

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Diseño de método para desmontaje de un tanque de almacenamiento de  
GLP usando un equipo de corte por arco de plasma”

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero en Materiales**

Presentado por:

Roberto Fernando Rodríguez Avelino

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## **DEDICATORIA**

Dedico esta tesis a la Escuela Superior Politécnica del Litoral y a la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, instituciones que me brindaron las herramientas y conocimientos necesarios para llevar a cabo esta investigación. Agradezco su constante apoyo y su dedicación a la formación de profesionales competentes en el campo de la ingeniería. Espero que este trabajo contribuya a la ampliación del conocimiento en la materia y sea un testimonio de mi gratitud hacia esta prestigiosa institución.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres por su amor incondicional, apoyo constante y por creer en mí desde el primer momento. Gracias a su esfuerzo, dedicación y sacrificio, hoy puedo alcanzar este logro que siempre soñé: el Título de Ingeniero en Materiales. Este logro no es solo mío, sino que es el resultado de la unión de nuestros esfuerzos. Ustedes siempre estuvieron a mi lado, en los buenos y malos momentos, y me brindaron el aliento y la motivación necesaria para seguir adelante. No hay palabras para describir lo agradecido que estoy por tenerlos como mis padres.

## DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, me corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Roberto Fernando Rodríguez Avelino* y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Roberto Fernando  
Rodríguez Avelino

## **EVALUADORES**

---

**Jonathan David Reyes, MPhil.**

PROFESOR DE LA MATERIA

---

**Julián Peña Estrella, MSc.**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

Los tanques esféricos de hidrocarburos son susceptibles a diversas fallas, razones por las cuales estas estructuras necesitan el servicio de desmontaje, traslado y montaje.

El objetivo principal de este proyecto fue diseñar un método para realizar un procedimiento que contempló vías de análisis del material y mecanismos de acción, con los cuales se pueda ejecutar la tarea de seccionar los pétalos que integran el tanque.

Fue indispensable el uso de las normas técnicas de procedimiento y requisito de la aleación para la caracterización de material. Se realizó ensayos de análisis químico, dureza, caracterización macroscópica y metalográfica de una la aleación A572. Se logró identificar el aumento del 17% de dureza en el borde cercano a la zona de corte respecto a su valor nominal, en concordancia con una configuración de martensita o posible bainita aglomerada en el contorno del corte.

En cuanto a la secuencia de corte, se contempló características técnicas de maquinaria pesada, consumibles, máquinas de corte y máquinas de precalentamiento para lograr un cronograma de actividades con un total de 120 días, presupuestando valores que lograron estar 32 % por debajo de los precios expuesto en licitaciones públicas.

Tomando en cuenta que el mayor requisito propuesto para este análisis es tener una Zona Afectada por el Calor (ZAC) mínima, se concluyó que el uso del corte térmico por arco de plasma es la solución más viable.

**Palabras Clave:** ZAC, Metalografía, Dureza, Microestructura.

## **ABSTRACT**

*Spherical hydrocarbon tanks are susceptible to various failures, which is why these structures need to be disassembled, moved and reassembled.*

*The main objective of this project was to design a method to execute a procedure that includes routes of analysis of the material and mechanism of action, with which the task of cutting the petals that integrate the tank.*

*It was essential to use the technical standards of procedure and requirement of the alloy for material characterization. Chemical analysis, hardness, macroscopic and metallographic characterization tests were carried out on alloy A572. It was possible to identify a 17% increase in hardness at the edge near the cutting zone with respect to its nominal value, in accordance with a martensite or possible agglomerated bainite configuration at the cutting edge.*

*The cutting sequence contemplated the technical characteristics of heavy machinery, consumables, cutting machines and preheating machines to obtain a chronogram of activities with a total of 120 days. Estimating values that reach 32% below the prices exposed in public offers.*

*Taking into account that the major requirement proposed for this analysis is to have a minimum Heat Affected Zone (HAZ), it was concluded that the use of plasma arc thermal cutting is the most viable solution.*

**Keywords:** *HAZ, Metallography, Hardness, Microstructure.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS .....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE PLANOS.....	X
CAPÍTULO 1 .....	1
1.    Introducción.....	1
1.1    Descripción del problema .....	2
1.2    Justificación del problema .....	3
1.3    Objetivos .....	3
1.3.1    Objetivo General.....	3
1.3.2    Objetivos Específicos.....	3
1.4    Marco teórico .....	4
1.4.1    Proceso de corte.....	4
1.5    Proceso de Corte por Arco de Plasma .....	5
1.6    Tipos de cortes por arco de plasma .....	8
1.6.1    Corte por aire.....	8
1.6.2    Corte por inyección de oxígeno y protección de agua.....	10
1.6.3    Corte de plasma con alta tolerancia .....	11
1.6.4    Corte de plasma con la técnica gubia .....	12
1.6.5    Gases utilizados en el corte por plasma.....	12
CAPÍTULO 2.....	14



2.	Metodología.....	14
2.1	Alternativas de solución del problema .....	14
2.2	Factores de influencia para la matriz de decisión .....	15
2.2.1	Versatilidad.....	15
2.2.2	Seguridad .....	15
2.2.3	Calidad de corte.....	16
2.2.4	Productividad .....	16
2.2.5	Costo operacional.....	16
2.3	Análisis de decisión.....	17
2.4	Caracterización de material.....	20
2.4.1	Composición química.....	20
2.4.2	Inspección visual .....	20
2.4.3	Macrografía .....	21
2.4.4	Metalografía.....	21
2.4.5	Dureza .....	21
2.5	Seccionamiento del tanque. ....	22
2.6	Análisis de costo .....	23
CAPÍTULO 3 .....		24
3.	Resultados y análisis.....	24
3.1	Caracterización del material.....	24
3.1.1	Composición química.....	24
3.1.2	Inspección visual .....	24
3.1.3	Macrografía .....	25
3.1.4	Metalografía microscópica .....	26
3.2	Dureza .....	30
3.3	Proceso de corte .....	31

3.3.1	Seccionamiento de tanque .....	31
3.3.2	Equipos por implementar .....	33
3.3.3	Procedimiento de corte .....	36
3.4	Costo de inversión del proyecto .....	37
3.5	Tiempo de ejecución del proyecto .....	38
3.6	Viabilidad del proyecto. ....	39
CAPÍTULO 4 .....		40
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	40
4.1	Conclusiones.....	40
4.2	Recomendaciones.....	40

## BIBLIOGRAFÍA

## APÉNDICES

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
ASME	The American Society of Mechanical Engineers
AWS	American Welding Society
ISO	International Organization for Standardization
OFC	Oxy-Fuel Combustion
LBC	Laser Beam Cutting
PAC	Plasma Arc Cutting
GLP	Gas Licuado de Petróleo
CNC	Control Numérico Computarizado
OES	Optical Spectroscopy Emissive
GDS	Glow Discharge Spectrometer
HSLA	High-Strength Low-Alloy Steel
ZAC	Zona Afectada por el Calor
XRF	Fluorescencia de Rayos X
VAE	Valor Agregado Ecuatoriano

## SIMBOLOGÍA

m	Metro
in	Pulgada
mm	Milímetro
min	Minuto
Cu	Cobre
Ni	Níquel
Cr	Cromo
C	Carbono
Mn	Manganeso
P	Fósforo
Si	Silicio
Ar	Argón
N	Nitrógeno
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
°C	Grados Centígrados
°F	Grados Fahrenheit
A	Amperio
l	Litro
HRC	Dureza Rockwell C
HRB	Dureza Rockwell B
lb	Libras
kg	Kilogramos
tn	Tonelada
g	Gramos
kW	Kilowatt
VCD	Voltaje de Corriente Directa
V	Voltios

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Boquilla para la formación de gas ionizado [7].	4
Figura 1.2 Corte por oxicorte [9].	5
Figura 1.3 Temperaturas en el arco de plasma [12].	6
Figura 1.4 Terminología del proceso PAC [12].	7
Figura 1.5 Esquema del proceso corte plasma con aire[16].	8
Figura 1.6 Esquema del proceso de corte de plasma con fluido refrigerante [16].	11
Figura 1.7 Esquema ilustrativo de boquilla para corte plasma de alta tolerancia [16].	11
Figura 1.8 Esquema del corte superficial por gubia [21].	12
Figura 1.9 Corte por plasma: automatizado izquierda, manual derecha [8].	13
Figura 3.1 Inspección visual muestra ASTM A572 cortada por plasma, a) calidad superficial, b) c) y d) efecto térmico superficial.	25
Figura 3.2 Macrografía de probeta ASTM A572 atacado con Nital al 5%.	26
Figura 3.3 Muestra @ 1000X atacada con Nital 5%, en borde de corte.	26
Figura 3.4 Muestra @ 1000X atacado con Nital 5%, a 1.5 mm del borde.	27
Figura 3.5 Muestra @ 1000X atacado con Nital 5%, a 2 mm del borde.	27
Figura 3.6 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 2.5 mm del borde.	28
Figura 3.7 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 3mm del borde.	29
Figura 3.8 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 3.2 mm del borde.	29
Figura 3.9 Muestra @ 500X atacado con Nital al 5%, >15mm zona no afectada.	30
Figura 3.10 Distribución de la dureza con respecto al valor nominal.	31
Figura 3.11 Esquema de las partes del tanque esférico a seccionar.	32
Figura 3.12 Vista isométrica del tanque esférico.	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Parámetros de corte plasma manual y mecanizado para aluminio [18]. .....	10
Tabla 2-1 Análisis de decisión. ....	19
Tabla 3-1 Composición química del acero ASTM A572 [28]. ....	24
Tabla 3-2 Resultados del ensayo de barrido de dureza Rockwell. ....	30
Tabla 3-3 Cronograma de actividades para desmontaje de tanque. ....	33
Tabla 3-4 Características generales de equipos de corte por plasma. ....	35
Tabla 3-5 Características de manta térmica. ....	36
Tabla 3-6 Especificaciones de proceso de corte. ....	37
Tabla 3-7 Resumen de valores por proyecto. ....	38
Tabla 3-8 Resumen de cronograma de ejecución del proyecto. ....	38

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1. A-1 Regiones del tanque .....	15
Plano 2. A-2 Desmontaje 1.....	16
Plano 3. A-3 Desmontaje 2.....	17
Plano 4. A-4 Desmontaje 3.....	18

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

Ecuador ha desarrollado diferentes tipos de empresas que ofrecen servicios de soluciones en soldaduras, una de sus ramas es dar solución a cortes térmicos de material metálico, y entre las técnicas tradicionales nos encontramos con oxicorte (OFC), corte por haz láser (LBC) y corte con arco de plasma (PAC) [1].

El corte con arco de plasma es un proceso que permite cortar materiales metálicos. Este proceso funciona al generar una corriente eléctrica de alta frecuencia que calienta y vaporiza el material, lo que permite separar las piezas con precisión.

En la industria petroquímica, el corte con arco de plasma se utiliza para la fabricación de componentes para refinerías, instalaciones de procesamiento de petróleo y gas, y otros equipos y estructuras relacionados con la producción de petróleo y gas.

Además, el corte con arco de plasma es una alternativa más eficiente y precisa al corte tradicional con oxicorte, ya que puede cortar materiales de igual espesor, pero de manera más rápida. Adicional, el proceso es más seguro ya que no usa gases altamente volátiles, lo que reduce el riesgo de incendios en entornos altamente inflamables.

Los depósitos de forma esférica, regido bajo parámetros de construcción ASME Section VIII Div.1 [2], se utilizan en grandes industrias para almacenar gases y líquidos.

Dentro de la industria petroquímica, los tanques esféricos se sitúan como elementos indispensables ya que en ellos se basa capacidad de producción, métodos de fabricación y rapidez de distribución de los diferentes hidrocarburos.

Bajo este contexto, En el presente proyecto propone el uso de corte con arco de plasma, debido a los parámetros técnicos requeridos y el costo beneficios que ofrece.



## 1.1 Descripción del problema

En la actualidad, los terminales petroquímicos se encuentran formados por tanques cilíndricos y esféricos con una serie de ductos interconectados para gestionar el almacenamiento y distribución de diferentes tipos de productos de origen fósil. Estas obras son emblemáticas y una vía de desarrollo socio - económico para los países que lo construyen, debido a que generan economía circular, más aún si se integran a refinerías y pozos petroleros. Por ello, son estructuras muy costosas de construir y sus mantenimientos deben ser rigurosos.

Los tanques metálicos son susceptibles a fallas, debido a la naturaleza de sus materiales, condiciones de uso, características regionales y desastres naturales. Los factores que encabezan las causas de la falla de los tanques esféricos están relacionados a corrosión en los depósitos de acero, explosión por sobrecarga del producto almacenado, colapso estructural, fallas de uniones mecánicas, defectos en el hormigón de cimentación y condiciones de asentamiento no uniforme del suelo.

Los tanques de 23 metros de diámetro y 50 mm de espesor usados para el almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP) son los más comunes dentro de Ecuador. Por otro lado, para el 2021, se registraron 323 deslizamientos de tierra en zonas recurrentes de la región interandina[3], lo que implicaría salvaguardar los tanques esféricos de hidrocarburos. Estos tanques pueden ser desmembrados, transportados y reensamblados en regiones menos conflictivas.

En la actualidad, nuestro país no cuenta con personal técnico especializado, ni con los equipos para desarrollar el desmontaje de la estructura. Además, es indispensable no alterar de forma radical la microestructura de las piezas metálicas que conforman el tanque esférico, con el fin de evitar inconvenientes al momento de ser reensamblado.

## **1.2 Justificación del problema**

La industria de hidrocarburos presenta un inherente riesgo por su grado de inflamabilidad, razones por la cual existen terminales de carga de hidrocarburos que requieren subsanar fallas a nivel de cimentación [4]. Este proyecto contempla la necesidad específica del desmontaje de un tanque esférico de 23 m de diámetro y 50 mm de espesor para uso de GLP, incluyendo sus puntales de base. Debido a que se realizará un reensamblaje, el metal base debe ser apto para procesos de soldadura, razón por la cual el método usado contempla parámetros de selección de tipo de gases de protección, tipo de gas de plasma, corriente y velocidad de corte; los cuales deben estar en función del espesor, con el fin de obtener un cambio microestructural mínimo en la superficie cortada y una zona afectada por el calor (ZAC) baja, basándose en requisitos mínimos y máximo dados por normas aplicables con relación a requerimiento del material, procesos y seguridad. El proceso Corte por Arco de Plasma (PAC), entre sus beneficios, tiene el reducir la cantidad de escoria, pandeo y ZAC. El aumento significativo de la velocidad de corte del PAC genera características superiores de desempeño al corte térmico de oxiacetileno, evadiendo así operaciones de procesado mecánico sobre el perfil del metal cortado generado por oxicorte [5].

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Desarrollar un método para desensamblar un tanque de hidrocarburos de 23 m de diámetro con el uso de equipo de corte por arco de plasma.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Seleccionar los equipos adecuados que permitirán la ejecución de proceso de una manera óptima mediante el análisis de los parámetros del material.
- Identificar los cambios estructurales superficiales del material cortado mediante micrografía óptica para observar la influencia del proceso.
- Estimar el costo de la implementación del proceso de desmontaje con el uso de mano de obra y consumibles nacionales para analizar su factibilidad de ejecución en base al presupuesto referencial.

## 1.4 Marco teórico

Para el presente apartado, se va a recurrir a la información teórica y conceptual de los aspectos más relevantes de cada uno de los elementos del tema propuesto.

### 1.4.1 Proceso de corte.

El corte térmico es el proceso mecánico – térmico que separa una pieza de forma específica de una hoja de metal debido a la interacción de calor. Entre los procesos de corte tenemos:

#### 1.4.1.1 Corte por plasma

El corte por plasma se basa en elevar la temperatura del metal a cortar de una forma muy delimitada usando el gas de corte transformado en plasma con temperatura en alrededor de  $24.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , justamente los electrones se disocian del átomo a este rango de temperatura, la propiedad de cortar se genera en la antorcha por la ionización y polaridad que adquiere al cerrar el circuito como se apreciar en la Figura 1.1 [6].

