor producido por la fuente de poder, se calculó con la ecuación 2 del Capítulo II. Los valores establecidos para la presente investigación son:

$$Y = \left[\left(\frac{1}{T_{max} - T_o} \right) - \left(\frac{1}{T_{fusion} - T_o} \right) \right] \times \left[\frac{H_{neto}}{4,13 \cdot \rho \cdot C \cdot t} \right]$$

$T_{fusión}$: 1500°C

$T_{máx}$: 723 °C

T_o : 16 °C (temperatura ambiente)

ρ : 7.85 g/cm³ = 0.00785 g/mm³

$$C : 0.134 \text{ cal/g } ^\circ\text{C} \quad (C = 0.561 \text{ J/g } ^\circ\text{C})$$

$$\rho C : \rho \times C = 0.00785 \times 0.561 = \mathbf{0.0044 \text{ J/mm}^3 \text{ } ^\circ\text{C}}$$

$$t : 25.4 \text{ mm}$$

En base a los valores establecidos para la presente investigación y reemplazando en la ecuación 2, se obtuvo los resultados que se muestran en la tabla 15

Tabla 15

Resultados del cálculo del ancho de la ZAC.

Código de probeta	Dureza HRC		Cálculo de la zona afectada por el calor				
	Dureza antes del corte (HRC)	Dureza después del corte (HRC)	Intensidad de trabajo (A)	Voltaje de trabajo (V)	Velocidad de avance (mm/s)	Calor neto (J/mm)	Ancho de la ZAC (mm)
AC260 -3.2	27.5	26.6	260.0	36.6	2.5	2850.90	4.6
AC270 -3.2	26.5	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00	4.9
AC300 -3.2	27.0	27.8	300.0	41.5	2.5	3735.00	6.0
AC260 -4.0	27.0	27.3	260.0	36.6	2.5	2850.90	4.6
AC270 -4.0	26.5	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00	4.9
AC300 -4.0	27.0	28.2	300.0	41.5	2.5	3735.00	6.0
DC260 -3.2	28.0	27.3	260.0	36.6	2.5	2850.90	4.6
DC270 -3.2	28.5	27.3	270.0	38.0	2.5	3078.00	4.9
DC300 -3.2	27.0	27.8	300.0	41.5	2.5	3735.00	6.0
DC260 -4.0	27.0	27.2	260.0	36.6	2.5	2850.90	4.6
DC270 -4.0	27.0	27.5	270.0	38.0	2.5	3078.00	4.9
DC300 -4.0	27.5	28.0	300.0	41.5	2.5	3735.00	6.0

Fuente: Elaboración propia

Ya teniendo el calor neto que obtuvimos y que se muestra en la tabla 15 para cada probeta se calculó la distancia de la zona afectada por el calor para poder saber la distancia tope de medición de la dureza, teniendo una distancia no mayor de 6mm para probetas que se cortaron en un amperaje de 300 amperios, una distancia tope de 4.9mm para las probetas que se cortaron en

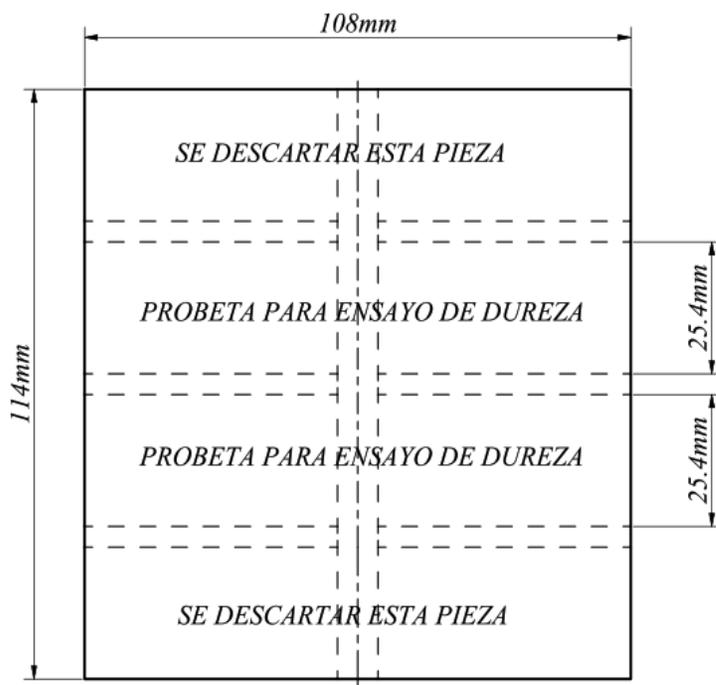
un amperaje de 270 y una distancia de 4.6mm para las probetas que se cortaron a 260 amperios. Cabe mencionar que se decidió tomar seis puntos de medida en la zona afectada por el calor de cada lado de las probetas divididos de forma equidistante de los cuales solo se tomarían tres de cada lado de la probeta para el posterior cálculo de la dureza promedio de cada lado de la probeta que se muestran en las tablas 15 y 16

4.6.3. Cálculo de Dureza

Para la toma de valores de dureza, se obtuvo una muestra de cada probeta, tal como se muestra en la figura 23 y en la figura 24, se muestra un esquema del perfil de la probeta para la medición de la dureza.

Figura 23

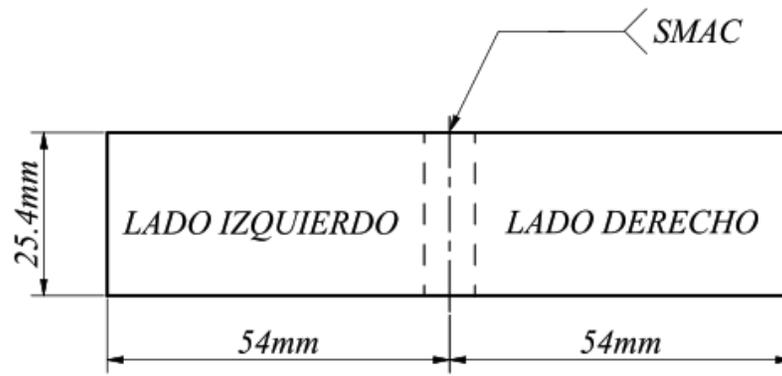
Esquema de obtención de una muestra para realizar la prueba de dureza



Fuente: Elaboración propia

Figura 24

Perfil de la probeta para medición del perfil de dureza.