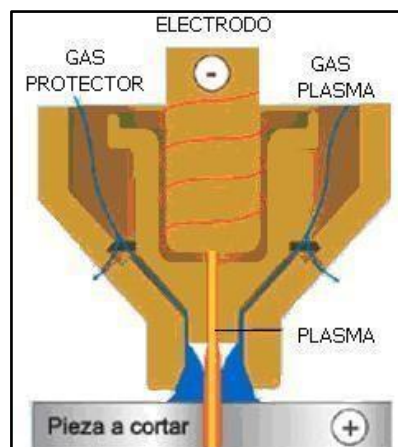


Figura 1.1 Boquilla para la formación de gas ionizado [7].

#### 1.4.1.2 Corte por oxicorte

Este proceso consiste en aumentar la temperatura del material a  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$  con la llama producida por el oxígeno y un gas combustible (acetileno); esta operación conlleva al aumento del flujo de oxígeno, generando una fuerte reacción exotérmica

para oxidar el hierro y transformarlo en óxido de hierro, derritiéndose en forma de chispa y así produciendo el corte del material (Figura 1.2) [8].



**Figura 1.2 Corte por oxicorte [9].**

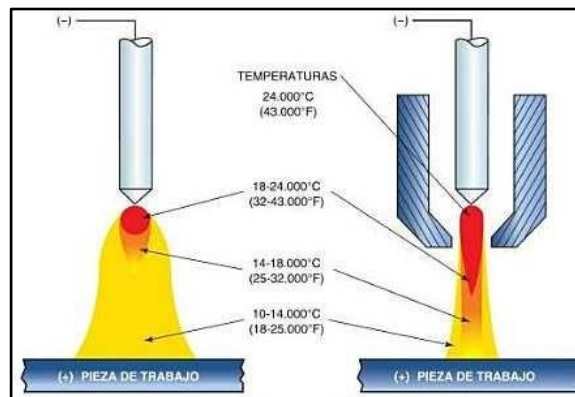
#### **1.4.1.3 Corte por láser**

Es una de las principales técnicas comúnmente usadas para el corte de piezas de metal de espesor menor a 20 mm. Su fuente de energía es un haz láser que concentra una elevada cantidad de luz (energía) en la superficie de trabajo. El principio de funcionamiento consiste en excitar las moléculas de CO<sub>2</sub> para emitir radiación láser, esto se logra mediante la aplicación de alta frecuencia con un dispositivo denominado resonador. El láser proyectado sobre la superficie incrementa la intensidad hasta alcanzar la fusión del material y es expulsado con ayuda de un gas auxiliar [8], [10].

### **1.5 Proceso de Corte por Arco de Plasma**

El término arco de plasma se define como el calentamiento parcial de un gas, capaz de ser ionizado, con el fin de transmitir la corriente eléctrica, cerrando el circuito con carga negativa en la antorcha y el positivo en el material base.

El corte por arco de plasma (PAC), trabaja a temperaturas en rango de 10.000 °C a 24.000 °C (18.000 °F a 43.000 °F), para cortar metal por fusión [11]; como se muestra en la Figura 1.3.

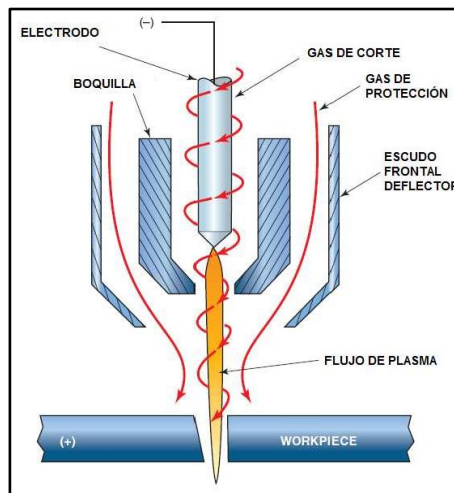


**Figura 1.3 Temperaturas en el arco de plasma [12].**

El flujo de plasma es direccionado a alta velocidad hacia la pieza que se requiere cortar, lo que genera una ranura producto de la acción de fundir e impulsar el metal a raíz del avance de arco de plasma. El arco de plasma se genera al cerrar el circuito entre un electrodo (cátodo) dentro de la antorcha y la pieza de trabajo (ánodo). A través de la boquilla fluye el plasma que, a partir de controlar los parámetros deseados de trabajo y alinear el chorro de plasma, puede impregnar temperaturas extremadamente altas, lo cual aumenta el calor en el metal produciendo su corte, esta acción está representada en la Figura 1.4 .

Entre los principales gases para generar plasma está el aire, el nitrógeno, el hidrógeno, el argón o una mezcla de estos. Con frecuencia se dirigen gases secundarios o agua para rodear el chorro de plasma que, a diferencia de los gases primarios, se implementan para confinar el arco, enfriar los componentes, y limpiar la ranura de metal que se forma luego del corte[13].

Entre las operaciones e incluyen el biselado (corte con ángulo) y el corte a lo largo de una trayectoria definida manual o programada.



**Figura 1.4 Terminología del proceso PAC [12].**

El corte por arco de plasma se puede utilizar para seccionar casi cualquier metal que sea eléctricamente conductor. Los metales cortados con más frecuencia mediante PAC son aceros al carbono, aceros inoxidable y el aluminio. Dependiendo del espesor del material, la velocidad puede ser altas en comparación a velocidades del oxicorte. Por ejemplo, en una placa de aluminio de 6 mm se puede alcanzar hasta 1200 mm/min, y 5100 mm/min para una placa de acero con las mismas características de espesor [13].

La investigación sobre la descripción paramétrica del proceso contempla establecer el método para seleccionar parámetros de entrada y de salida que influyen la calidad del corte.

**Parámetros de entrada.** – Son aquellos parámetros que pueden controlarse con el fin de tener resultados de calidad aceptables; estos parámetros son valores conocidos desde el inicio de proceso, por ejemplo, tipo de aleación del material, espesor y ángulo de corte.

**Parámetros de salida.** – Tiene relación con desempeño de productividad del proceso, calidad del corte final y costos inherentes del corte.

En cuanto al acabado de corte, previamente se mencionó que el PAC genera poca escoria, por lo que los cortes efectuados con arco de plasma deben ser buenos de

tal manera que posteriormente se pueda dar inicio al proceso de soldadura, sin ningún trabajo de preparación extra.

Para determinar la calidad de corte, según la norma ISO 9013, se contempla tres parámetros de salida: inclinación o ángulo de bisel, cantidad de escoria y apariencia del corte. Por esta razón se establecen dos criterios técnicos: el medible que se basa en verificar el ángulo de inclinación para realizar el bisel y la condición de la superficie cortada, que como requisito establece presentar poca formación de escoria y asperezas [14].

En cuanto a la calidad de corte, se ve influenciado en gran medida a los ajustes de los parámetros de entrada, entre ellos se puede identificar la distancia de la antorcha con respecto a la pieza de trabajo, la velocidad de corte por parte del operario, el amperaje que genera el arco, tipo de gas y presión de gas adecuada.

## 1.6 Tipos de cortes por arco de plasma

### 1.6.1 Corte por aire

Este tipo de corte se introdujo alrededor del año 1963, denominado corte por plasma convencional. Usa un solo gas a velocidad muy elevada, pero su limitante es el espesor del material a cortar ya que usa una corriente nominal inferior a 100 A, logrando cortar hasta 15.88 mm con calidad aceptable, el esquema de funcionamiento se observa en la Figura 1.5 [15], [16].

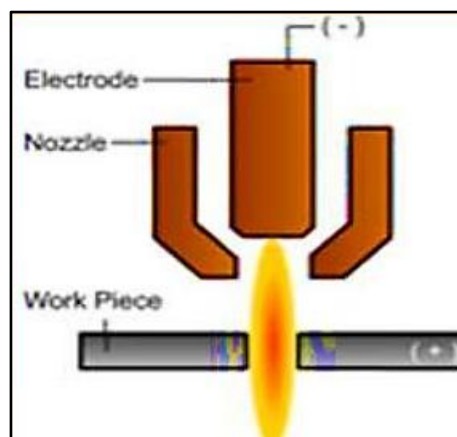


Figura 1.5 Esquema del proceso corte plasma con aire[16].

El gas de corte más usado en el PAC es el aire, debido a que es el más barato y el más fácil de conseguir. La calidad de corte está ligada a la pureza del gas y el espesor de los metales a cortar. Este método comúnmente usa un electrodo de “hafnium” que sería el más adecuado para cortar hasta 6 mm, el cual está diseñado para transportar la corriente hasta la placa de metal y no generar la formación de corrosión durante el proceso [17]. En la Tabla 1.1 se puede verificar parámetros comunes para el uso de esta técnica de corte, donde se destaca el incremento de velocidad a partir de la naturaleza del tipo de método de corte, ya sea manual o computarizado. De forma puntual en 50 mm de espesor se puede evidenciar una diferencia notable entre diferentes métodos aplicado al aluminio y este trasciende para otros metales ferrosos.



**Tabla 1.1 Parámetros de corte plasma manual y mecanizado para aluminio [18].**

Espesores	Gas para el plasma	Flujo de gas (l / min.)	Gas protector	Flujo de gas (l / min.)	Corriente (Amp.)	Velocidad (mm. / min.)	Método
1	Aire	98				4800	Manual
1.5	Aire	98				6300	
3	Aire	98				3000	
6.5	Aire	98				10000	
6.5	N <sub>2</sub>	34	CO <sub>2</sub>	100		1800	
6.5	Ar+N <sub>2</sub>	25			200	1500	
10	N <sub>2</sub>	35	CO <sub>2</sub>	100	200	1250	
12.5	Ar+N <sub>2</sub>	28			280	1000	
25	Ar+N <sub>2</sub>	33			330	500	
50	Ar+N <sub>2</sub>	45			400	500	
6	Ar+N <sub>2</sub>	55			300	7500	Mecanizado
6	N <sub>2</sub>	32	CO <sub>2</sub>	100	115	1800	
10	N <sub>2</sub>	32	CO <sub>2</sub>	100	120	900	
12.5	N <sub>2</sub>	32	CO <sub>2</sub>	100	120	480	
12.5	N <sub>2</sub>	32	CO <sub>2</sub>	100	300	3200	
12.5	Ar+N <sub>2</sub>	60			300	5000	
25	N <sub>2</sub>	70	CO <sub>2</sub>	100	400	1800	
25	Ar+N <sub>2</sub>	60			375	2300	
50	Ar+N <sub>2</sub>	32	CO <sub>2</sub>	100	400	800	
50	Ar+N <sub>2</sub>	60			375	500	
75	Ar+N <sub>2</sub>	95			420	380	
75	Ar+N <sub>2</sub>	45	N <sub>2</sub>	100	400	500	
75	Ar+N <sub>2</sub>	45	N <sub>2</sub>	100	700	650	
100	Ar+N <sub>2</sub>	95			450	750	
125	Ar+N <sub>2</sub>	95			475	250	

### 1.6.2 Corte por inyección de oxígeno y protección de agua

Para que el consumible tenga mayor tiempo de vida útil, este método implementa la generación de plasma a partir del oxígeno y la inyección de fluido refrigerante por la boquilla, lo cual mejora la disminución de calor focalizada en la antorcha, y por ende el deterioro prematuro del electrodo; además de disminuir la oxidación del material. Este proceso está optimizado para trabajar en aceros inoxidables y el esquema de funcionamiento se lo puede observar en la Figura 1.6 [19].

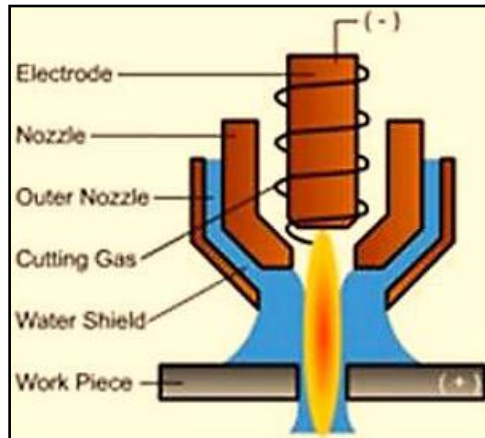


Figura 1.6 Esquema del proceso de corte de plasma con fluido refrigerante [16].

### 1.6.3 Corte de plasma con alta tolerancia

En mejora de los parámetros de calidad regidos por las normas, el proceso de corte de alta tolerancia esta desarrollado para abarcar precisión, y la forma de obtenerla es disminuyendo la velocidad; sin embargo, una limitante de este proceso es el espesor, se ha logrado tener resultado optimo con espesores inferiores a 12.7 mm. Como se aprecia en la Figura 1.7, esta tecnología trata de constreñir el arco para así potenciar la densidad de energía. Velocidad bajas y controlables para este proceso solo son obtenidas mediante aplicaciones mecanizadas bajo parámetros computarizados. El acabado superficial tiene características de perpendicularidad, tamaño de surco y rugosidad con velocidades de 1800 mm/min en espesor de 4 mm para metales ferrosos [15], [18].

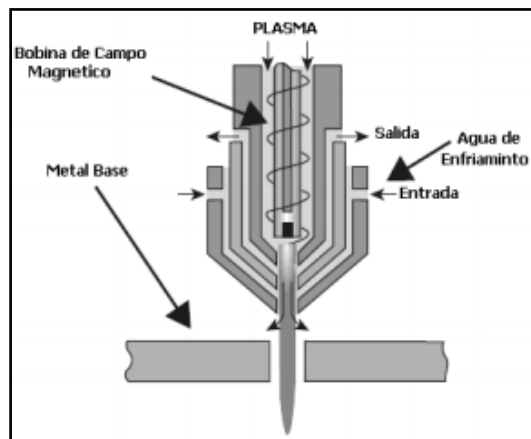


Figura 1.7 Esquema ilustrativo de boquilla para corte plasma de alta tolerancia [16].

#### 1.6.4 Corte de plasma con la técnica gubia

Este proceso, representado en el esquema de la Figura 1.8, consiste en implementar un soplete con una inclinación establecida, por donde se genera el chorro de plasma. Esta boquilla usa un gas protector que contribuye al proceso, de tal forma que elimina material de forma superficial generando surcos, es ideal para realizar socavamientos o eliminar defectos específicos en procesos de soldadura [20].

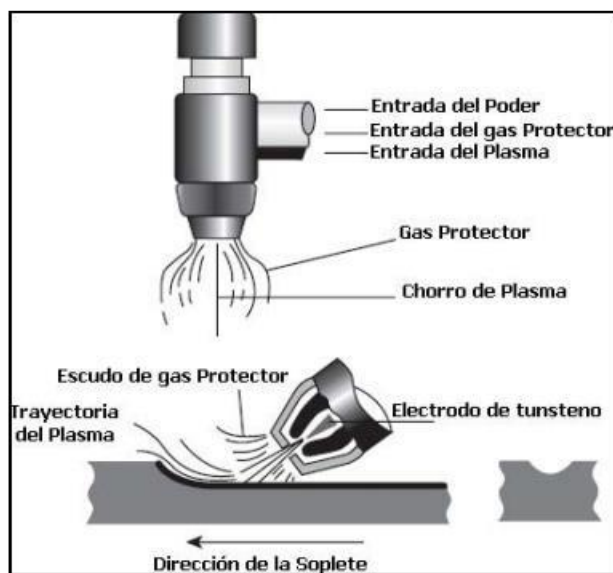


Figura 1.8 Esquema del corte superficial por gubia [21].

#### 1.6.5 Gases utilizados en el corte por plasma

Como gases generadores de plasma tenemos: argón, nitrógeno y aire, o una mezcla de estos gases. Para garantizar una alta vida útil de la boquilla y buena calidad de corte, generalmente se utiliza el nitrógeno de alta pureza.

Las dos zonas principales en el proceso de corte son:

- Zona envolvente: Es la región más fría y con gas sin ionizar que envuelve la zona central. La boquilla no es afectada por altas temperaturas y se aísla eléctricamente para mantener el arco de la región de plasma.
- Zona central: Está conformada por una columna de plasma donde las temperaturas oscilan entre 10.000 °C y 30.000 °C, esta región presenta mayor conductividad térmica puesto que la densidad de partículas ionizadas es alta.

El arco que se genera entre el metal y la boquilla durante el proceso de corte se denomina arco transferido. La alta frecuencia generada por el equipo consigue que se caliente el gas “plasmágeno” a través de la ionización para finalmente establecer el arco - plasma. La conductividad eléctrica dentro de la zona de corte es asistida con un arco piloto que hace que el arco - plasma empiece el proceso de eliminación del metal, como se aprecia en la Figura 1.9, ya que se cumpliría el cierre del circuito entre la pieza cargada positivamente y el electrodo con carga negativa. En ocasiones se puede evitar usar el arco piloto, reemplazado por la técnica de “arco no transferido”, que consiste en generar el arco - plasma a partir del contacto del electrodo de la boquilla con la pieza a cortar [8].



**Figura 1.9 Corte por plasma: automatizado izquierda, manual derecha [8].**

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

A continuación, se analizarán las distintas alternativas de solución presentadas.

### 2.1 Alternativas de solución del problema

- Oxicorte: El corte con oxicomcombustible es el proceso más económico para cortar acero dulce y de baja aleación, incluso con preparaciones de soldadura involucradas. El oxicorte se considera uno de los procesos de manufactura más importantes en toda la industria metalúrgica.

El proceso de corte con oxicorte se ve favorecido cuando el borde de corte del plasma se considera inaceptable o si se busca una alternativa de bajo costo. El oxicorte es un proceso de combustión que utiliza oxígeno o una llama de gas combustible. La llama de calentamiento agrega calor al material. Luego, se sopla un chorro de oxígeno de al menos 99.5 % de pureza sobre el punto calentado, oxidando el metal. El metal en llamas se convierte inmediatamente en óxido de hierro líquido. Este chorro de oxígeno es el origen del término “corte por llama” [22].

- Corte por Plasma: El corte por arco de plasma es un proceso de corte no tradicional que se utiliza en la industria de la soldadura para cortar metales y otros materiales. En este proceso, se utiliza un arco eléctrico entre la boquilla y el material a cortar para fundir y separar el material.

El corte por arco de plasma se realiza mediante la generación de una llama de plasma caliente y altamente concentrada. El plasma es un gas ionizado que se produce mediante la aplicación de una alta frecuencia eléctrica al gas portador. La llama de plasma es controlada mediante una boquilla y una corriente eléctrica.

El corte por arco de plasma es un proceso eficaz y versátil en la industria de la soldadura, capaz de cortar una amplia gama de materiales con alta velocidad y precisión. Sin embargo, también presenta desafíos y desventajas, por lo que es importante evaluar cuidadosamente las necesidades y limitaciones antes de elegir un proceso de corte.

## **2.2 Factores de influencia para la matriz de decisión**

Para el análisis del método de corte se evalúa teóricamente la aleación del tanque esférico y la zona por donde se va a realizar los cortes. En base a una matriz de decisión se demuestra cual es la mejor opción para realizar el desmontaje de tanques de hidrocarburos.

Se realizó un análisis teórico sobre los distintos tipos de cortes, es decir, oxicorte, corte por haz de laser y corte con arco de plasma, para luego, a partir de un análisis de costos – beneficios junto características técnicas de calidad estandarizados, determinar que el corte por arco de plasma es el método más adecuado; en consideración a que el tanque desmotado será reensamblado en otra ubicación bajo proceso de soldadura normados. A causa de los siguientes factores considerados:

### **2.2.1 Versatilidad**

El oxicorte solo puede cortar metales ferrosos. Por lo tanto, no es eficaz para cortar acero inoxidable o aluminio y generalmente se usa para cortar metal de aproximadamente 2 pulgadas (50 mm) de espesor o más. El plasma puede cortar materiales ferrosos y no ferrosos, metal oxidado, pintado o rayado. Se utiliza principalmente para cortar metal de hasta 2 pulgadas de espesor. Por otra parte, el corte láser es una técnica de implementación computarizada, es rápido y muy superior a otros sistemas en cuanto a su rendimiento y productividad. El proceso de corte por arco de plasma utiliza gas eléctricamente conductor para transferir energía desde una fuente de alimentación eléctrica a través de una antorcha de corte por plasma, equipos que pueden ser voluminosos pero fácilmente adaptables a condiciones de trabajo en ambientes externos [6].

### **2.2.2 Seguridad**

Cuando se trata de seguridad, el oxicorte tiene una desventaja porque requiere un gas combustible altamente inflamable y una llama abierta. Tan pronto se enciende la antorcha, la llama permanece hasta que el sistema sea apagado manualmente. El corte por láser se debe llevar a cabo con mucho cuidado. La corriente eléctrica, por ejemplo, es peligrosa. Es muy importante escoger adecuadamente el tipo de

corriente con el que va a realizarse el corte por láser ya que es mucho mayor el riesgo asociado a la corriente [23].

### **2.2.3 Calidad de corte**

En general, el plasma produce cortes más precisos y limpios que el oxiacorte, con mejor angularidad, un corte más fino, una zona afectada por calor y poco o ningún residuo. La calidad del corte por láser es óptima en espesores en torno a 15-20 mm, para espesores mayores, la calidad del corte desciende notablemente. El corte a plasma permite una alta definición y calidad de corte, garantizando unos acabados de gran precisión [24]

### **2.2.4 Productividad**

El plasma es por lo menos dos veces más rápido que el oxiacorte cuando se cortan metales de hasta 25 mm de espesor, y hasta 12 veces más rápido en materiales más delgados. El oxiacorte puede tardar 30 segundos en perforar acero de 16 mm de espesor, al contrario del plasma, que tarda menos de dos segundos. Al momento de comparar el plasma contra el láser, el plasma tiende a destacarse al cortar metales entre 6 mm (1/4 in.) y 50 mm (2 in.) de espesor, ya que es más rápido operarlo y tolera mejor el trabajo sobre imperfecciones o superficies reflectoras [16].

### **2.2.5 Costo operacional**

En general, hay tres cosas que afectan el costo operativo del oxiacorte y el plasma: consumibles, energía y gas. Generalmente, los costos de consumo y energía son más altos para el plasma y los costos del gas son más altos para el oxiacorte. Aunque el costo operativo del oxiacorte es aparentemente menor, no es el más económico si se tiene en cuenta la ventaja de la productividad del plasma [15]. En lo que guarda relación con el corte laser, los componentes más importantes son la mano de obra, las piezas consumibles, la energía eléctrica y los gases. Dado que todos estos elementos dependen del tiempo a mayor velocidad de corte se consigue menor costo por metro cortado. En términos de influencia, los factores más relevantes en el cálculo del costo operativo son la velocidad de corte y la amortización [1].

## 2.3 Análisis de decisión

Detalle de las ponderaciones por criterio:

### **Costo:**

En términos de costo, el corte por arco de plasma y el oxicorte pueden variar considerablemente.

El corte por arco de plasma requiere un equipo costoso y especializado de acuerdo con el espesor del material, incluyendo un generador de plasma y un soplete de plasma. Además, puede requerir medidas adicionales de seguridad y protección para los trabajadores, lo que puede aumentar el costo total.

Por otro lado, el oxicorte se puede realizar con equipos de antorchas convencionales y no requiere equipos costosos o especializados.

El láser se ubica en términos más alto de lo mencionado debido a que los sistemas automatizados y consumibles son costoso [25].

### **Tiempo:**

En términos de tiempo, el corte por arco de plasma y el oxicorte también pueden variar considerablemente. El corte por arco de plasma es un proceso muy rápido, capaz de cortar materiales en segundos o incluso milésimas de segundo. Esto lo hace ideal para proyectos en los que se requiere una producción rápida y eficiente. Por otro lado, el oxicorte es un proceso más lento que el corte por arco de plasma. La llama caliente necesita más tiempo para calentar y cortar el material, lo que lo hace menos eficiente en términos de tiempo. Sin embargo, el oxicorte es más fácil de controlar y ajustar que el corte por arco de plasma, lo que lo hace una buena opción para proyectos más pequeños o menos críticos en términos de tiempo. El láser se ubica en términos medios de lo mencionado.

### **Destreza:**

En términos de destreza, el corte por arco de plasma y el oxicorte requieren diferentes niveles de habilidad y experiencia.

El corte por arco de plasma requiere un alto nivel de destreza y conocimiento, ya que el equipo es más complejo y el proceso de corte es más rápido y dinámico. Además, el corte por arco de plasma puede ser peligroso si no se utiliza adecuadamente, por lo que se requiere una formación adecuada y medidas de seguridad para garantizar la seguridad del operador.



Por otro lado, el oxiacorte es un proceso más sencillo y fácil de controlar, por lo que requiere menos destreza y conocimiento para operar con éxito. Sin embargo, el oxiacorte también requiere precaución y precisión, ya que la llama caliente puede ser peligrosa y causar daños al material y al entorno si no se maneja adecuadamente.

El láser, al ser un proceso automatizado, tiene un requerimiento mínimo del operador que solo supervise el corte y mayor exigencia de conocimiento en el programado que establezca los parámetros de entrada.

#### **ZAC:**

En términos de zona afectada por el calor el corte por arco de plasma y el oxiacorte también presentan diferencias importantes.

El corte por arco de plasma genera una ZAC muy pequeña y controlada, lo que significa que la zona alrededor del corte se mantiene fría y no se deforma. Esto es especialmente importante para materiales sensibles al calor, como algunos metales y aleaciones, que pueden deformarse o distorsionarse si se exponen a altas temperaturas.

Por otro lado, el oxiacorte genera una ZAC más amplia y menos controlada, lo que significa que la zona alrededor del corte puede deformarse o distorsionarse si se expone a altas temperaturas. Esto puede ser un problema para materiales sensibles al calor, pero también puede ser útil para algunas aplicaciones, como la soldadura, donde se desea precalentar una zona más amplia para reducir efectos de transformaciones microestructural no deseado.

El láser, debido a sus prestaciones de velocidad, presenta la menor propagación de calor.

#### **Versatilidad:**

En términos de versatilidad, tanto el corte por arco de plasma como el oxiacorte tienen sus fortalezas y debilidades.

El corte por arco de plasma es muy versátil y se puede utilizar para cortar una amplia variedad de materiales, incluyendo acero, aluminio, cobre y otros metales. Además, el corte por arco de plasma es rápido y preciso, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere un corte limpio y detallado.

Por otro lado, el oxicorte es menos versátil que el corte por arco de plasma y se utiliza comúnmente para cortar materiales ferrosos. Sin embargo, el oxicorte tiene la ventaja de ser más accesible y fácil de operar, por lo que es una buena opción para aplicaciones en las que se requiere un corte rápido y económico.

El corte por láser, al ser un proceso principalmente automatizado, carece de versatilidad y movilidad en proyectos de campo.

**Prioridad:**

En términos de prioridad, no existe un proceso de corte que sea mejor que el otro en general, ya que depende de las necesidades específicas de cada proyecto.

Si la prioridad es la precisión y la versatilidad, el corte por arco de plasma puede ser la mejor opción. Este proceso permite cortar una amplia variedad de materiales con un alto grado de precisión y detalle, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere un corte limpio y detallado.

Si la prioridad es la accesibilidad. Este proceso es más accesible y fácil de operar que el corte por arco de plasma, lo que lo hace ideal para aplicaciones en las que se requiere un corte rápido y económico.

El láser se ubica en términos medios de lo mencionado.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el costo total dependerá de varios factores, como el tamaño y la complejidad del trabajo, la cantidad de material a cortar y la calidad del equipo utilizado.

Por tanto, se realiza una ponderación de 0 a 1.0 considerando la literatura de una revisión bibliográfica técnica, además del elemento de observación directa para establecer los parámetros en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Análisis de decisión.**

Criterio	Costo	Tiempo	Destreza	ZAC	Versatilidad	$\Sigma$	Prioridad
PAC	0.033	0.017	0.050	0.175	0.175	0.450	1.0
Oxicorte	0.067	0	0.100	0	0.175	0.342	2.0
LBC	0	0.033	0	0.175	0	0.208	3.0

Se escogió como mejor alternativa para seccionar el tanque esférico de hidrocarburo el proceso de corte **por arco de plasma**, tal como se muestra en la Tabla 2.1, ya que obtuvo mayor prioridad que los procesos de corte por oxicorte y

láser. Las principales razones por la cual el proceso de corte es la mejor opción radica en costo operacional y tiempo de ejecución más bajo por lo tanto se corrobora como un proceso eficiente para este método.

## **2.4 Caracterización de material**

Los ensayos que se usaron para la verificación del material en torno a su composición elemental y propiedades fueron: análisis químico, dureza y metalografía microscópica.

Para lo cual se analizó los siguientes parámetros en la metodología utilizada:

### **2.4.1 Composición química**

Con base a la norma ASTM E415, el análisis de la composición química de un material cortado con un arco de plasma puede realizarse mediante la espectroscopía óptica emisiva (OES, por sus siglas en inglés). Este método utiliza un arco de plasma para excitar los átomos del material y producir una señal de luz que puede ser analizada para determinar la composición química [26].

Bajo este principio se utilizó la norma de requisito de la aleación, además del ensayo con el equipo GDS 500.

### **2.4.2 Inspección visual**

La inspección visual fue una técnica importante para evaluar la calidad del corte producido por un arco de plasma en soldadura. La metodología para llevar a cabo una inspección visual incluyó los siguientes pasos:

**Preparación:** Antes de inspeccionar la pieza, fue necesario asegurarse de que estuviera libre de polvo, suciedad y otros contaminantes. También fue importante asegurarse de que la superficie del material estuviera iluminada adecuadamente.

**Observación:** Con la ayuda de una lupa o un microscopio, se inspeccionó cuidadosamente la superficie del material cortado para evaluar la calidad de la escoria y la apariencia de la superficie.

**Análisis:** Se analizó la cantidad de la escoria y la superficie del material, buscando cualquier signo de deformación, forma del surco y concavidad del corte.

### **2.4.3 Macrografía**

La metodología para evaluar la macrografía del corte producido por un arco de plasma en soldadura incluyó los siguientes pasos:

**Preparación:** Antes de evaluar la macrografía, es necesario preparar la muestra del corte, realizar un pulido grueso, continuar con pulido fino y atacar químicamente para revelar la ZAC.

**Observación:** Con la ayuda de una lupa o un estereoscopio, se examinó cuidadosamente la superficie del corte para identificar cualquier anomalía en la apariencia general.

**Análisis:** Se analizó la apariencia general del corte, buscando cuantificar la profundidad de la ZAC.

Esta metodología ayudó a determinar la calidad y la integridad del corte producido por un arco de plasma.

### **2.4.4 Metalografía**

La norma ASTM E3 indica el procedimiento para evaluar la micrografía del corte producido por un arco de plasma en soldadura:

**Preparación de la muestra:** Se preparó una sección transversal del corte para su examen a nivel microscópico, utilizando técnicas de corte, pulido y ataque químico.

**Observación:** Con la ayuda de un microscopio, se examinó cuidadosamente la sección transversal del corte para identificar cualquier anomalía en la estructura del material.

**Análisis:** Se analizó la estructura del material, buscando las transformaciones microestructurales presente a lo largo del corte [27].

Esta metodología ayudó a determinar la calidad y la integridad de la microestructura del corte producido por un arco de plasma en soldadura.

### **2.4.5 Dureza**

Se evaluó la dureza en base a la norma ASTM E18-03:

Preparación de la muestra: Se preparó una sección transversal del corte para su evaluación de dureza.

Prueba de dureza: Se realizó una prueba de dureza con durómetros Rockwell, para medir la resistencia del material a la penetración.

Análisis: Se comparó la dureza medida con los valores estándar para la aleación correspondiente y se evaluó si cumplía con los requisitos especificados.

Esta metodología permitió determinar la resistencia mecánica del corte producido por un arco de plasma en soldadura y, en combinación con los ensayos teóricos y experimentales de Jominy bajo la norma ASTM A255, complementa un mapeo de características relevante para el análisis [28].

El acero ASTM A572, por su parte, es un grado popular de acero de baja aleación y alta resistencia (HSLA) con fines estructurales. Para optimizar la dureza y resiliencia los fabricantes de esta aleación deben incorporar una composición química específica dada por la norma de requerimiento [29].

## **2.5 Seccionamiento del tanque.**

Limitaciones Legales. - Según la Reforma Reglamento a la Ley de Caminos de la República del Ecuador, los pétalos deben ser repartidos uniformemente, según el número de ejes a lo largo y ancho de la superficie útil de carga, en la plataforma o cama baja de manera tal que ningún eje sea sobrecargado y que cumpla con los parámetros máximo de peso por eje establecido en este reglamento [30] [31].

Limitaciones con relación al tiempo. - Se debe tomar en consideración la planificación que se ha de tener para desmontar el tanque, pues se debe contar con los pasos correctos en un tiempo determinado para generar un trabajo eficiente sin que se interrumpa la operación.