Fuente: Elaboración propia

Se tomó cada probeta para realizar las pruebas de dureza. Se trazó donde se realizaría los puntos en cada muestra, estas sirvieron para realizar las pruebas de dureza en cada uno de esos puntos. La muestra se colocó en posición paralela a la superficie del durómetro. Se tomó los datos de la medición del durómetro, los cuales se muestran en la tabla 16, teniendo los valores variando desde 26.6 HRc y 28.2 HRc.

En los anexos 2 muestra los puntos de dureza tomados en las probetas de 300A realizado en corriente alterna y con el diámetro del electrodo 3.2mm cabe mencionar el mismo proceso se siguió para las demás probetas

En base a estas características, en la figura 25 y 26 se observa tomando la dureza de las probetas seleccionadas (figura 27).

Figura 25
Toma de muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 26
Toma de muestras



Fuente: Elaboración propia

Figura 27
Probetas seleccionadas



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 16 se muestra los resultados del cálculo de dureza.

Tabla 16

Calculo de dureza

CODIGO DE PROBETA	PROBETA ACERO ASTM A514 GRB	LADO DE LA PROBETA	DUREZA			DUREZA PROMEDIO HRC
			SECCIÓN DE PROBETA			
			P1	P2	P3	
AC260 -3.2	X1	DERECHO	27.5	27.5	27.0	26.6
	X2	IZQUIERDO	26.0	27.0	26.5	
	Y1	DERECHO	26.0	27.0	26.0	
	Y2	IZQUIERDO	26.0	26.0	27.0	
AC270 -3.2	X3	DERECHO	27.0	26.0	26.0	27.5
	X4	IZQUIERDO	27.5	28.5	28.5	
	Y3	DERECHO	28.5	28.5	27.5	
	Y4	IZQUIERDO	26.5	27.0	28.5	
AC300 -3.2	X5	DERECHO	27.0	27.5	29.0	27.8
	X6	IZQUIERDO	29.0	29.0	28.0	
	Y5	DERECHO	27.0	26.5	26.0	
	Y6	IZQUIERDO	28.0	28.0	28.5	
AC260 -4.0	X7	DERECHO	28.0	28.0	28.0	27.3
	X8	IZQUIERDO	28.5	28.5	27.0	
	Y7	DERECHO	26.5	27.0	26.5	
	Y8	IZQUIERDO	26.0	26.5	27.5	
AC270 -4.0	X9	DERECHO	26.0	28.0	25.5	27.5
	X10	IZQUIERDO	28.5	28.0	28.5	
	Y9	DERECHO	28.5	27.5	28.0	
	Y10	IZQUIERDO	26.0	28.0	27.5	
AC300 -4.0	X11	DERECHO	29.0	27.5	26.5	28.2
	X12	IZQUIERDO	27.5	27.5	29.5	
	Y11	DERECHO	27.5	27.0	27.0	

CODIGO DE PROBETA	PROBETA ACERO ASTM A514 GRB	LADO DE LA PROBETA	DUREZA			DUREZA PROMEDIO HRC
			SECCIÓN DE PROBETA			
			P1	P2	P3	
	Y12	IZQUIERDO	30.0	28.5	31.0	
DC260 -3.2	X7	DERECHO	29.5	27.0	27.5	27.3
	X8	IZQUIERDO	27.0	27.0	26.5	
	Y7	DERECHO	27.0	27.5	27.5	
	Y8	IZQUIERDO	26.5	28.5	26.0	
DC270 -3.2	X9	DERECHO	27.5	27.0	27.5	27.3
	X10	IZQUIERDO	28.0	28.0	29.0	
	Y9	DERECHO	28.0	26.0	26.5	
	Y10	IZQUIERDO	28.0	25.0	27.0	
DC300 -3.2	X11	DERECHO	27.0	26.5	27.0	27.8
	X12	IZQUIERDO	28.0	31.5	30.0	
	Y11	DERECHO	28.0	28.0	28.0	
	Y12	IZQUIERDO	27.5	25.5	26.5	
DC260 -4.0	X13	DERECHO	24.5	27.5	29.5	27.2
	X14	IZQUIERDO	28.0	27.0	26.5	
	Y13	DERECHO	28.5	25.5	28.0	
	Y14	IZQUIERDO	27.0	27.0	27.0	
DC270 -4.0	X15	DERECHO	26.0	30.5	27.0	27.5
	X16	IZQUIERDO	27.5	28.0	26.5	
	Y15	DERECHO	29.0	27.0	26.5	
	Y16	IZQUIERDO	26.5	29.0	27.0	
DC300 -4.0	X17	DERECHO	28.0	27.5	28.0	28.0
	X18	IZQUIERDO	27.0	28.0	28.5	
	Y17	DERECHO	27.5	28.5	28.0	
	Y18	IZQUIERDO	28.5	29.5	26.5	

Fuente: Elaboración propia

En las probetas se tomó el valor promedio de dureza, las que se observan en la columna final de la tabla 16, dentro de la zona afectada por el calor y los puntos de toma de dureza se

determinó como se aclaró en párrafos anteriores la zona afectada por el calor. Se tomó un promedio simple aritmético esto apoyado al grado de variación de los valores de dureza comprobados por los valores de desviación estándar de $\sigma = 1.14$ y un coeficiente de variación de $CV = 0.042$ de toda la muestra comparadas al valor promedio de las probetas de corte de 27.5 HRc y la medida dureza de la probeta sin ningún proceso de corte térmico de 27.17 HRc sacados de la tabla 19

Los valores de la desviación estándar, coeficiente de variación y varianza se obtuvieron con las siguientes ecuaciones aplicadas para datos no agrupados:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad ec.3$$