### **Selección de equipo**

El acero con denominación ASTM A572 requiere precalentamiento y postcalentamiento durante el proceso de soldadura y corte, como lo sugiere la norma de soldadura AWS D1.1.

## **2.6 Análisis de costo**

La metodología para evaluar el costo del corte producido por un arco de plasma en soldadura incluyó los siguientes pasos:

Recopilación de datos: Se recopiló información sobre los costos directos e indirectos asociados con el proceso de corte con arco de plasma, incluyendo costos de materiales, mano de obra, equipos y energía.

Cálculo del costo por pieza: Se calculó el costo total del proceso de corte y se dividió entre la cantidad de piezas cortadas para determinar el costo por pieza.

Esta metodología permitió determinar el costo total del corte producido por un arco de plasma en soldadura y a evaluar su viabilidad económica en comparación con otras alternativas disponibles en el mercado.

Para determinar los costos de mano de obra y operacional, se ha tomado en consideración la legislación vigente, como el Código de Trabajo y la escala salarial proporcionada por la Contraloría General del Estado, además de los presupuestos basados en costos de materiales y demás gastos operativos [32].

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para ejecutar el proceso de corte de la estructura metálica del tanque esférico de hidrocarburo.

### 3.1 Caracterización del material

A continuación, se presenta los resultados obtenidos de la caracterización para el acero ASTM A572 grado 50, la probeta ensayada tiene un espesor de 30 mm y ancho de 50 mm. Los parámetros usados para el corte fueron aire seco comprimido, velocidad 900 mm/min, precalentado de 65 °C y enfriado a temperatura ambiente.

#### 3.1.1 Composición química

Los resultados del ensayo de composición química fueron obtenidos a partir de la norma ASTM E415 Método para análisis de acero al carbono y de baja aleación por Espectrometría de Emisión Atómica por Chispa, dando como resultado lo expuesto en la Tabla 3.1. Los resultados fueron validados y respaldados por patrones. Con el uso de la norma de requisito ASTM A572, se corroboró que los porcentajes en peso de elementos están por debajo de los máximos requerido para cumplir el grado.

**Tabla 3.1 Composición química del acero ASTM A572 [29].**

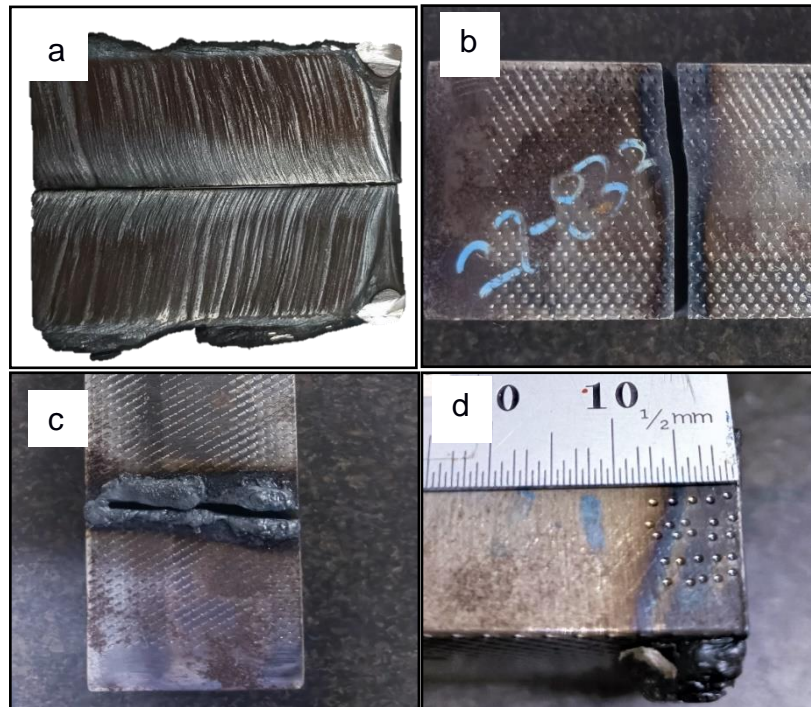
Elemento	Unidad	Requisito	Resultado
C	%	0.25	0.22
Mn	%	0.30	0.28
P	%	0.015	0.012
S	%	0.015	0.012
Si	%	0.035	0.032
Al	%	0.010	0.008
N	%	0.010	0.008
O	%	0.010	0.008
H	%	0.010	0.008

A partir de la composición química del material, se graficó la curva de templabilidad teórica (mostrado en el apéndice A), la cual nos indicó que al tener el 50 % de martensita, deberíamos obtener una dureza de 32 HRC a una profundidad de 4.7 mm desde el borde.

#### 3.1.2 Inspección visual

Se realizó la inspección visual, mostrada en la Figura 3.1, para la probeta con corte por arco de plasma, logrando identificar claramente el cambio de coloración característico de la afectación térmica provocada por el corte térmico. De similar forma, se observó aglomeración de rebabas, normal del proceso; sin embargo, es

controlable conforme a la destreza del operador. Se pudo verificar que la propagación de la tonalidad térmica alcanzó 9 mm en la zona inferior.



**Figura 3.1 Inspección visual muestra ASTM A572 cortada por plasma, a) calidad superficial, b) c) y d) efecto térmico superficial.**

### **3.1.3 Macrografía**

Se analizó la región transversal donde se aplicó el corte de forma macroscópica, lo cual permitió cuantificar la distancia en aproximadamente 3 mm como valor promedio de la afectación del material, ya que la disipación de calor a lo largo de la profundidad del corte es variable. Se evidencio que la región afectada térmicamente (Figura 3.2) es mucho menor que la región con decoloración térmica observada en la Figura 3.1.



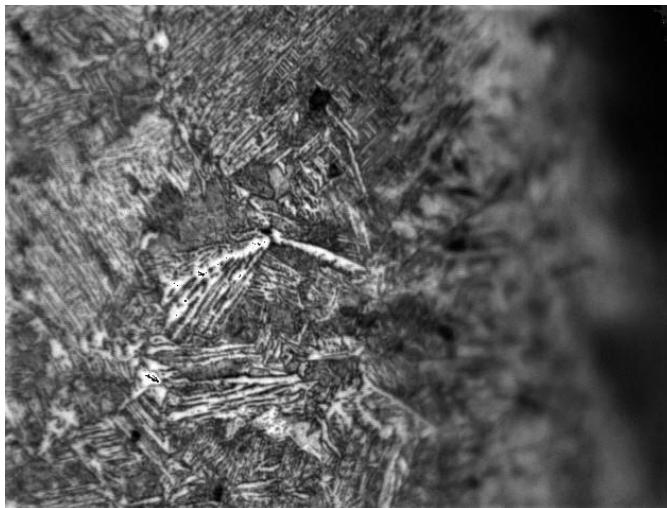


**Figura 3.2 Macrografía de probeta ASTM A572 atacado con Nital al 5%.**

#### **3.1.4 Metalografía microscópica**

El ensayo de metalografía realizado sobre la sección transversal de la probeta permitió inferir sobre el comportamiento microestructural del material desde el borde de corte hasta una región alejada del mismo.

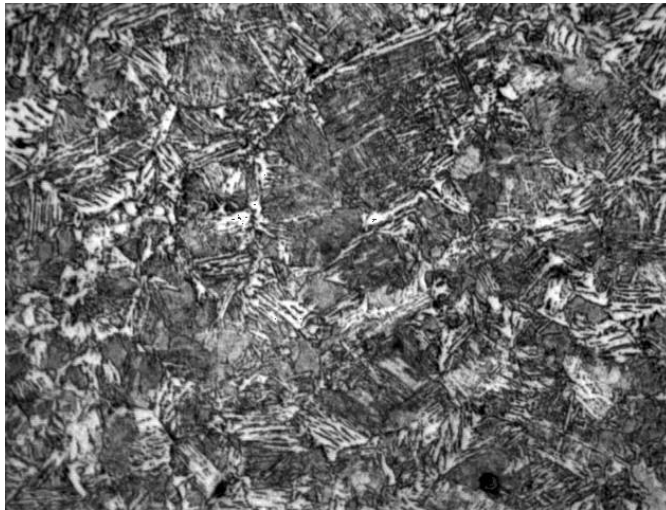
Se puede apreciar una configuración martensítica o posiblemente bainita superior en la Figura 3.3, producto del fenómeno no difusional, que ha ocasionado que fases y los microconstituyentes queden rápidamente solidificados.



**Figura 3.3 Muestra @ 1000X atacada con Nital 5%, en borde de corte.**

Conforme se alejó del borde, se observó la transformación de las regiones claras, con comportamiento similar a la Figura 3.3, y las zonas oscuras de probable bainita (o perlita) empieza a disminuir de tal forma que la ferrita se muestre en zonas claras, tal como se aprecia en la Figura 3.4.

De manera progresiva en la Figura 3.5 se contempló la aparición de microconstituyentes más definidos; en la región izquierda de dicha figura se puede observar bordes de granos definidos.



**Figura 3.4 Muestra @ 1000X atacado con Nital 5%, a 1.5 mm del borde.**



**Figura 3.5 Muestra @ 1000X atacado con Nital 5%, a 2 mm del borde.**

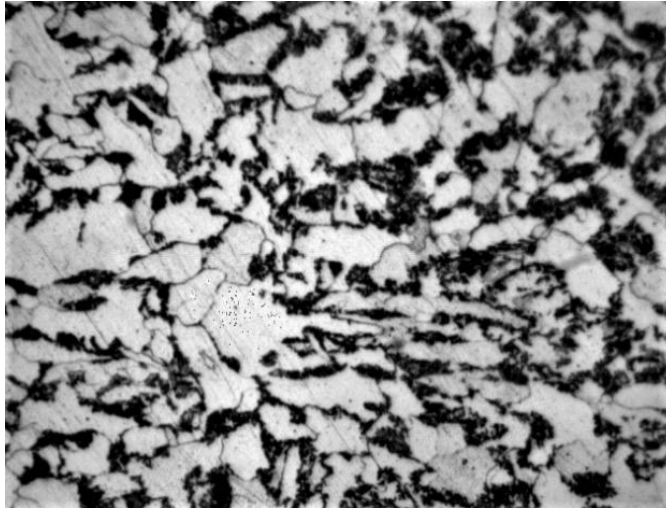
Pasando la zona de transición, se pudo observar, en la Figura 3.6, la formación específica de granos de ferrita con perlita fina, con tamaño de grano pequeño; sin

presentar una diferencia significativa de proporciones, demostrando una homogeneidad de microconstituyentes.

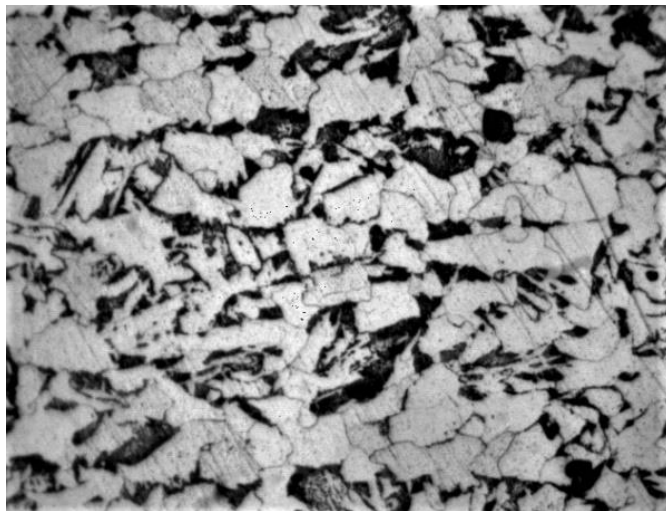
En la Figura 3.7 se evidenció un crecimiento del tamaño de grano y se pudo identificar de forma clara los bordes de grano. La estabilización finalmente se observó en la Figura 3.8, con microconstituyentes conformado por una ferrita proeutectoide y una perlita fina, estos en proporción aproximada de 60% - 40% respectivamente. La configuración que se puede ver en la Figura 3.9 donde se presenta una microestructura tomada de la región que no está afectada térmicamente, es muy similar a la presentada en la Figura 3.8. Adicional, se puede afirmar que no se observó tendencia u orientación de alargamientos de los granos, lo que es indicativo de un tratamiento térmico usado para la normalización de granos y posible alivio de tensiones en el material antes del corte térmico.



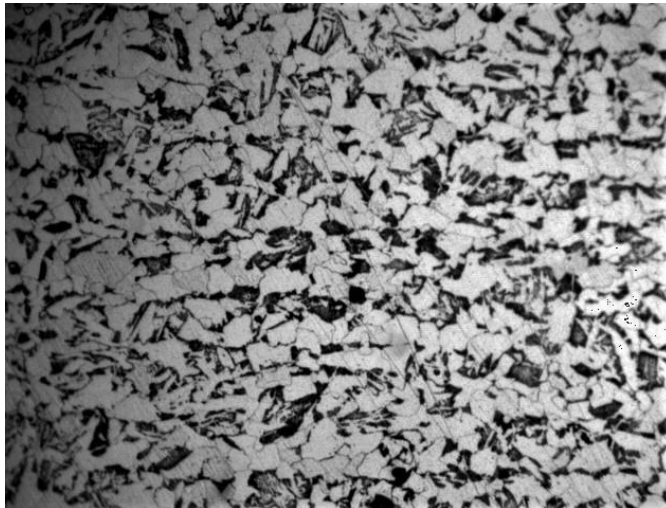
**Figura 3.6 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 2.5 mm del borde.**



**Figura 3.7 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 3mm del borde.**



**Figura 3.8 Muestra @ 1000X atacado con al Nital 5%, a 3.2 mm del borde.**



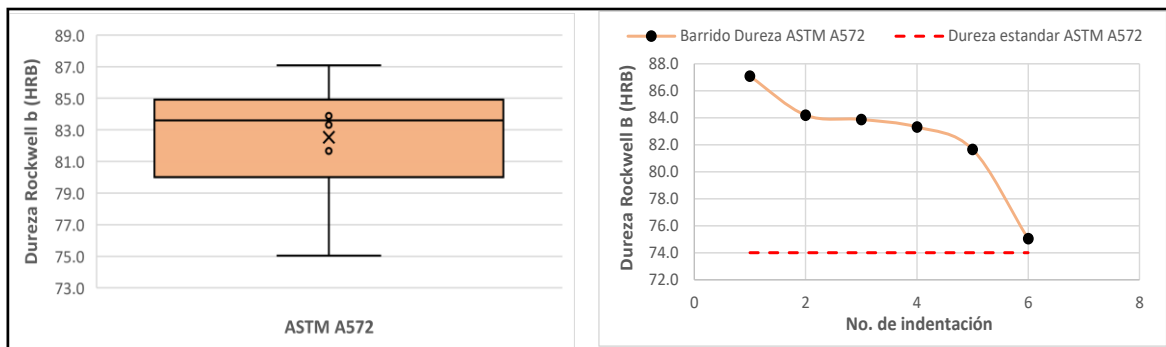
**Figura 3.9 Muestra @ 500X atacado con Nital al 5%, >15mm zona no afectada.**

### **3.2 Dureza**

La dureza fue medida en condiciones controladas de laboratorio, a temperatura ambiente de 23 °C y en conjunto con patrones que corroboran una incertidumbre combinada de 1.3 unidades. La dureza, medida en escala Rockwell B en la sección sin afectación térmica, corrobora la dureza promedio declarada para el material de 74 HRB, en la Figura 3.10 se presenta un resumen de la Tabla 3.2, correspondiente al barrido de dureza, donde se nota el valor decreciente de la dureza a medida que se aleja del borde de corte.

**Tabla 3.2 Resultados del ensayo de barrido de dureza Rockwell.**

<b>Descripción de muestra</b>	<b>No. de indentación</b>	<b>Distancia mm</b>	<b>Resultado</b>	<b>Incertidumbre</b>	<b>Unidad - Escala</b>
ASTM A572 Corte por arco plasma	1	1.5	87.1	1.3	HRB
	2	3.0	84.2		
	3	4.5	83.9		
	4	6.5	83.3		
	5	7.5	81.7		
	6	30.0	75.0		



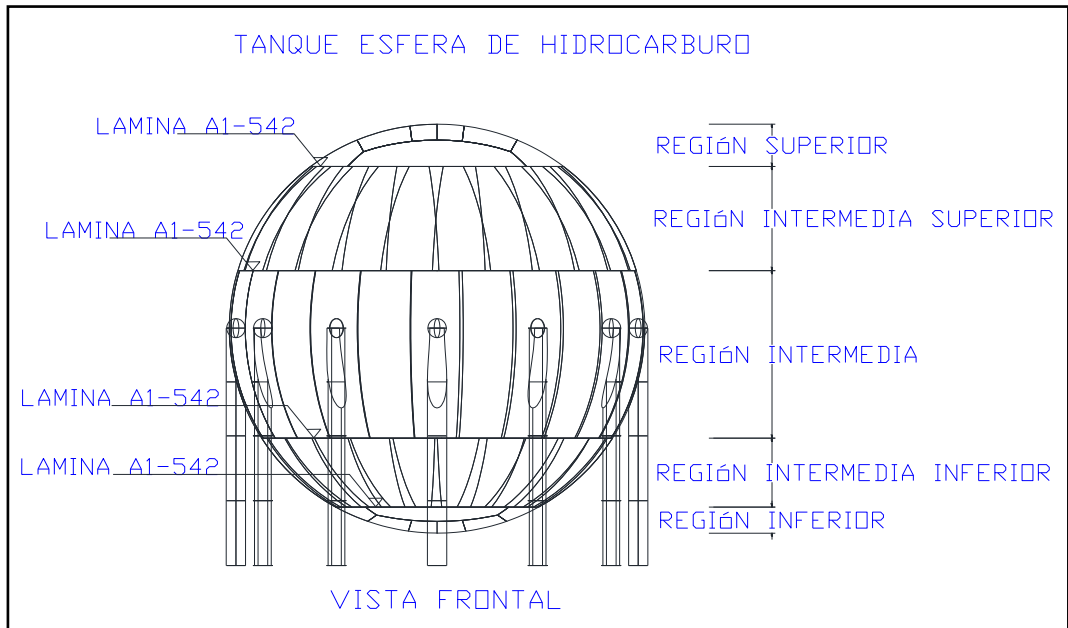
**Figura 3.10 Distribución de la dureza con respecto al valor nominal.**

### 3.3 Proceso de corte

#### 3.3.1 Seccionamiento de tanque

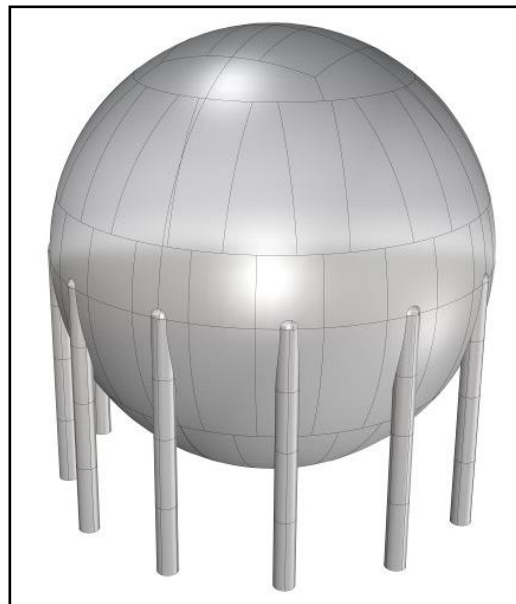
Debido a las limitantes de la legislación conforme a la Reforma del Reglamento Nacional a Ley de Caminos vigente, se tuvo que considerar dimensiones de 3.5 metros de ancho, 4.5 metros de alto y 23 metros de largo para el remolque tipo cama, adicional a una capacidad máxima de 42 toneladas.

Por lo tanto, se estableció como requisito para seccionar la esfera que se realice en los pétalos individuales, sin opción a tener agrupación de los mismos; mecanismo con el cual se pretendía evitar cortes innecesarios y optimizar tiempos. La longitud total de los cortes coincidió con el número de metros lineales de cordón de soldadura, exceptuando a los elementos tipo pilares, los cuales sí fueron admisibles para el posterior traslado sin seccionamientos. Por lo tanto, se tiene un total de 857.57 metros lineales de corte por arco de plasma para una esfera de hidrocarburos, y 103.95 metros lineales de corte para pilares y tensores. Es importante destacar que no se consideró los accesorios de equipos contra incendios, escalera u otros apéndices existentes, como se indica en la Figura 3.11. Se expone con más detalles el cronograma de actividades y planos de identificación en la sección de Apéndice G.



**Figura 3.11 Esquema de las partes del tanque esférico a seccionar.**

A continuación se presenta el esquema tridimensional usado para la planificación por lotes (Figura 3.12). Se cuenta con 5 regiones definidas, teniendo un total de 86 piezas o pétalos, de los cuales las dimensiones varían desde 2.30 – 2.92 m de ancho y 5.84 – 9.87 m de largo, expuesto con más detalles en la sección de Apéndice F.



**Figura 3.12 Vista isométrica del tanque esférico.**

La secuencia de corte fue programada en relación con las actividades adyacentes para optimizar el tiempo y concatenar 6 frentes de trabajo, además de contemplar el uso de la maquinaria pesada para el izaje y desplazamiento en la zona de trabajo. De forma general, se planificó seccionar los bloques, desplazarlos a nivel del suelo y luego desmembrar los pétalos, como se puede apreciar en la Tabla 3.3, donde se contempla actividades críticas que no podrán realizarse sin haber culminado la anterior, como es el caso de los pétalos de la región intermedia que deberán ser los últimos desmontados.

**Tabla 3.3 Cronograma de actividades para desmontaje de tanque.**

Id	Nombre de tarea	Duración	Comienzo	may	jun	tri 3, 2023	ago
1	<b>DESMONTAJE DE ESFERA</b>	<b>120 días</b>	<b>lun 5/1/23</b>	[Barra horizontal que cubre todo el periodo]			
2	<b>REGIÓN SUPERIOR</b>	<b>10 días</b>	<b>lun 5/1/23</b>	[Barra]			
3	CORTE EN ALTURA	3 días	lun 5/1/23	[Barra]			
4	DESCENSO CON GRUA	1 día	jue 5/4/23	[Barra]			
5	CORTE EN SUELO	5 días	vie 5/5/23	[Barra]			
6	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	1 día	mié 5/10/23		[Barra]		
7	<b>REGIÓN INTERMEDIA SUPERIOR</b>	<b>25 días</b>	<b>jue 5/11/23</b>	[Barra]			
8	CORTE EN ALTURA	9 días	jue 5/11/23	[Barra]			
9	DESCENSO CON GRUA	1 día	sáb 5/20/23		[Barra]		
10	CORTE EN SUELO	14 días	dom 5/21/23		[Barra]		
11	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	1 día	dom 6/4/23			[Barra]	
12	<b>REGIÓN INFERIOR</b>	<b>11 días</b>	<b>lun 6/5/23</b>		[Barra]		
13	CORTE EN ALTURA	4 días	lun 6/5/23		[Barra]		
14	DESCENSO CON GRUA	1 día	vie 6/9/23		[Barra]		
15	CORTE EN SUELO	5 días	sáb 6/10/23		[Barra]		
16	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	1 día	jue 6/15/23			[Barra]	
17	<b>REGIÓN INTERMEDIA INFERIOR</b>	<b>13 días</b>	<b>vie 6/16/23</b>		[Barra]		
18	CORTE EN ALTURA	5 días	vie 6/16/23		[Barra]		
19	DESCENSO CON GRUA	1 día	mié 6/21/23		[Barra]		
20	CORTE EN SUELO	6 días	jue 6/22/23		[Barra]		
21	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	1 día	mié 6/28/23			[Barra]	
22	<b>REGION INTERMEDIA</b>	<b>51 días</b>	<b>jue 6/29/23</b>			[Barra]	
23	CORTE EN ALTURA	51 días	jue 6/29/23			[Barra]	
24	DESCENSO CON GRUA	51 días	jue 6/29/23			[Barra]	
25	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	51 días	jue 6/29/23			[Barra]	
26	<b>PILARES</b>	<b>10 días</b>	<b>sáb 8/19/23</b>				[Barra]
27	CORTE EN ALTURA	10 días	sáb 8/19/23				[Barra]
28	DESCENSO CON GRUA	10 días	sáb 8/19/23				[Barra]
29	ESTIBAJE Y ALMACENAMIENTO DE PÉTALO	10 días	sáb 8/19/23				[Barra]

### 3.3.2 Equipos por implementar

Los equipos principales usados para la ejecución del proyecto fueron dos, los cuales están orientados en el requisito de tener un acero tratado térmicamente y



con un espesor definido, por lo que es necesario el uso de una máquina de corte de plasma versátil y un mecanismo de precalentamiento que cubra estos aspectos. En cuanto a la máquina de corte, el mercado internacional ofreció alternativas con propuestas comerciales que mejoraron capacidades en cuanto a la definición del corte con respecto a tecnologías de modelos previos.

Equipos comerciales del rango de 300 A presentan características que permiten cumplir con tolerancias de calidad de corte tipo 3, 4 y 5 bajo la norma ISO 9013, ideal para cortes de hasta 50 mm; a diferencia del láser donde diversos modelos no superan los 20 mm de corte, además que este último debe tener un perímetro de seguridad para que el sistema no genere potenciales daños con el haz de energía.

A continuación, se presenta la Tabla 3.4 con las principales características del equipo que se escogió como ideal para el ejecutar el corte por arco de plasma.

**Tabla 3.4 Características generales de equipos de corte por plasma.**

modelo de 300 A	
Rango de regulación	5-300 A
Potencia de salida	66.5 kW
V CC Circuito Abierto, Alta	360 VCD
Valores de entrada	230 V 50-60 Hz
Ciclo de trabajo	100% a 66.5 kW, 40° C
<b>Acero al carbono</b>	50 mm (2in)
Espesor de perforación	
(AxAn.x Prof.)	1272 x 817 x 1247 mm)
Peso	680 kg (1.500 lb.)
Consumo promedio de argón	155 l/min
Consumo promedio de aire seco	122 l/min
Consumo promedio de nitrógeno	120 l/min

En cuanto al precalentamiento del metal base, ASTM A572, se agregó en el presupuesto del proyecto el conjunto de mantas térmicas con un sistema de calentamiento por inducción, la propuesta comercial de proveedores internacionales garantiza que el calor generado por el sistema de precalentamiento de inducción permanezca homogéneo en la zona específica de interés. Teniendo en cuenta que la norma AWS D1.1 estableció la temperatura de 65°C para esta aleación con el espesor menor o igual a 50 mm. Especificaciones generales de estos equipos están descrita en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Características de manta térmica.**

Manta térmica	
Tipo de material	Fibra de vidrio recubierto con vermiculita
Temperatura de funcionamiento	550 °C
Punto de fusión	750 °C
Peso	580 g/m <sup>2</sup>
Dimensiones	1.8 x 3 m y 0.92 x 25 m
Sistema de precalentamiento inductor	
Temperatura de precalentamiento máxima	350°C
Potencia de entrada	400 – 460 V, trifásico
Ciclo de trabajo	35 kW a 100%
Dimensiones	699 x 552 x 933 mm
Peso	120 kg

### 3.3.3 Procedimiento de corte

Para garantizar una correcta calidad en cuanto al acabado de corte, se realizó un procedimiento, donde se ha incluido los principales parámetros; este procedimiento se lo denominó Especificación de Proceso de Corte; el cual contiene: código implementado, tipo de proceso, tipo de material, tolerancias y detalles de consumibles. Tanto la selección de gases, consumibles(boquillas) y velocidad de corte han sido establecido a partir de recomendaciones por el fabricante en las condiciones de uso estándar, sin embargo, la influencia del tipo de material influye de forma significativa, por lo que en la Tabla 3.6 se presenta los parámetros críticos

y más desfavorables posibles. Los soportes técnicos utilizados para este apartado esta detallados en los Apéndices E, F, H.

**Tabla 3.6 Especificaciones de proceso de corte.**

Especificación de Proceso de Corte			
Nombre de compañía	_____	Identificación #	_____
Proceso de corte	Arco de plasma	Fecha	_____ Revisor _____
		Fecha	_____ Autorización _____
Fabricante de máquina de corte	_____	Modelo	_____
Tipo de corte	Corte por arco de plasma		
Designación de antorcha de corte	300 amperios, acero al carbono		
Designación de boquilla de corte	420279 / categoría de corte 5	Perpendicularidad	2.5 ± 0.5 mm
Fabricante de boquilla/ antorcha	_____	Altura promedio del perfil	175 ± 125 µm
Normativa	ISO 9013:2017 / AWS Z49		
Material base	ASTM A572		
Tipo o grado	Grado 50		
Espesor de material base	49 - 50 mm		
Tipo de gas de combustión	O2	Voltaje de arco	175 V
Tipo de gas de escudo	N2 escudo, asistido con argón	Separación de perforación	33 mm
Presión / flujo de gas de combustión	O2 85 l/min; N2 14 L/min		
Velocidad de corte	560 mm/min		
Separación de corte	6.4 mm		
Ángulo de corte ( si el corte no es a 90grados)	_____		
Temperatura de precalentamiento	65 °C (AWS D1.1)		
Post calentamiento	_____		
Tasa de calentamiento	20 °C /min		
Fabricante de calentamiento	_____	Modelo	_____

### 3.4 Costo de inversión del proyecto

Luego que se determinó el método secuencial de corte de los pétalos, se continuó con el análisis económico. El análisis expuesto es válido para una esfera en condiciones descritas en capítulos previos, ya que el principal factor de variabilidad económico es zona geográfica y condiciones del terreno, sin embargo, este estudio puede ser tomado como referencia económica aplicable dentro de Ecuador.

Se generó el presupuesto referencial para el desmontaje de un tanque esférico de hidrocarburos usando equipo de corte por arco de plasma, en el cual se detalla los conceptos correspondientes a los sueldos del personal técnico, personal administrativo, equipos e imprevistos o misceláneos necesario para la ejecución del

servicio. Con mayor detalle se puede apreciar el desglose de los valores en la Tabla 3.7. Los rubros individuales se encuentra detallados en el Apéndice B.

**Tabla 3.7 Resumen de valores por proyecto.**

C O N C E P T O	VALOR USD
A. SUELDOS	\$ 224,800.00
A.1 Personal Técnico	\$ 209,600.00
A.2 Personal Auxiliar y Administrativo	\$ 15,200.00
B. CARGAS SOCIALES	\$ 60,094.00
B.1 Personal Técnico	\$ 55,638.85
B.2 Personal Auxiliar y Administrativo	\$ 4,455.15
C. EQUIPOS	\$ 2,300,848.00
D. MISCELANEOS	\$ 136,000.00
E. COSTOS INDIRECTOS	\$ -
TOTAL	\$ 2,721,742.00

### 3.5 Tiempo de ejecución del proyecto

El plazo estimado para el desmontaje completo del tanque esférico de hidrocarburos usando equipo de corte por arco de plasma es de 120 días.

Para la ejecución del proyecto, se tomó como referencia turnos de 8 horas diarias continuas. En la Tabla 3.8 se muestra el resumen del cronograma de desmontaje en relación con las secciones del tanque. Para el cumplimiento del plazo, los operarios están capacitados para ejecutar el corte promedio 3 metros lineales por día, incluyendo el tiempo de precalentamiento y maniobras de izaje.

**Tabla 3.8 Resumen de cronograma de ejecución del proyecto.**

Descripción de actividad	Duración
DESMONTAJE DE ESFERA	120 días
REGION SUPERIOR	10 días
REGION INTERMEDIA SUPERIOR	25 días
REGION INFERIOR	11 días
REGION INTERMEDIA INFERIOR	13 días
REGION INTERMEDIA	51 días
PILARES	10 días

### **3.6 Viabilidad del proyecto.**

En torno al aspecto que contempla la satisfacción económica para los potenciales inversores, se ejecutó la estimación del indicador que relaciona cotizaciones expuestas por proveedores nacionales que concursan en licitaciones públicas, comparándolas con los valores desarrollados en el presupuesto de este proyecto, agregados en el Apéndice C.

Por una parte, se encuentra un valor ofertado de \$ 3,998,246 por proveedores nacionales, lo contrastamos con el valor del presupuesto desarrollado y presentado en el resumen de la Tabla 3-8 de \$2,721,742, arrojándonos un indicador de reducción de costo del 32%; donde puede interpretarse que el presupuesto de este proyecto está por debajo de los precios ofertados por dichos proveedores.