Donde

x : Medida de dureza en la probeta

\bar{x} : Media aritmética de las durezas de las probetas con corte

n : Numero de datos 144

σ : Desviación estándar

$$CV = \frac{\sigma}{|\bar{x}|} \quad ec.4$$

Donde

\bar{x} : Media aritmética de las durezas de las probetas con corte

s : Desviación estándar

CV : Coeficiente de variación

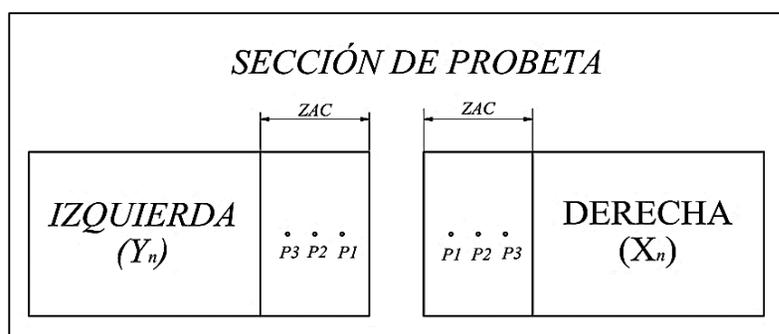
Los resultados nos ayudaron a saber que el valor de dureza oscilo entre 1.14 más del valor promedio en su valor máximo y en su valor mínimo de valor promedio menos 1.14 y apoyado en el coeficiente de variación de 0.04 que nos indica que las medidas solo varían un porcentaje del 4% confirmando que tomar la media aritmética de las durezas es la mejor alternativa y que representa mejor la dureza dentro de la zona afectada por el calor para este experimento.

4.7. Muestreo no Aleatorio

Este procedimiento se aplica con vistas a determinar que el tamaño de la muestra sea lo suficientemente representativa. El tamaño de la muestra se determinó tomando como referencia el cálculo de zona afectado por el calor como muestra la figura 28.

Figura 28

Sección de probeta



Fuente: Elaboración propia

4.8. Límites de Tolerancia

Los analistas de datos están usando procedimientos no paramétricos o de distribución libre cada vez con mayor frecuencia. En la ciencia y la ingeniería hay muchas aplicaciones en las que los datos no se reportan como valores de un continuo, sino, más bien, como una escala ordinal en la que es natural asignar rangos a los datos

Para resolver problemas de ingeniería, se necesita reunir datos y esos datos se deben describir y tener en cuenta para producir información resumida y ser el medio más eficaz de comunicar esa información. Para analizar los datos obtenidos durante la determinación de la dureza en la ZAC de las probetas estudiadas, se aplicó la técnica para el control de las durezas (promedio de durezas), los datos obtenidos se ilustran en la tabla 17

Tabla 17

Resultado de medición de durezas

Código De Probeta	Probeta Acero ASTM A514 GrB	Lado De La Probeta	Dureza			Dureza Promedio HRc
			SECCIÓN DE PROBETA			
			IZQUIERDA (Y_i)	ZAC P1 P2 P3	DERECHA (X_i)	
			P1	P2	P3	
AC260 -3.2	X1	DERECHO	27.5	27.5	27.0	26.6
	X2	IZQUIERDO	26.0	27.0	26.5	
	Y1	DERECHO	26.0	27.0	26.0	
	Y2	IZQUIERDO	26.0	26.0	27.0	
AC270 -3.2	X3	DERECHO	27.0	26.0	26.0	27.5
	X4	IZQUIERDO	27.5	28.5	28.5	
	Y3	DERECHO	28.5	28.5	27.5	
	Y4	IZQUIERDO	26.5	27.0	28.5	
AC300 -3.2	X5	DERECHO	27.0	27.5	29.0	27.8
	X6	IZQUIERDO	29.0	29.0	28.0	
	Y5	DERECHO	27.0	26.5	26.0	
AC260 -4.0	Y6	IZQUIERDO	28.0	28.0	28.5	27.3
	X7	DERECHO	28.0	28.0	28.0	
	X8	IZQUIERDO	28.5	28.5	27.0	
AC270 -4.0	Y7	DERECHO	26.5	27.0	26.5	27.5
	Y8	IZQUIERDO	26.0	26.5	27.5	
	X9	DERECHO	26.0	28.0	25.5	
AC300 -4.0	X10	IZQUIERDO	28.5	28.0	28.5	28.2
	Y9	DERECHO	28.5	27.5	28.0	
	Y10	IZQUIERDO	26.0	28.0	27.5	
AC300 -4.0	X11	DERECHO	29.0	27.5	26.5	28.2
	X12	IZQUIERDO	27.5	27.5	29.5	

Código De Probeta	Probeta Acero ASTM A514 GrB	Lado De La Probeta	Dureza			Dureza Promedio HRc
			SECCIÓN DE PROBETA			
			IZQUIERDA (Y _n)		DERECHA (X _n)	
			P1	P2	P3	
			27.5	27.0	27.0	
			30.0	28.5	31.0	
DC260 -3.2		DERECHO	29.5	27.0	27.5	27.3
		IZQUIERDO	27.0	27.0	26.5	
		DERECHO	27.0	27.5	27.5	
		IZQUIERDO	26.5	28.5	26.0	
		DERECHO	27.5	27.0	27.5	
DC270 -3.2		IZQUIERDO	28.0	28.0	29.0	27.3
		DERECHO	28.0	26.0	26.5	
		IZQUIERDO	28.0	25.0	27.0	
DC300 -3.2		DERECHO	27.0	26.5	27.0	27.8
		IZQUIERDO	28.0	31.5	30.0	
		DERECHO	28.0	28.0	28.0	
DC260 -4.0		IZQUIERDO	27.5	25.5	26.5	27.2
		DERECHO	24.5	27.5	29.5	
		IZQUIERDO	28.0	27.0	26.5	
		DERECHO	28.5	25.5	28.0	
		IZQUIERDO	27.0	27.0	27.0	
DC270 -4.0		DERECHO	26.0	30.5	27.0	27.5
		IZQUIERDO	27.5	28.0	26.5	
		DERECHO	29.0	27.0	26.5	
		IZQUIERDO	26.5	29.0	27.0	
DC300 -4.0		DERECHO	28.0	27.5	28.0	28.0
		IZQUIERDO	27.0	28.0	28.5	
		DERECHO	27.5	28.5	28.0	
		IZQUIERDO	28.5	29.5	26.5	

Fuente: Elaboración propia

Los valores de dureza promedio para cada probeta como se mencionó anteriormente representaran la dureza que nos servirá para poder comprobar la hipótesis mediante los métodos no paramétricos y cuyas unidades se encuentran en HRc.

De los datos de durezas antes y después del corte, se sintetiza en la tabla 18.