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

1. El corte por arco de plasma genera una afectación mínima al material, lo que evita tener excesiva eliminación de material por desbaste mecánico para preparación de biselés de procesos de soldadura.
2. Se demostró la eficiencia y precisión del corte por arco de plasma, logrando ser una solución rentable, segura y eficiente para el desmontaje de una estructura esférica de hidrocarburo de 23 metros de diámetro.
3. Se evidenció que existe cambios microestructurales de aleación ASTM A572 cortado por arco de plasma, además la ZAC se propagó a una distancia de 3 mm desde el borde en una probeta de 25 mm de espesor.
4. La microestructura evidenciada en el borde del corte corresponde a bainita que gradualmente se estabiliza en la ZAC hasta llegar a tener una configuración homogénea de granos con bordes definidos de perlita y ferrita.
5. Existen limitaciones viales y de transporte que restringen la optimización de cortes de los pétalos, por ende, se tuvo la cantidad de 86 piezas planificadas para su corte en un periodo 120 días.
6. El presupuesto de \$ 2,721,742.00 incluyó mano de obra y alquiler de maquinaria nacional, pero los equipos de corte y calentamiento fueron cotizados en empresas internacionales, sin embargo, representa menos del 10% del umbral del Valor Agregado Ecuatoriano

### 4.2 Recomendaciones

1. El procedimiento planteado puede ser modificado usando boquillas con ángulo de corte para generar bisel y reducir tiempo de preparación en posteriores procesos de soldadura, en vista que la escoria que se obtiene es poca o nula, se puede reducir trabajos mecánicos de desbaste.
2. El ensayo de análisis químico del material que no puede ser llevado a laboratorio, puede realizarse con el uso de técnicas de análisis en campo como el método de Fluorescencias de Rayos X (XRF por sus siglas en inglés).

3. Emplear durómetro tipo Vickers para ZAC pequeña para obtener lecturas más precisas, el procedimiento para dureza Rockwell dificulta la toma de valores por el tamaño del indentador.
4. Analizar el comportamiento del material en cuanto a su grado de templabilidad con un ensayo de Jominy para corroborar los resultados presentación en la composición química.



# BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Maldonado, «Eficiencia de Procesos de Soldadura para su aplicación en el desarrollo de la Industria Metalmeccánica en Ecuador», *CITED*, vol. 2, n.º 2, 2021.
- [2] «ASME-VIII-8-div.1-2019.pdf», en *RULES FOR CONSTRUCTION OF PRESSURE VESSELS*, 2019 Edition., ASME Collective Membership Mark, 2019.
- [3] SNGRE, «Los deslizamientos son el evento más predominante en Pichincha durante el 2019 al 2021, destacando el último año», Monitoreo de Eventos 2019-202. [En línea]. Disponible en: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/los-deslizamientos-son-el-evento-mas-predominante-durante-el-2019-al-2021-destacando-el-ultimo-ano/>
- [4] E. Petroecuador, «Hallazgos de la Escuela Politécnica Nacional determinan cinco puntos críticos que afectan a la infraestructura del Terminal Cuenca», 2020. <https://www.eppetroecuador.ec/?p=8010> (accedido 28 de enero de 2023).
- [5] hypertherm, «7 motivos por los que el plasma aventaja al oxicorte», *9/2020 Hypertherm, Inc. Révision 6*, 2020. <https://www.hypertherm.com/es/solutions/technology/cutting-process-overview/>
- [6] W. Gómez y A. Alberco, «Corte por Plasma con la Técnica de Control Numérico Computarizado, para Mejorar la Calidad de Corte de Metales Del IESTP Nueva Esperanza 2019», Tesis, UCV, 2019.
- [7] Proyectos Dinámicos de Ingeniería, «Proceso de Corte Plasma CNC», 2023. <https://www.pdi.net.co/proceso-de-corte-plasma-cnc/> (accedido 4 de febrero de 2023).
- [8] T. P. G. Peman, «Comportamiento en fatiga de componentes estructurales obtenidos mediante oxicorte, corte por plasma y corte por láser: comparativa y definición de curvas SN de diseño», PhD Thesis, Universidad de Cantabria, 2015.
- [9] Multiservicios Ancares, «Oxicorte Metálico», 2023. <https://www.multiserviciosancares.com/servicios/oxicorte-metalico> (accedido 4 de febrero de 2023).
- [10] Alfredo Carrasco, «Tecnología de corte de Metales con Láser», *CITE ENERGIA*, 2016.
- [11] M. I. Sosa y I. Bussolini, «Generación eléctrica por gasificación por arco de plasma de residuos urbanos», en *III Jornadas de Investigación, Transferencia y Extensión de la Facultad de Ingeniería*, 2015.
- [12] L. Jeffus, *Soldadura\_ principios y aplicaciones*, 5ta ed. Paraninfo, 2009.
- [13] C. F. C. Jácome, «MEJORAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJO PARA UNA MÁQUINA DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICA TIPO CNC – 4000 MARCA HUGONG WELDER.».
- [14] EUROPEAN STANDARD, «Thermal cutting - Classification of thermal cuts - Geometrical product specification and quality tolerances (ISO 9013:2017)». CEN-CENELEC Management Centre, 2017.
- [15] R. J. Carvajal Cabrera, «Diseño y construcción de una máquina cortadora plasma CNC en la empresa mecánica industrial “MOYA HNOS”», B.S. thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ..., 2018.

- [16] R. Artiaga, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA PARA CORTE POR PLASMA, USANDO TECNICAS DE CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO», 2015.
- [17] E. Cuesta y J. C. Rico, «El corte de Chapa mediante Oxicorte y Plasma», vol. 1, 2002.
- [18] M. Maureira, «Aplicación de la soldadura en estructuras de aluminio», *Chile, Universidad Austral de Chile*, 2007.
- [19] L. Á. Briseño Alvarado, M. de J. Martínez Quiroz, J. F. Morales Colín, R. A. Olvera Morales, y L. Á. Palacios Dominguez, «Antorcha manual para corte de metal por plasma».
- [20] M. Reza, Y. Assadi, F. Shemirani, y M. Salavati-Niasari, «Application of thiophene-2-carbaldehyde-modified mesoporous silica as a new sorbent for separation and preconcentration of palladium prior to inductively coupled plasma atomic emission spectrometric determination», *Talanta*, vol. 71, n.º 4, pp. 1524-1529, 2007.
- [21] C. F. Calupiña y D. M. Oña, «Mejoramiento de los Parámetros de Trabajo para una Máquina de Corte por Plasma y Oxiacetilénico tipo CNC-4000 Marca Hugong-Welder», B.S. thesis, Quito., 2012.
- [22] D. LeRoy Olson y S. Liu, «Oxyfuel Gas Cutting», *ASM International*, vol. 6, 1993, doi: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v06.a0001483>.
- [23] P. ARCOS, «ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS PROCESOS DE CORTE POR PLASMA, OXICORTE Y ARC AIR APLICADOS A METALES.», ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2010.
- [24] K. D. Mirallas Secaira y P. J. Portes Rojas, «Diseño de una maquina cortadora por plasma CNC.», B.S. thesis, Espol, 2016.
- [25] Hypertherm, Inc, «Corte por plasma vs. corte por láser», *Soluciones de tecnología*. <https://www.hypertherm.com/es/solutions/technology/plasma-technology/plasma-vs-laser/>
- [26] E01 Committee, «Test Method for Analysis of Carbon and Low-Alloy Steel by Spark Atomic Emission Spectrometry», ASTM International. doi: 10.1520/E0415-15.
- [27] E04 Committee, «Guide for Preparation of Metallographic Specimens», ASTM International. doi: 10.1520/E0003-11R17.
- [28] ASTM, «Standard Test Methods for Determining Hardenability of Steel1». ASTM International, 2002.
- [29] E01 Committee, «Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Columbium-Vanadium Structural Steel», ASTM International, Norma, 2007.
- [30] «REFORMA EL REGLAMENTO APLICATIVO DE LA LEY DE CAMINOS DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR», 2015.
- [31] E. E. Aldaz Castellano, «Procesos para la fabricación y montaje de tanques hidrostáticos para almacenamiento de combustible», B.S. thesis, Quito, 2014., 2014.
- [32] Contraloría General del Estado, «Tabla de salarios mínimos para el año 2023, de las diferentes categorías ocupacionales para la construcción», *Salarios construcción*, 20223.



# APÉNDICES

## APÉNDICE A

### ASTM A255 Jominy

El procedimiento para desarrollar esta curva está basado en la norma ASTM E255 que de forma teórica se calculó la dureza a partir de coeficientes por elementos y factores de multiplicación relacionado a la composición química del material. Adicional en la gráfica se expresa la curva de Graville que al situarnos en la zona 2 donde los aceros tienen niveles más altos de carbono con menor templabilidad. Por lo tanto, es posible evitar las microestructuras sensibles al agrietamiento restringiendo las tasas de enfriamiento de la ZAC. Esto se puede lograr mediante el control de la entrada de calor y, en menor medida, con precalentamiento.

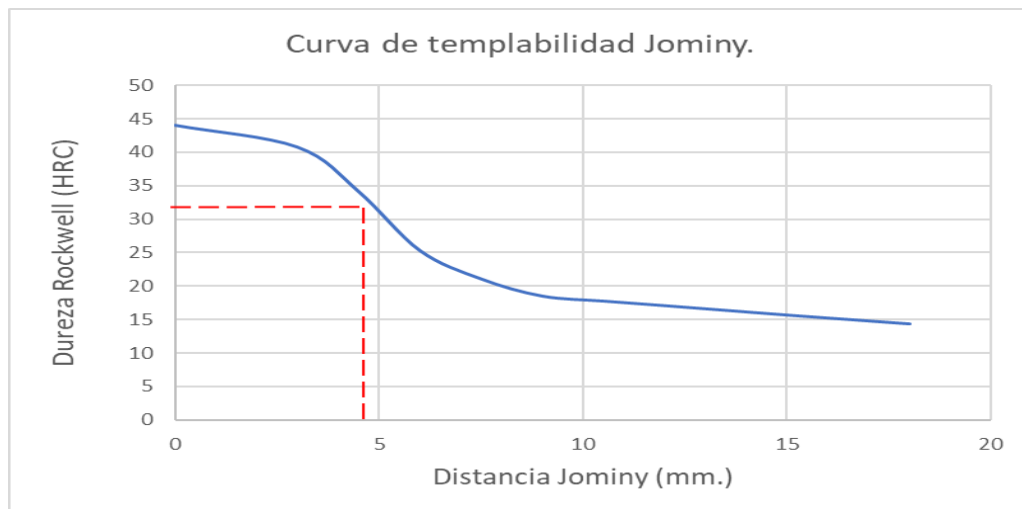


Figura A.1 Curva Teórica de templabilidad para acero ASTM A572.

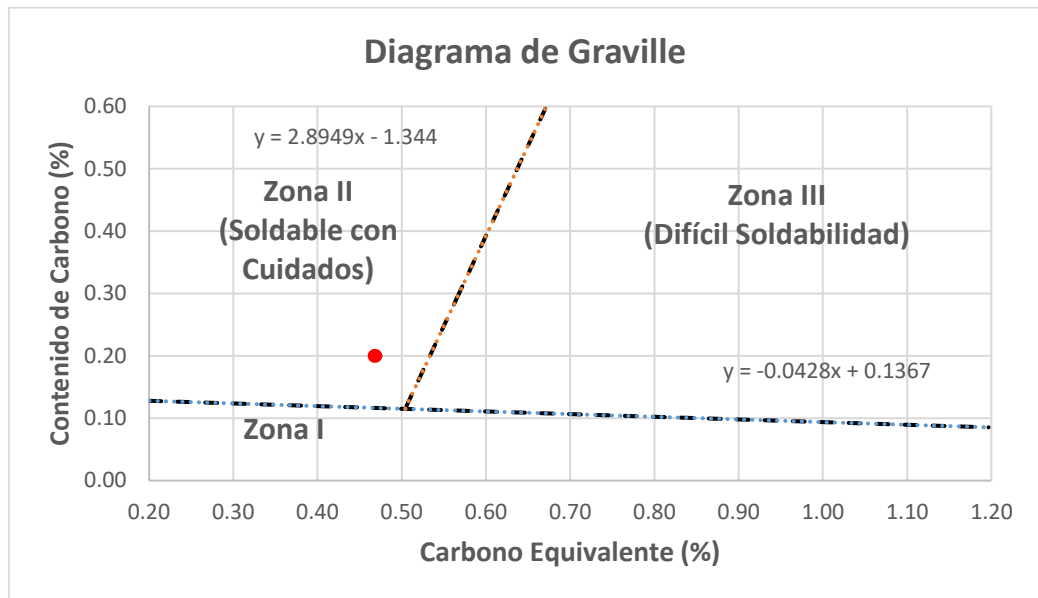


Figura A.2 Diagrama de Graville para acero ASTM A572.

## APÉNDICE B

### Presupuesto

Se desglosa los precios individuales de los rublos abarcados en el proyecto, así como la cantidad de personal requerido. Las consideraciones generales tomada en este apartado fueron considerar el tiempo de ejecución del proyecto y estimar el proporcional de las obligaciones fiscales, implementar valores por el alquiler de maquinarias pesada y equipos menores, además de compra de gases en base a precios de comercializadoras nacionales

**Tabla B.1 Sueldo de personal técnico local.**

CONCEPTO	CANTIDAD	% DE PARTICIPACIÓN	TIEMPO EN MESES	SUELDO USD/MES	TOTAL SUELDO USD.
<b>A. SUELDO DEL PERSONAL TÉCNICO</b>					
DIRECTOR DE OBRA	1	100.00%	4.00	\$ 9,000.00	\$ 36,000.00
RESIDENTE DE OBRA	1	100.00%	4.00	\$ 3,000.00	\$ 12,000.00
RESIDENTE DE SOLDADOR	2	100.00%	4.00	\$ 2,700.00	\$ 21,600.00
ING. ELÉCTRICO	1	100.00%	4.00	\$ 2,700.00	\$ 10,800.00
ING. AMBIENTAL Y SEGURIDAD OCUPACIONAL	2	100.00%	4.00	\$ 2,700.00	\$ 21,600.00
ING. EN MATERIALES	1	100.00%	4.00	\$ 2,700.00	\$ 10,800.00
OPERARIOS METROLÓGICOS	6	100.00%	4.00	\$ 1,500.00	\$ 36,000.00
SOLDADORES	3	100.00%	4.00	\$ 1,000.00	\$ 12,000.00
DIBUJANTE	2	100.00%	4.00	\$ 1,000.00	\$ 8,000.00
OPERARIOS DE CORTE	6	100.00%	4.00	\$ 700.00	\$ 16,800.00
OBREROS	10	100.00%	4.00	\$ 600.00	\$ 24,000.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$ 209,600.00</b>

**Tabla B.2 Sueldo de personal auxiliar y administrativo.**

CONCEPTO	CANTIDAD	% DE PARTICIPACIÓN	TIEMPO EN MESES	SUELDO USD/MES	TOTAL SUELDO USD.
<b>B. PERSONAL AUXILIAR</b>					
SECRETARIA	2	100.00%	4.00	700.00	5,600.00
CONSERJE	1	100.00%	4.00	600.00	2,400.00
CONTADOR	2	100.00%	4.00	900.00	7,200.00
<b>TOTAL</b>					<b>15,200.00</b>

**Tabla B.3 Cargas sociales del personal técnico.**

CARGO	CANTIDAD	SUELDO	% DE PARTICIPACIÓN	MESES	IECE (0.5%)	SECAP (0.5%)	IESS (11,15%)	VACACIONES	XIII SUELDO	XIV SUELDO	TOTAL
DIRECTOR DE OBRA	1	9,000	100.00%	4.00	180.00	180.00	4,014.00	1,500.00	3,000.00	141.67	9,015.67
RESIDENTE DE OBRA	1	3,000	100.00%	4.00	60.00	60.00	1,338.00	500.00	1,000.00	141.67	3,099.67
RESIDENTE DE SOLDADOR	2	2,700	100.00%	4.00	54.00	54.00	1,204.20	450.00	900.00	141.67	5,607.74
ING. ELÉCTRICO	1	2,700	100.00%	4.00	54.00	54.00	1,204.20	450.00	900.00	141.67	2,803.87
ING. AMBIENTAL Y SEGURIDAD OCUPACIONAL	2	2,700	100.00%	4.00	54.00	54.00	1,204.20	450.00	900.00	141.67	5,607.74
ING. EN MATERIALES	1	2,700	100.00%	4.00	54.00	54.00	1,204.20	450.00	900.00	141.67	2,803.87
OPERARIOS METROLÓGICOS	6	1,500	100.00%	4.00	30.00	30.00	669.00	250.00	500.00	141.67	9,724.02
SOLDADORES	3	1,000	100.00%	4.00	20.00	20.00	446.00	166.67	333.33	141.67	3,383.01
DIBUJANTE	2	1,000	100.00%	4.00	20.00	20.00	446.00	166.67	333.33	141.67	2,255.34
OPERARIOS DE CORTE	6	700	100.00%	4.00	14.00	14.00	312.20	116.67	233.33	141.67	4,991.22
PEONES	10	500	100.00%	4.00	10.00	10.00	223.00	83.33	166.67	141.67	6,346.70
<b>TOTAL</b>											<b>55,638.85</b>

**Tabla B.4 Cargas sociales del personal auxiliar y administrativo.**

CARGO	CANTIDAD	SUELDO	% DE PARTICIPACION	MESES	IECE (0.5%)	SECAP (0.5%)	IESS (11,15%)	VACACIONES	XIII SUELDO	XIV SUELDO	TOTAL
SECRETARIA	2	700	100.00%	4	14.00	14.00	312.20	116.67	233.33	141.67	1,663.74
CONSERJE	1	600	100.00%	4	12.00	12.00	267.60	100.00	200.00	141.67	733.27
CONTADOR	2	900	100.00%	4	18.00	18.00	401.40	150.00	300.00	141.67	2,058.14
<b>TOTAL</b>											<b>4,455.15</b>

**Tabla B.5 Costos de equipos y herramientas menores.**

DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	CANTIDAD TIEMPO	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
<b>EQUIPOS</b>					
GENERADOR	4	mes	4.00	24000.00	384,000.00
GRUA CAPACIDAD DE 350 TON	2	mes	4.00	60000.00	480,000.00
GRUA CAPACIDAD DE 80 TON	2	mes	4.00	28800.00	230,400.00
MAQUINA DE CORTE 2"	6	mes	4.00	5000.00	120,000.00
MAQUINA DE PRECALENTAMIENTO	6	mes	4.00	6500.00	156,000.00
ANDAMIOS	15	mes	4.00	14400.00	864,000.00
TANQUE DE ARGON	15	mes	4.00	17.00	1,020.00
TANQUE DE AIRE SECO	20	mes	4.00	12.50	1,000.00
TANQUE DE NITROGENO	17	mes	4.00	25.00	1,700.00
EQUIPO DE PROTECCION PERSONAL	32	mes	4.00	66.00	8,448.00
HERRAMIENTA MENOR	1	mes	4.00	250.00	1,000.00
CONSUMIBLES DE SOLDADURA	1	mes	4.00	6660.00	26,640.00
CONSUMIBLES DE CORTE	1	mes	4.00	6660.00	26,640.00
<b>TOTAL</b>					<b>2,300,848.00</b>

**Tabla B.6 Costos indirectos misceláneos.**

DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD TIEMPO	COSTO UNITARIO USD	COSTO TOTAL USD
<b>ARRENDAMIENTOS</b>				
CAMPAMENTO (OFICINA)	mes	4.00	1000.00	4,000.00
PAGO SERVICIOS BÁSICOS (PAGO DE LUZ, AGUA E INTERNET)	mes	4.00	400.00	1,600.00
PAGO SERVICIOS BÁSICOS (COMUNICACIÓN TELEFÓNICA)	mes	4.00	200.00	800.00
<b>MOVILIZACIÓN</b>				
VIAJES Y VIATICOS	mes	4.00	2000.00	8,000.00
<b>SUMINISTROS</b>				
MATERIALES DE OFICINA (RESMAS DE HOJAS A4 Y A3, ROLLOS PARA PLOTTER, TINTAS DE COPIADORA Y PLOTTER, CARPETAS MANILAS, CARPETAS PARA	mes	4.00	400.00	1,600.00
ENSAYOS DE LABORATORIO	mes	4.00	30000.00	120,000.00
<b>TOTAL</b>				<b>136,000.00</b>



## APÉNDICE C

### Cotizaciones

Cotización fueron obtenidas a partir de la revisión de proceso LICS-EPP-040-2022, que tiene como objeto la contratación de servicios de cortes de tanques de hidrocarburos. Las que se presentan en la Figura C1 – C3 correspondiente a valores expuestos por oferentes interesados en participar en dicha licitación.

ITEM	CPC	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO	PRECIO TOTAL
1	546310815	Desmontaje de las esferas TCU-TQ-7210 y TCU-TQ-7211 de 6.238 m3 cada una ubicadas en Terminal Cuenca, parroquia Llaaco, cantón Cuenca, provincia del Azuay. El desmontaje incluye el corte y preparación de las planchas de manera que se asegure la calidad requerida para reutilizar los materiales	UNIDAD	2	\$ 4.102.500,00	\$ 8.205.000,00

**Figura C.1 Cotización oferente #1 proceso LICS-EPP-040-2022.**

ITEM	CPC	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTI.	VALOR UNIT.	SUBTOTAL
1	546310815	Desmontaje de las esferas TCU-TQ-7210 y TCU-TQ-7211 de 6.238 m3 cada una ubicadas en Terminal Cuenca, parroquia Llaaco, cantón Cuenca, provincia del Azuay. El desmontaje incluye el corte y preparación de las planchas de manera que se asegure la calidad requerida para reutilizar los materiales	Unidad	2	\$ 3.998.246,00	\$ 7.996.492,00

**Figura C.2 Cotización oferente #2 proceso LICS-EPP-040-2022.**

ITEM	CPC	DESCRIPCION	UNIDAD	CANTI.	VALOR UNIT.	SUBTOTAL
1	546310815	Desmontaje de las esferas TCU-TQ-7210 y TCU-TQ-7211 de 6.238 m3 cada una ubicadas en Terminal Cuenca, parroquia Llaaco, cantón Cuenca, provincia del Azuay. El desmontaje incluye el corte y preparación de las planchas de manera que se asegure la calidad requerida para reutilizar los materiales	Unidad	2	\$4.000.000,00	\$8.000.000,00

**Figura C 3 Cotización oferente #3 proceso LICS-EPP-040-2022.**

## APÉNDICE D

### Micrografías

En la magnificación de 50x se observó la zona afectada por el calor, estas fueron en las regiones con decoloración totalmente marcadas luego de ser atacadas con Nital al 5%, siendo la zona adyacente al corte más susceptible al ataque. En contraparte en 100x atacado con Nital al 5% en la región alejada del borde no se presenta orientaciones de granos, y su composición en proporción es homogénea. Como se indica en las siguientes secuencias de figuras.

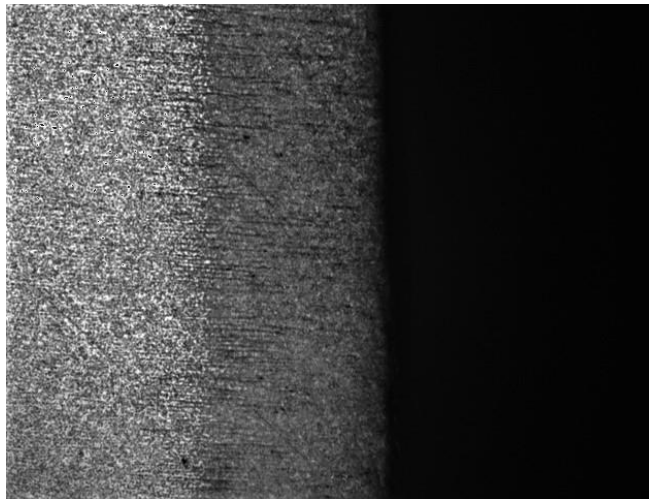


Figura D.1 Muestra @50x atacada con Nital al 5%, borde.

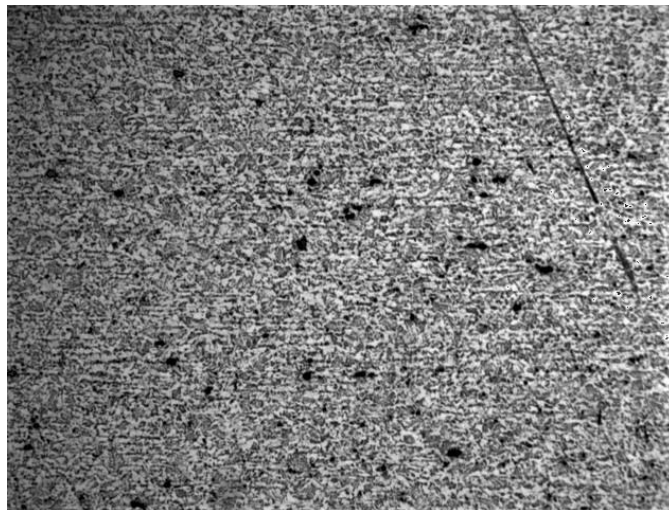
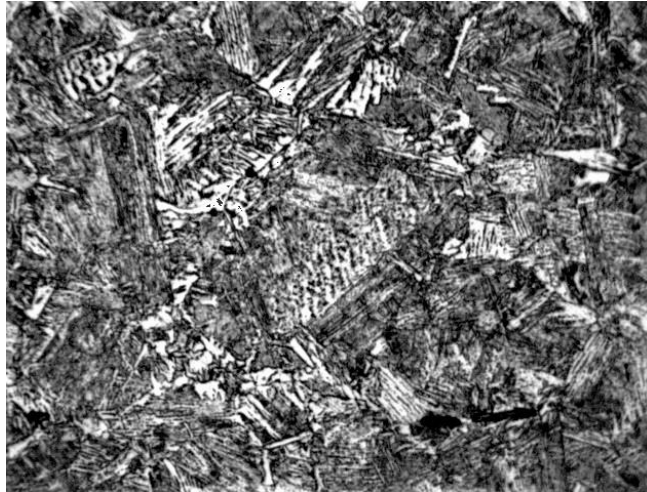
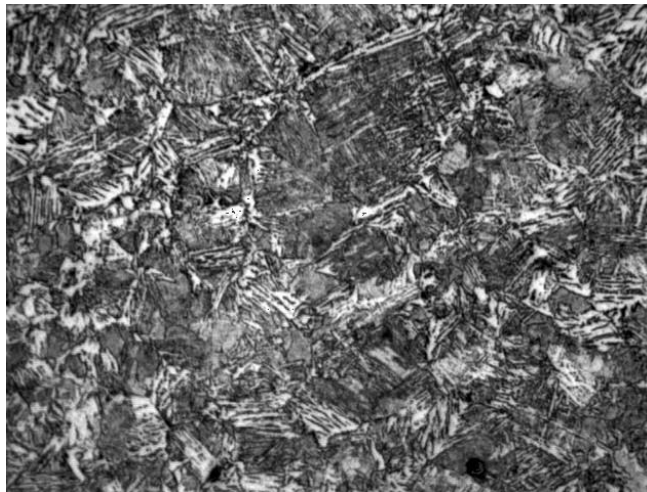


Figura D.2 Muestra @100x atacada con Nital al 5%, >15mm zona no afectada.



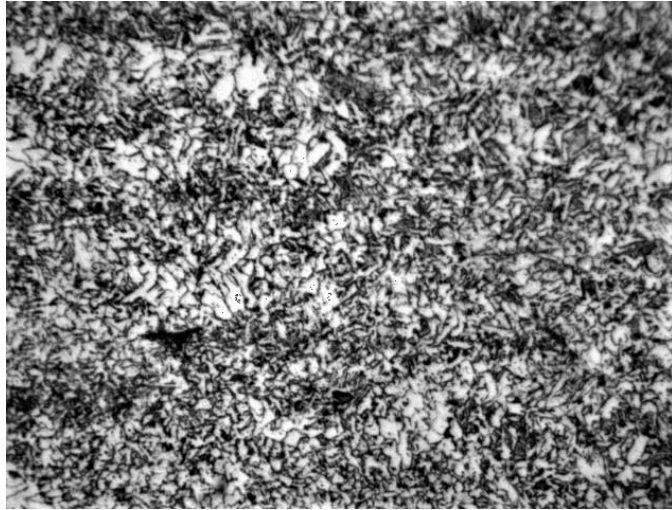
**Figura D.3 Muestra @1000x Atacada con Nital al 5%, a 0.7 mm del borde.**



**Figura D.4 Muestra @1000x Atacada con Nital al 5%, a 0.9 mm del borde.**



**Figura D.5 Muestra @1000x Atacada con Nital al 5%, a 1.5 mm del borde.**



**Figura D.6 Muestra @1000x Atacada con nital al 5%, a 2 mm del borde.**

## APÉNDICE E

### Parámetros

En la Tabla E-1 se establecen el tipo de gases, flujo máximo de consumo y velocidad de corte en relación con el espesor del material a trabajar, información extraída de ficha técnica de proveedor.

**Tabla E.1 Flujo de gases para boquilla de 300 amperios.**

#### Sistema métrico

Espesor del material mm	Categoría de corte	AJUSTES DEL SISTEMA				AJUSTES DEL CONTROL NUMÉRICO POR COMPUTADORA							
		XPR ID de proceso	Ajuste de perforación de protección	Flujo de corte		Velocidad de corte mm/min	Voltaje del arco voltios	Altura de transferencia mm	Altura de perforación mm	Retardo de perforación segundos	Altura de corte mm	Compensación de sangría mm	
				Gas plasma	Gas protección								
10	3	1207	30	85	30	4500	147	9,50	9,50	0,3	3,30	3,2	
12*		1202			22	3940	147					4,7	
15	1	1201	30	90	26	3440	148	9,50	9,50	0,4	3,80	3,6	
16						3280	150					3,7	
20						2550	153					0,6	4,2
25						1950	155					0,8	3,30
30	2	1203	34	34	1530	157	9,50	12,50	1,5	3,30	5,1		
40					940	166					16,50	3,2	4,50
50**	4	1205	30	85	14	560	175	9,50	33,00	8,0	6,40	6,3	
50*		560				175	Arranque desde el borde					1,5	4,50
60*	1204	385	183	6,6									
70*		250	192	3,30	8,0								
80*	5					165	204				3,30	9,5	

\* N<sub>2</sub> usado como gas de protección.

\*\* Asistido por argón.

## APÉNDICE F

El cálculo de los metros lineales fue realizado a partir del modelado del tanque.