Tabla 18

Durezas promedio de las probetas, antes y después del corte térmico

Código De Probeta	Dureza HRc	
	Dureza antes del corte	Dureza después del corte
AC260 -3.2	27.5	26.6
AC270 -3.2	26.5	27.5
AC300 -3.2	27.0	27.8
AC260 -4.0	27.0	27.3
AC270 -4.0	26.5	27.5
AC300 -4.0	27.0	28.2
DC260 -3.2	28.0	27.3
DC270 -3.2	28.5	27.3
DC300 -3.2	27.0	27.8
DC260 -4.0	27.0	27.2
DC270 -4.0	27.0	27.5
DC300 -4.0	27.5	28.0
PROMEDIO	27.21	27.5

Fuente: Elaboración propia

Los datos de las durezas se tomaron antes y después de realizar el proceso de corte por que se demostrara que la alteración de la dureza por medio de este proceso de corte es muy baja,

4.9. Interpretación de la Variación de la Dureza en la ZAC

Las variaciones que se producen en relación con las mediciones de la dureza considerando el antes y después del proceso de corte por el proceso SMAC y por lo cual se planteó el problema de investigación y que responde al objetivo de determinar si las variaciones que se muestren entre los valores de la dureza dentro de la ZAC antes y después del corte por arco eléctrico con electrodo revestido (Supercorte) no es significativa. El criterio que se emplea en la determinación es la prueba de rangos de signos de Wilcoxon para muestras relacionadas, la cual es un procedimiento no paramétrico por lo general es una alternativa adecuada que toma en cuenta tanto el signo como

la magnitud de las diferencias entre cada par de observaciones. Por lo tanto, para tener un buen balance, éste es el mejor método no paramétrico por utilizar para observaciones en parejas es decir antes y después de un procedimiento o tratamiento el cual fue sujeto la muestra

Aunque existen diferentes pruebas estadísticas para verificar el cumplimiento de los supuestos para el análisis de variancia, por tener una cantidad de muestra pequeña y cuyas distribuciones libre y la toma de muestra no es aleatorio es tomado dentro de la ZAC y en puntos determinados por los investigadores, y cuya normalidad se verifica utilizando el criterio de Shapiro-Wilk en muestra pequeñas

4.10. Procedimiento de la Prueba de Rangos de Signos de Wilcoxon

4.10.1. Definición de las Hipótesis.

Hipótesis nula (H_0): No existe diferencias significativas de la dureza después de corte con electrodo supercorte del acero ASTM A514 -B ejecutado por el proceso SMAC

Hipótesis alterna (H_1): Existe diferencias significativas de la dureza después de corte con electrodo supercorte del acero ASTM A514 -B ejecutado por el proceso SMAC

4.10.2. Criterio de rechazo de la hipótesis nula

Para el nivel de significancia $\alpha=0.05$ para una prueba de dos colas.

Para una alternativa bilateral se puede rechazar (H_0): a favor de (H_1): si W^+ o W^- y, en consecuencia, W son suficientemente pequeñas en comparación de valores críticos aproximados. Por lo tanto, no importa cuál sea la hipótesis alternativa cuando el valor estadístico adecuado W^+ o W^- es suficientemente pequeño, se rechaza la hipótesis nula.

El valor del estadístico de cálculo se determina por los valores presentados en la tabla 19.

Tabla 19

Resultados de la prueba de WILCOXON

Código de probeta	Dureza HRc		Prueba de Wilcoxon		Rango
	Dureza antes del corte	Dureza después del corte	Diferencia de dureza	Valor absoluto de diferencia de dureza	
AC260 -3.2	27.5	26.6	0.9	0.9	8
AC270 -3.2	26.5	27.5	-1.0	1.0	9.5
AC300 -3.2	27.0	27.8	-0.8	0.8	6.5
AC260 -4.0	27.0	27.3	-0.3	0.3	2
AC270 -4.0	26.5	27.5	-1.0	1.0	9.5
AC300 -4.0	27.0	28.2	-1.2	1.2	11.5
DC260 -3.2	28.0	27.3	0.7	0.7	5
DC300 -3.2	28.5	27.3	1.2	1.2	11.5
DC300 -3.2	27.0	27.8	-0.8	0.8	6.5
DC260 -4.0	27.0	27.2	-0.2	0.2	1
DC270 -4.0	27.0	27.5	-0.5	0.5	3.5
DC300 -4.0	27.5	28.0	-0.5	0.5	6.5

Fuente: Elaboración propia

Para resolver la tabla 19 y poder dar respuestas nos apoyamos del anexo 03. Se comenzó a calcular la diferencia de cada par de observaciones, luego se le asigna al valor absoluto de cada diferencia un número de posición, siendo la posición 1 para el valor más pequeño. En caso de haber valores repetidos, fenómeno conocido como ligadura o ties, se les asigna como valor de posición la media de las posiciones que ocupan. En la asignación de posiciones se ignoran las diferencias que sean 0.

Se realiza la sumatoria de todos los valores de rangos positivos y también para todos los valores de rangos negativos, teniendo dos resultados $W^+=24.5$ y $W^-=56.5$. Teniendo estos dos valores se trabaja con el valor más $W^+=24.5$ y se compara con los valores del anexo 3 para un

valor de datos de $n = 12$ (probetas) y observando que este tiene que ser igual o menor al valor crítico del anexo 03. Pero en nuestro caso el valor es mayor por cual nos ayudó a comprobar la hipótesis que no existe cambio significativo de la dureza dentro de la zona afectada por el calor después que se ejecutó un corte por el proceso SMAC.

La tabla 20 muestra las expresiones para el cálculo del estadístico que sustenta la prueba

Tabla 20

Muestra las expresiones

N = NUMERO DE MUESTRAS	12
W^+ = SUMA DE RANGOS POSITIVOS	24.5
W^- = SUMA DE RANGOS NEGATIVOS	56.5
W = al mínimo de (W^+ , W^-)	24.5
Para $5 < n < 30$ Z de tabla para $\alpha = 0.05$	14
$24.5 < 14$ no es correcta	

Fuente: Elaboración propia

Decisión.

La decisión se toma sobre la base del criterio de la aceptación de la hipótesis nula.

4.10.3. Variación porcentual de la dureza

Por medio del cálculo de un índice de variación simple podemos determinar si la dureza es porcentualmente alterada y cuyos resultados se muestran en la tabla 21

Tabla 21*Cálculo de la variación porcentual de la dureza*

Código de probeta	Dureza HRc		Calculo variación de dureza		
	Dureza antes del corte	Dureza después del corte	Índice de variación	Porcentaje de variación	Porcentaje promedio de variación de dureza
AC260 -3.2	27.5	26.6	103.3	3.3	
AC270 -3.2	26.5	27.5	96.4	3.6	
AC300 -3.2	27.0	27.8	97.2	2.8	3.2 %
AC260 -4.0	27.0	27.3	98.8	1.2	
AC270 -4.0	26.5	27.5	96.4	3.6	
AC300 -4.0	27.0	28.2	95.7	4.3	
DC260 -3.2	28.0	27.3	102.6	2.6	
DC300 -3.2	28.5	27.3	104.4	4.4	
DC300 -3.2	27.0	27.8	97.2	2.8	2.3 %
DC260 -4.0	27.0	27.2	99.4	0.6	
DC270 -4.0	27.0	27.5	98.0	2.0	
DC300 -4.0	27.5	28.0	98.4	1.6	

Fuente: Elaboración propia

En cuanto al porcentaje de variaciones de la dureza para las probetas, esta se encuentra dentro de un valor que no superan el 4% y que, valida el experimento, dándonos un 96% de inalterabilidad de la dureza y por ende las propiedades físicas ligadas a esta también. Y poniendo de manifiesto que la corriente continua es la más adecuada para el proceso SMAC, es la corriente directa que solo modifico la dureza en valor del 2.3 % comparada con la dureza inicial pero no diferenciando mucho con el corte en corriente alterna dando un valor de 3.2%

CAPÍTULO V.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis e Interpretación de los Resultados

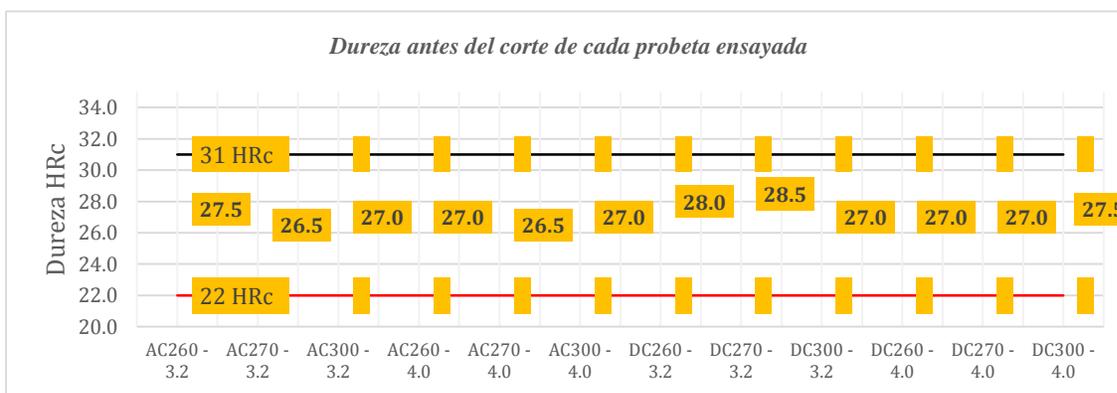
Una vez aplicado los métodos de recolección de la información, se procedió a realizar el tratamiento correspondiente para el análisis de los mismos, por cuanto la información que arrojará será la indique las conclusiones a las cuales llega la investigación, por cuanto se demostrará que la variación de la dureza en la ZAC del acero ASTM A514-B después de que este fue sometido al corte térmico por el proceso SMAC resulta no significativa.

5.1.1. La dureza del acero ASTM A514-B

La dureza antes del corte térmico del acero ASTM A514-B en promedio obtenida es 27.21HRc en cual se encuentra dentro del rango que nos indica el fabricante que es de 22- 31 HRc además las durezas de las doce probetas oscilan desde un valor mínimo de 26.5 HRc a 28.5HRc y que nos servirán para determinar el valor de la dureza en forma porcentual según el tipo de dureza obtenida que se puede ver en la figura 29.

Figura 29

Dureza del acero ASTM A514-B antes del corte térmico



Fuente: Elaboración propia

Debido a que todas las mediciones de dureza se encuentran dentro del rango que menciona el fabricante entonces el material cumplirá con sus especificaciones técnicas asegurando la confiabilidad del experimento

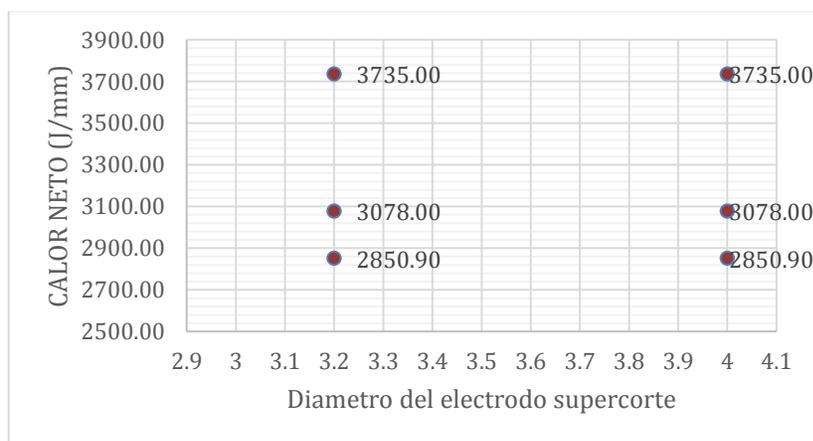
5.1.2. El diámetro del electrodo y su influencia en el calor neto aportado

Al seleccionar el material de aporte o electrodo revestido para el proceso de corte térmico (Supercorte) se contaba con dos dimensiones de sus diámetros del núcleo los cuales son de 3.2mm y de 4mm según especificaciones técnicas ambos tenían rango de amperaje de trabajo, pero a nivel operacional estas eran insuficientes para realizar el corte en el espesor de la probeta seleccionada por lo cual se adecuó los rangos amperaje de trabaja de 260, 270 y 300A para los dos diámetros

Entonces su influencia de estos dos diámetros solo se notó en la ZAC de forma indirecta aumentado el calor neto aportado ligado por el valor de la intensidad seleccionada dando valores desde 2850J/mm a un valor intermedio de 3078J/mm a un valor superior 3735J/mm correspondientes a las intensidades de 260, 270 y 300A respectivamente que se observa en la figura 30.