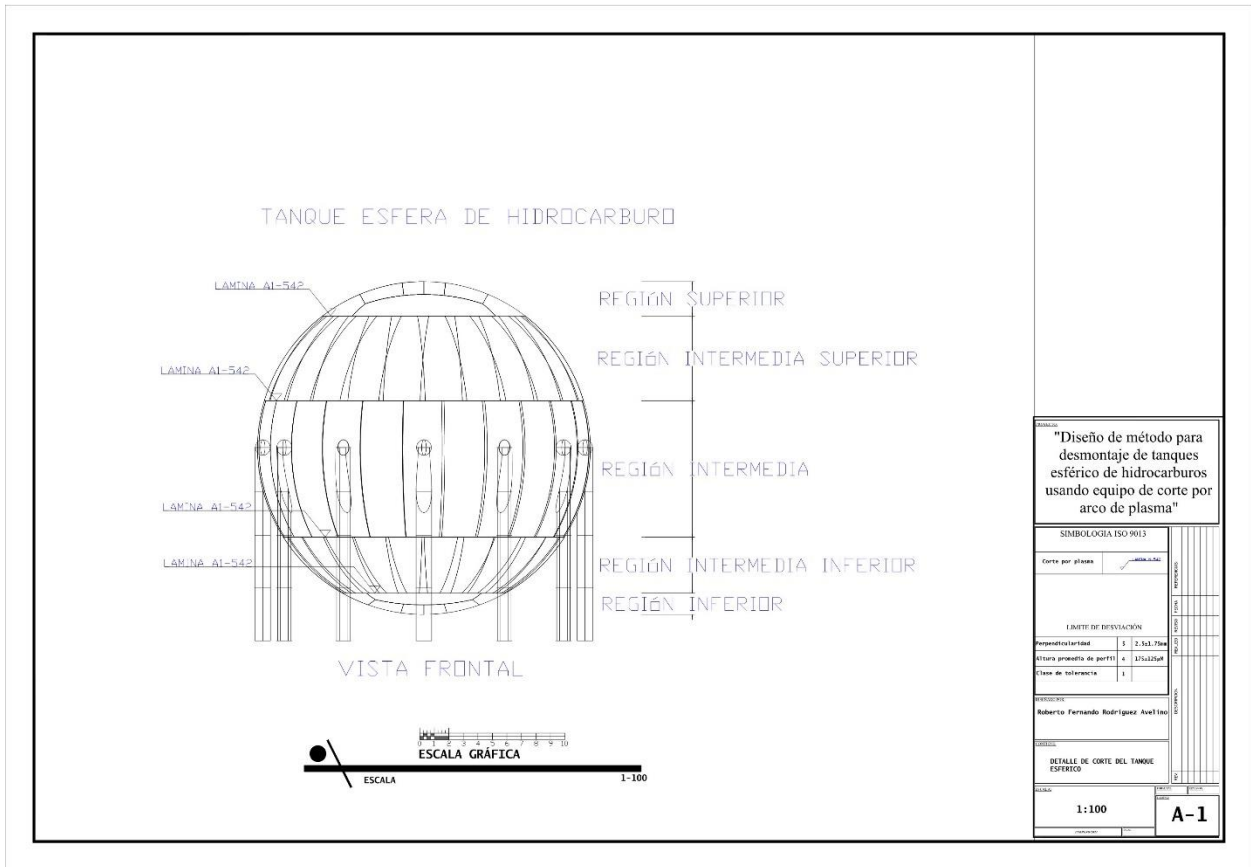
**Tabla E.1 Desglose de dimensiones y estimación de peso**

SUPERIOR	CANTIDAD	ANCHO	LARGO	ÁREA	PESO (KG)	PESO TN	PESO EN TONELADAS TOTAL
<b>TAPA1</b>	3	2.77	8.76	25.45	10180	10.18	30.54
<b>TAPA 2</b>	4	2.92	9.87	23.32	9328	9.328	37.312
SUPERIOR MEDIO	CANTIDAD	ANCHO	LARGO	ÁREA	PESO (KG)	PESO TN	
<b>TIPO 1</b>	12	2.58	5.84	16.92	6768	6.768	81.216
<b>TIPO2</b>	12	2.3	5.84	18.63	7452	7.452	89.424
INFERIOR MEDIO	CANTIDAD	ANCHO	LARGO	ÁREA	PESO (KG)	PESO TN	
<b>TIPO 1</b>	24	2.9	9.4	28.47	11388	11.388	273.312
INFERIOR	CANTIDAD	ANCHO	LARGO	AREA	PESO (KG)	PESO TN	
<b>TAPA1</b>	3	2.77	8.76	25.45	10180	10.18	30.54
<b>TAPA 2</b>	4	2.92	9.87	23.32	9328	9.328	37.312
PILARES	CANTIDAD	DIÁMETRO	LARGO	ÁREA	PESO (KG)	PESO TN	
<b>TIPO1</b>	10	1.7	13.31	35.55	14220	14.22	142.2

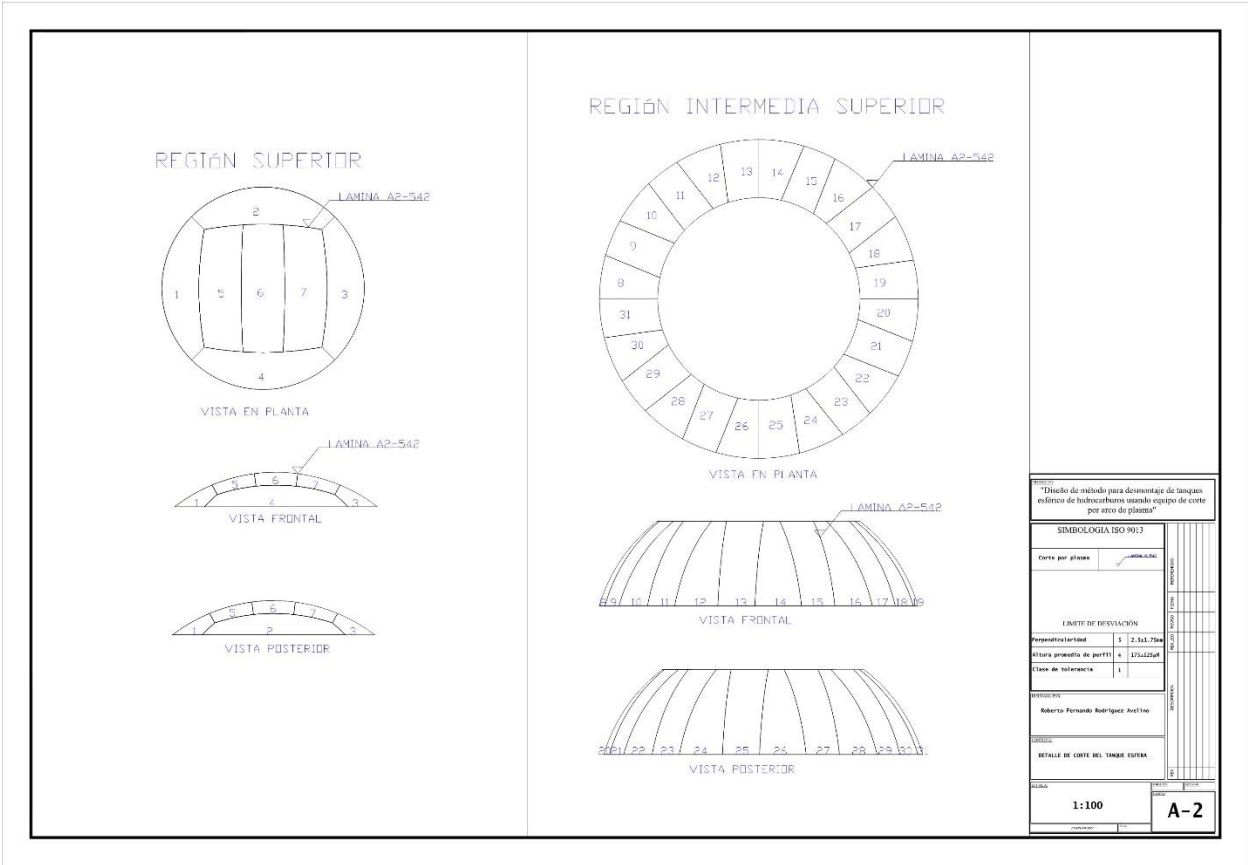
# APÉNDICE G

## Planos

En este anexo se presenta el plano A-1 se describe las regiones del tanque, y en los planos A-2 al A-4 se describe los números de pétalos que serán consecuentes con el orden de desmontaje para cada región.



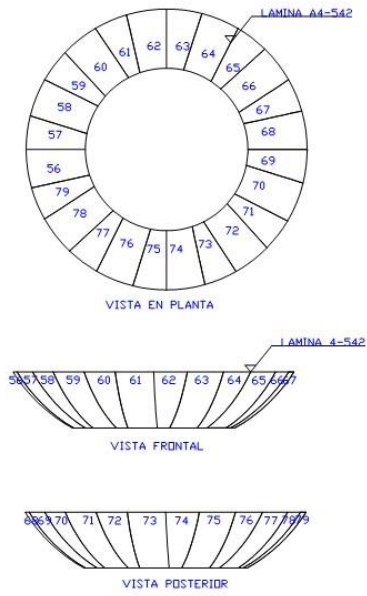
Plano 1. A-1 Regiones del Tanque.



**Plano 2. A-2 Desmontaje 1.**



REGIÓN INTERMEDIA INFERIOR

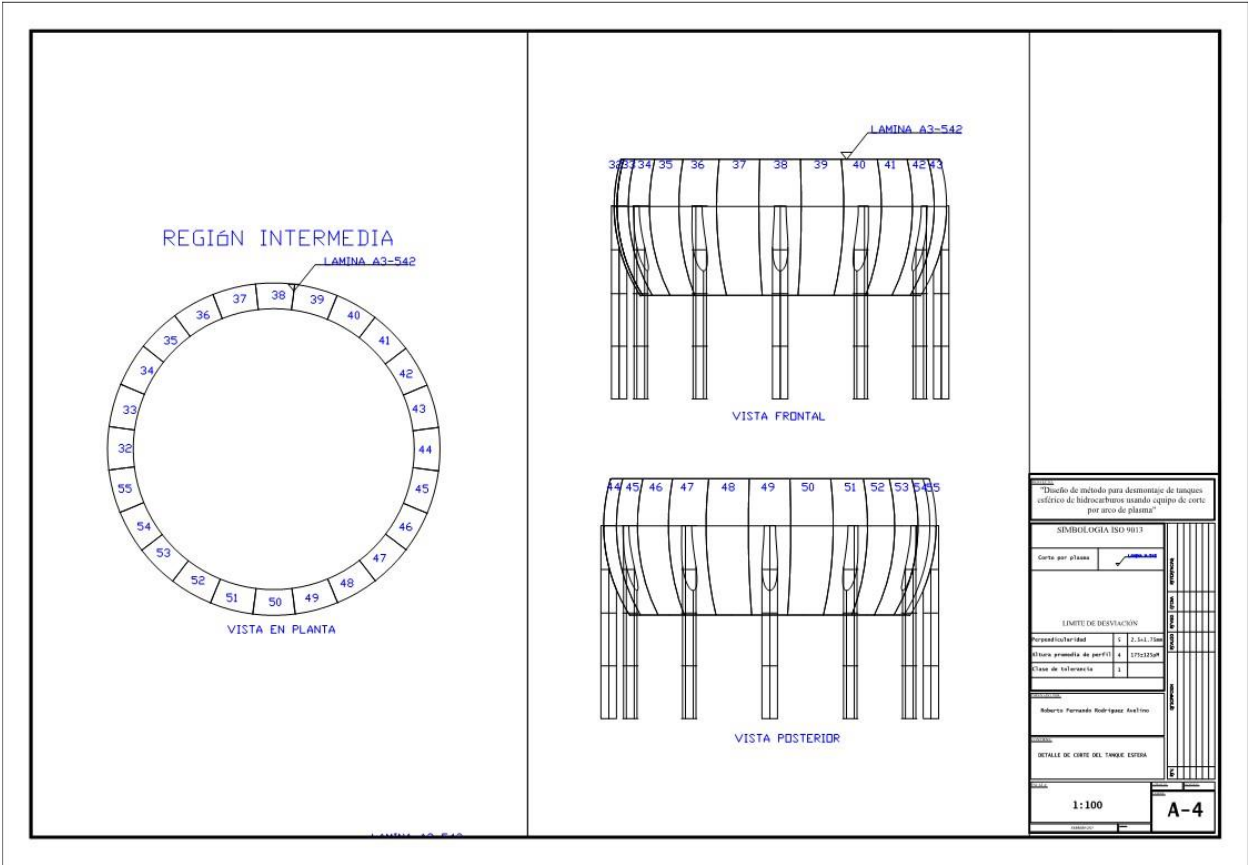


REGIÓN INFERIOR



"Diseño de modelo para documentos de trabajo esférico de hidrocarburos usando equipo de corte por arco de plasma"	
SIMBOLOGIA ISO 9013	
Corte por plasma	<input checked="" type="checkbox"/> LAMINA 4-542
LIMITE DE DESTACACION Perpendicularidad 0.2, 0.1, 0.05 Plano promedio de perfil 0.05, 0.025, 0.0125 Clase de tolerancia 1	
Autor: Fernando Rodríguez Acilino DISEÑO DE CORTE DEL TANKER ESTERA	
Escala: 1:100	
<b>A-3</b>	

Plano 3. A-3 Desmontaje 2.



"Diseño de modelo para documentos de trabajo esférico de hidrocarburos usando equipo de corte por arco de plasma"	
SIMBOLOGIA ISO 9013	
Corte por plasma	<input checked="" type="checkbox"/>
LIMITE DE DESVIACION	
Perpendicularidad	0.2, 0.1, 0.05
Plano paralelo de perfil	0.05, 0.02, 0.01
Clase de tolerancia	1
Roberto Fernando Rodríguez Acilino	
DETALLE DE CORTE DEL TANKER ESTERA	
Escala:	1:100
Hoja:	A-4

Plano 4.A-4 Desmontaje 3.

## APÉNDICE H

### Tolerancias

Información técnica basado ISO 9013-312:2017, a partir del espesor del material se ha seleccionado, rangos permisibles de perpendicularidad y su respectiva tolerancia, siendo la más adecuada situarnos en rango 5 con una perpendicularidad de  $2.5 \pm 0.5$  mm, medida que debe ser corroborada por ensayos metrológico en mínimo 2 toma de muestra en 20 mm una vez cada 1 metro de corte.

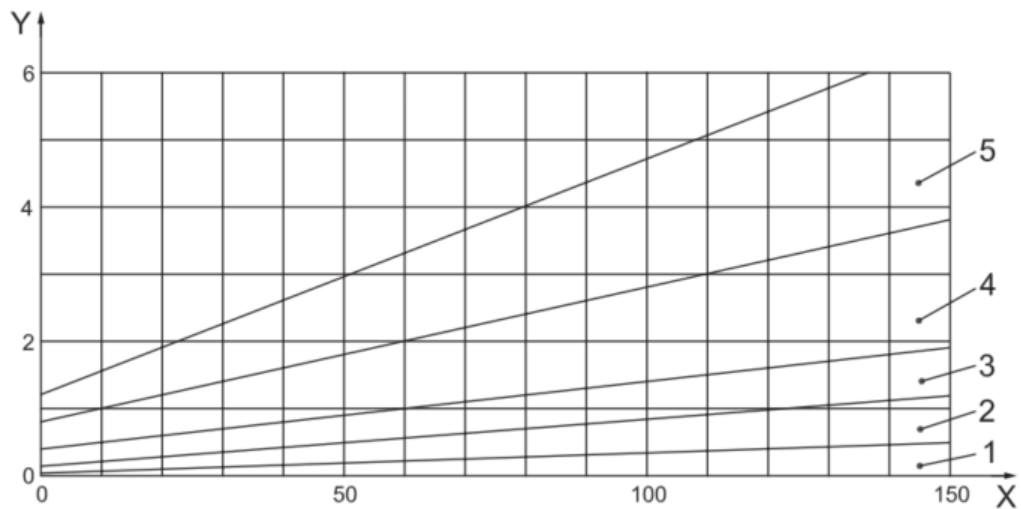
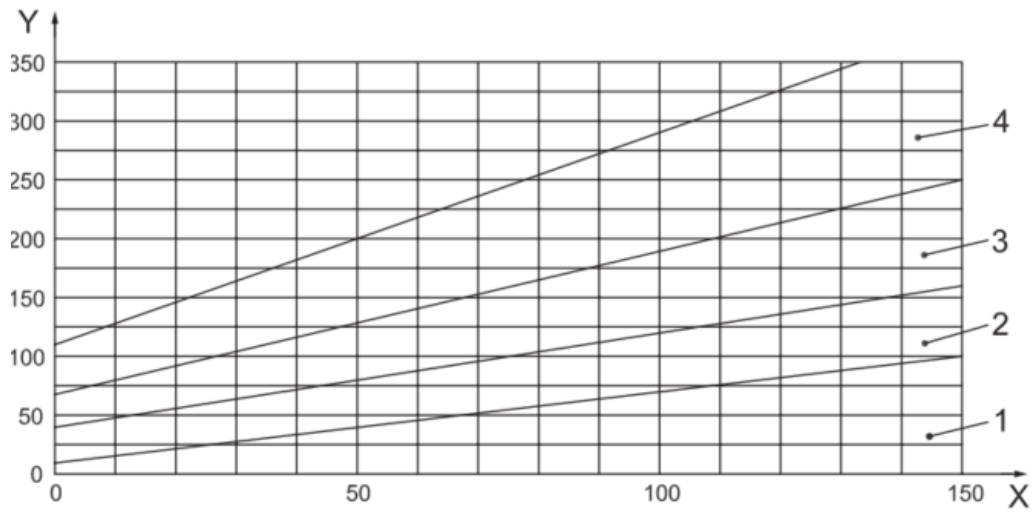


Figura H. 1 Tolerancia de perpendicularidad para piezas con espesor hasta 150 mm.

La altura promedio del perfil, Rz5, es selecciona a partir de la Figura34, para espesor de 50 mm dando como resultado un valor de  $175 \pm 125$   $\mu$ m, medida que

de ser corroborada mediante ensayos metrológico en mínimo 5 toma de muestra en 20 mm una vez cada 1 metro de corte.



**Figura H. 2** Altura promedio de perfil, Rz5, para piezas con espesor hasta 150 mm.-