Figura 30

Efecto del diámetro del electrodo en el calor neto



Fuente: Elaboración propia

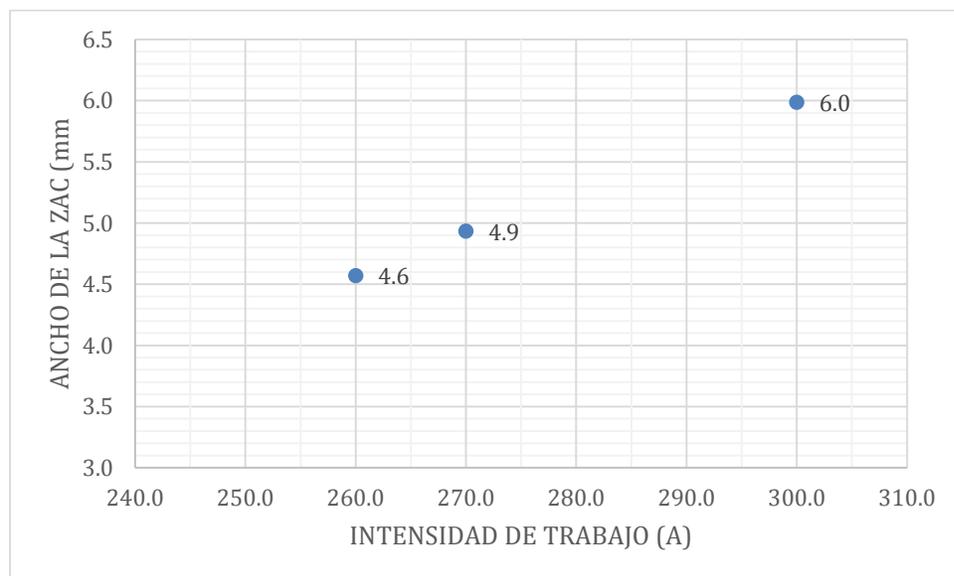
El calor neto resulta el mismo en ambos diámetros de electrodos porque se adecuo por razones operativas y que estos solo se diferenciaban en dimensiones de sus diámetros de 0.8 mm pero en ambos casos estos tienen influencia en la disminución o el aumento de la zona afectada por el calor porque estos nos dan los amperajes de trabajo adecuados

5.1.3. Intensidad de trabajo y el ancho de la zona afectada por el calor

Las intensidades de corriente aplicada para el corte en corriente alterna y corriente continua en polaridad inversa fueron de 260A, 270A y 300A y correspondiente a ellos, los voltajes de 36.6V, 38.0V y 41.5V respectivamente, dando como resultados el ancho de la zona afectada por el calor como valor mínimo de 4.6 mm, valor intermedio de 4.9 mm y valor máximo de 6.0 mm también correspondientes a las intensidades mencionadas anteriormente

Figura 31

Relación de la intensidad y el ancho de la ZAC



Fuente: Elaboración propia

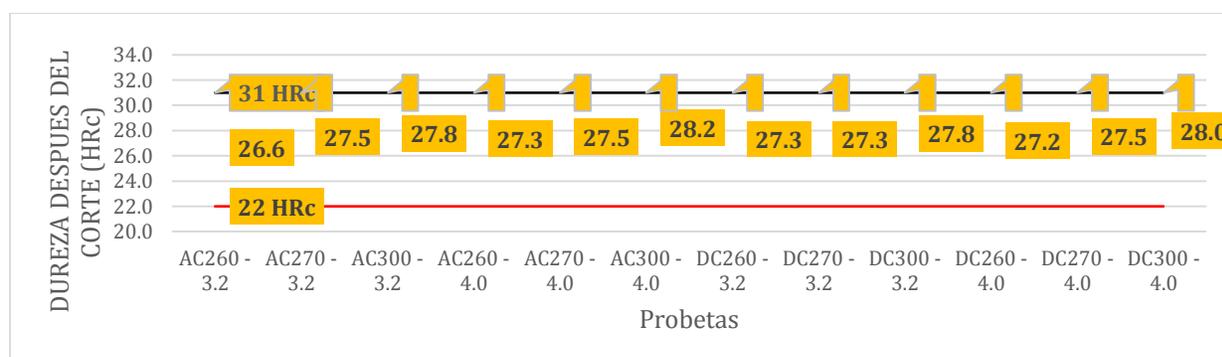
La figura 31 nos ayuda entender de mejor forma que existe una relación estrecha entre la intensidad de trabajo en la zona afectada por el calor, haciendo que un incremento de la intensidad de trabajo aumentara el ancho de la zona afectada por el calor en el corte térmico además mencionar que los resultados visto pueden ser sujetos a una regresión lineal simple y así poder determinar los valores del ancho de la zona afectada por el calor solo cuando se cuenta con un valor de la intensidad de corte térmico, pero teniendo cuidado que los demás parámetros sea semejantes a los del experimento realizado

5.1.4. Dureza después del corte

La dureza después del corte térmico del acero ASTM A514-B en promedio obtenida es 27.5HRc en cual se encuentra dentro del rango que nos indica el fabricante que es de 22- 31 HRc además las durezas de las doce probetas ya sometidas a corte térmica oscilan desde un valor mínimo de 26.6 HRc a 28.2HRc y que nos servirán para determinar la significancia de la variación de la dureza mediante una prueba de rango de Wilcoxon, el valor de durezas obtenidas que se puede ver en la figura 32

Figura 32

Dureza del acero ASTM A514-B después del corte térmico



Fuente: Elaboración propia

Debido a que todas las mediciones de dureza después del corte se encuentran dentro del rango que menciona el fabricante, el material cumplirá con sus especificaciones técnicas incluso si este fue sometido al aumento de temperatura que ocasiona el proceso SMAC asegurando la confiabilidad del experimento

5.1.5. La dureza por lado de probeta (Izquierda - derecha)

En la tabla 22 se explica de mejor forma que la diferencia entre las durezas de ambos lados de las probetas ensayadas observado una diferencia de en las probetas de corte térmico en corriente alterna de 0.6HRc apoyados en el margen de error típico de un durómetro Rockwell C se encuentra dentro de ± 1 punto en la escala Rockwell C.

Además, es importante recalcar que el margen de error puede aumentar si se utilizan muestras con geometrías o superficies irregulares, si hay problemas de alineación o si se utilizan técnicas de prueba incorrectas. Por lo tanto, es fundamental seguir los procedimientos de prueba adecuados y contar con personal capacitado para obtener resultados precisos y confiables.

Para las probetas de corte térmico en corriente continua en polaridad inversa la diferencia entre las durezas de ambos lados de las probetas ensayadas es cero por lo que no existe variación alguna

Tabla 22

Dureza promedio por lado de probeta ensayada

Tipo de corriente	Lado de la probeta	Promedio de dureza por lado HRc
AC	DERECHO	27.2
	IZQUIERDO	27.8
DC	DERECHO	27.5
	IZQUIERDO	27.5

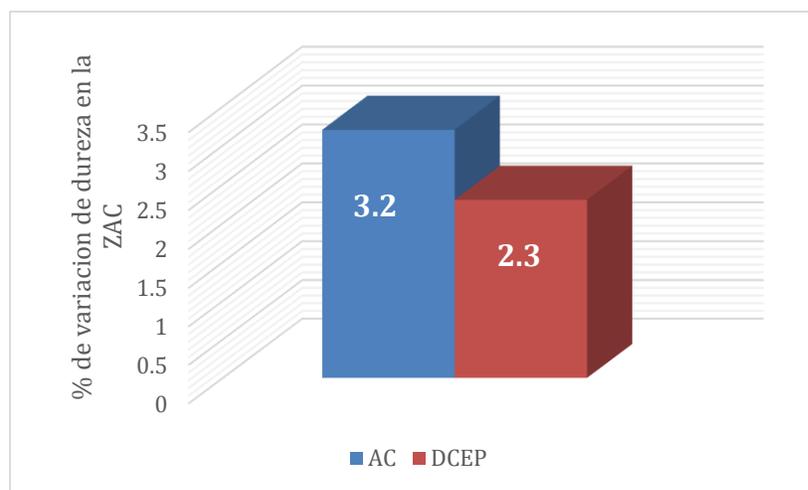
Fuente: Elaboración propia

5.1.6. Tipo de corriente y el porcentaje de variación de dureza en la ZAC después del corte

Después de aplicar el corte térmico en el acero ASTM A514-B, se comprueba que, si existe variación de la dureza, y que esta comprende en un rango hasta de 0 - 5% y que su influencia directa es por el tipo de corriente. Se entiende que la corriente alterna se caracteriza por oscilar en dirección y magnitud en forma periódica (50-60ciclos/s) y que la corriente continua en polaridad inversa no altera a dirección del flujo de corriente ya que se mantiene estable.

Figura 33

Influencia del tipo de corriente en la variación porcentual de la dureza en la ZAC



Fuente: Elaboración propia

Los valores que se muestran en la figura muestran que la dureza varía en un valor promedio de 3.2% en corriente alterna y de 2.3% en corriente continua en polaridad inversa y esta última produce menos porcentaje de alteración debido a que el flujo de electrones se da del polo negativo al positivo y en este tipo de polaridad se estaría forzando el cambio del flujo natural de los electrones y esto facilitaría el calentamiento del metal base en el proceso de corte térmico y facilitando el mismo.

CONCLUSIONES

1. El calor generado por el proceso de corte térmico SMAC produce cambios no significativos en las propiedades mecánicas de la dureza de la ZAC en el acero ASTM A514-B porque estas se mantienen dentro del rango de 22HRc a 31HRc que según propiedades mecánicas iniciales como es la dureza y que cuyo valor es 27.2HRc y en comparación con el valor promedio final de su dureza 27.5 HRc y apoyados en las pruebas no paramétricas se encuentra con sus propiedades inalterables y brindando la confiabilidad para la utilización de este tipo de acero sometido a corte térmico para cualquier tipo de proceso posterior
2. La intensidad de corriente, aunque está ligada a la ampliación o reducción de forma directa de la zona afectada por el calor y que esta a su vez al diámetro del electrodo para su escalamiento, esta tiene una influencia de relevancia mínima en la ZAC del acero ASTM A514-B por el proceso de corte térmico SMAC porque el proceso se realizó con una velocidad de avance optima de 2.5 mm/s además que la técnica de soldeo ayudo a que en el proceso de corte no se presente zonas de sobrecalentamiento excesivo, resultando finalmente en una alteración mínima debido a esta variable de la dureza en la ZAC
3. Para la utilización de un diámetro del electrodo 3.2 o de 4mm las escalas de intensidad que se tomaron en cuentan son de 260A, 270A y de 300A que afectaron directamente al calor neto suministrado en el proceso de corte y que a su vez este afectó al ancho de la zona afectada por el calor pero no al cambio de la dureza porque la mayoría de calor suministrado se desprendía en el material de desecho de corte ya que ambos dejaban una apertura de corte igual porque la diferencia entre los diámetros era de tan solo 0.8mm y

que con ayuda del tipo de revestimiento del electrodo de supercorte y su función metalúrgica del mismo y que el proceso se realizó con una eficiencia de 75% no llegaron al alterar significativamente la dureza dentro de la zona afectada por el calor.

4. En cuanto a la dureza, varia en un valor promedio de un 3.2% en la ZAC cortando con corriente alterna y varía en un 2.3% cortando con corriente continua en polaridad inversa debido a que el flujo de electrones se da del polo negativo al positivo y en este tipo de polaridad se estaría forzando el cambio del flujo natural de los electrones y esto facilitaría el calentamiento del metal base en el proceso de corte térmico y facilitando el mismo y con respecto a la dureza de la probeta sin corte valores que son muy bajos y que no llegan representar un cambio importante.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que la velocidad de corte para este tipo no varíe del valor 2,5 mm/s porque este influirá directamente en la eficiencia del corte térmico.
2. No requiere de otro ensayo más que el de dureza porque no se notó un cambio notorio en la misma, de lo contrario si este ocurría se tenía que dar un ensayo metalográfico para el estudio del mismo.
3. Se recomienda la difusión de la utilización de métodos no paramétricos como la prueba de Wilcoxon, debido a que en la investigación en ingeniería se está utilizando con mayor frecuencia en la actualidad.
4. Para el proceso de corte mediante electrodo revestido se recomienda de la utilización de la técnica de soldeo adecuada para poder generar menos impacto o alteración en el material a cortar sobre todo en trabajos donde hay zonas de difícil manipulación del equipo de corte

BIBLIOGRAFIA

- American Welding Society. (1996). Manual de soldadura tomo II. México: Prentice-Hall Hispanoamericana S.A.
- CESOL, A. e. (2012). Curso de formación de Ingenieros Internacionales de Soldadura–IWE. Procesos de corte, Punzonado y Preparación de Bordes. Asociacion española de soldadura y tecnologias de union, España, España
- Fosca. (2009). Introduccion a la metalurgia de la soldadura.
- Guzman, J. M. (2005). ENSAYOS DESTRUCTIVOS Y NO DESTRUCTIVOS DE PROBETAS DE ACERO SOLDADAS CON ELECTRODOS REVESTIDOS. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Giachino, Joseph W., Weeks, William (1988). Técnica y práctica de la soldadura. Western Michigan University, Kalamazoo, Michigan.
- Molerá Sola P., (1992) Soldadura industrial clases y aplicaciones editorial Marcombo, S.A
- BF México. (20 de Septiembre de 2017). Tipos de Electroodos. Obtenido de bfm.com: <https://bfmx.com/soldadura/tipos-de-electrodos/>
- Calle, G., & Henao, E. (2020). Dureza ROCKWELL. Obtenido de <http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf>
- Chapel Steel. (2022). ASTM A514. Obtenido de www.chapelsteel.com: <https://www.chapelsteel.com/es/a514.html>
- Cona Guzman, J. (2005). Ensayos destructivos y no destructivos de probetas de acero soldadas con electrodos revestidos. Universidad Austral de Chile, Valdivia. Obtenido de <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2005/bmfcic744e/doc/bmfcic744e.pdf>
- Doctor Welding. (19 de Febrero de 2021). ¿Cuáles Son Las Funciones Del Revestimiento Del Electrodo? Obtenido de doctorwelding.com: <https://doctorwelding.com/cuales-son-las-funciones-del-revestimiento-del-electrodo/>
- Horwitz, H. (1990). Soldadura : aplicaciones y práctica. Obtenido de biblioteca.epn.edu.ec: <https://biblioteca.epn.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=29313>
- Labrador, B. (20 de Mayo de 2020). Electroodos Para Carbonear. Obtenido de www.stargas.com.ve: <https://www.stargas.com.ve/blog/electrodos-para-carbonear/>
- Miromina Acero de Calidad. (2022). Plancha Laminada en caliente A514 GR B. Obtenido de <https://www.miromina.com.pe/product/laminada-en-caliente-a514-gr-b/>

Perez Peña, L. I. (2020). Automatización de una máquina cortadora plasma para materiales metálicos de espesores entre 1 y 50 mm. Pontificia Universidad Católica Del Perú , Lima. Obtenido de <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/16732>

TWI Ltd. (2020). Oxyfuel Cutting - Process and Fuel Gases.

<https://www.twi-global.com>

Santos, E., Yenque, J., Rojas, O., & Rosales, V. (2001). Acerca del ensayo de dureza. Obtenido de sisbib.unmsm.edu.pe:

https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol4_2/a13.pdf

ANEXOS

Anexo 1

Ficha técnica del electrodo “Supercorte”.

SMAW

Corte y Biselado



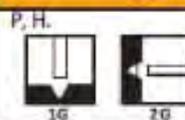
SUPERCORTE

Electrodo diseñado para cortar y perforar todos los metales ferrosos y no-ferrosos, empleando fuentes de poder de amperaje constante en corriente continua o corriente alterna. No requiere de equipos auxiliares. El SUPERCORTE cuenta con un revestimiento especial que evita que el electrodo se re-caliente, pudiendo incluso resistir mayores amperajes que el recomendado. Electrodo de muy fácil aplicación; para cortar, aplique como si estuviera cortando con un serrucho manteniendo un ángulo de 45° entre el electrodo y la pieza; para perforar mantenga el electrodo perpendicular a la superficie empujando y jalando en la dirección de perforado.

Conservación del producto

- Mantener en un lugar seco y evitar la humedad.
- No requiere almacenamiento bajo horno.

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	180	210	-
Amperaje máximo		-	-	140	230	280	-

Aplicaciones

- Aplicable sobre materiales difíciles o imposibles de cortar por el proceso de oxiacorte, como por ejemplo: Hierro fundido, acero inoxidable, níquel y aleaciones, aluminio y aleaciones, cobre y aleaciones, etc.
- Recomendado para realizar muescas, remover defectos, descabezar pernos y remaches, hacer agujeros, etc.
- Electrodo ideal para realizar labores de corte y perforación en general.
- Los cortes y perforaciones quedan limpios y con buen acabado.

Anexo 2

Diferentes actividades realizadas durante la experimentación.

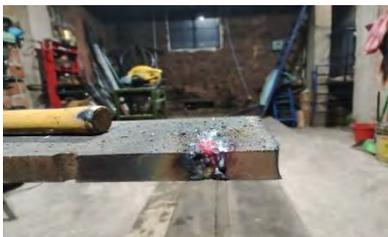
Preparando las probetas (1)



Preparando las probetas (2)



Corte térmico de la probeta (1)



Corte térmico de la probeta (2)



Probeta con canal de corte



Calibrando el durómetro



Indentador del durómetro



Probetas seleccionadas



Probeta (DC) para prueba de dureza



Probeta (AC) para prueba de dureza



Realizando prueba de dureza



Vista al interior del taller de pruebas



Anexo 3

Tabla usada para la prueba de Wilcoxon

Tabla A.16 Valores críticos para la prueba de rangos con signo

n	Unilateral $\alpha = 0.01$ Bilateral $\alpha = 0.02$	Unilateral $\alpha = 0.025$ Bilateral $\alpha = 0.05$	Unilateral $\alpha = 0.05$ Bilateral $\alpha = 0.1$
5			1
6		1	2
7	0	2	4
8	2	4	6
9	3	6	8
10	5	8	11
11	7	11	14
12	10	14	17
13	13	17	21
14	16	21	26
15	20	25	30
16	24	30	36
17	28	35	41
18	33	40	47
19	38	46	54
20	43	52	60
21	49	59	68
22	56	66	75
23	62	73	83
24	69	81	92
25	77	90	101
26	85	98	110
27	93	107	120
28	102	117	130
29	111	127	141
30	120	137	152

Reproducida de F. Wilcoxon y R. A. Wilcox, *Some Rapid Approximate Statistical Procedures*, American Cyanamid Company, Pearl River, N. Y., 1964, con autorización de la American Cyanamid Company.