

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MEJORAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE TRABAJO PARA
UNA MÁQUINA DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICA
TIPO CNC – 4000 MARCA HUGONG WELDER.**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

CRISTIAN FERNANDO CALUPIÑA JÁCOME

cristian.calupina@gmail.com

DANIEL MAURICIO OÑA RIVAS

daniel.ona@hotmail.com

DIRECTOR: ING. HOMERO BARRAGÁN M.Sc.

hbarragan@hotmail.es

Quito, Octubre 2012

DECLARACIÓN

Nosotros, Cristian Fernando Calupiña Jácome y Daniel Mauricio Oña Rivas, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

Cristian Fernando Calupiña Jácome

Daniel Mauricio Oña Rivas

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Cristian Fernando Calupiña Jácome y Daniel Mauricio Oña Rivas, bajo mi supervisión.

ING. HOMERO BARRAGÁN M.Sc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradecemos de manera especial al Ing. Homero Barragán primeramente por la calidad de ser humano que es, por la confianza y comprensión que nos brindo, por su acertada y debida dirección durante el transcurso de la realización de este proyecto. A la empresa PROMEC S.C.C. por facilitarnos de manera oportuna los equipos y materiales para la elaboración de este proyecto.

Agradecimiento principalmente a Dios por haberme iluminado todos y cada uno de los días vividos.

A mi madre Isabel Jácome por haberme dado la vida y la mejor herencia que se puede dar a un hijo, la educación.

A mis hermanos Patti y Kevin por brindarme su compañía y consejos cuando realmente eran necesarios.

Cristian

A Dios por guiarme, encaminarme, por todas las bendiciones y fortalezas que siempre me ha dado en los momentos difíciles que he tendido que afrontar durante mi vida y carrera estudiantil.

Agradezco infinitamente a mi familia en general no cabe hacer ninguna distinción aquí, creo que tanto mis padres como mis hermanos me han alentado y apoyado para culminar esta etapa de mi vida.

A mis compañeros Diego Erazo, Andrés Novoa, Fausto Narváez, Jairo Revelo y Cesar Sinchiguano que me dieron la mano cuando lo ameritaba, gracias muchachos y a perseguir sueños.

Daniel

DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mi madre Isabel Jácome para quien sólo tengo palabras y sentimientos eternos de agradecimiento, porque sin su guía y comprensión no hubiese sido posible el desarrollo y culminación de mis estudios.

A mis hermanos Patti y Kevin, para quienes espero ser fuente de inspiración, les agradezco por su ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

Cristian

A toda mi familia porque este triunfo es de todos y que sea el inicio de cosas mejores en nuestras vidas, siempre podrán contar conmigo.

Aquí en este punto si hay una mención especial y esta es para mi padre Blas Eugenio Oña Rivera te la dedico papa con todo mi corazón, con todas mi fuerzas, muchas gracias por todo, por nunca desconfiar de mi, por siempre darme ánimos para continuar, por el apoyo incondicional que hasta ahora tengo de su parte, gracias papa, no te defraude y este triunfo va dedicado a usted.

Y todos los que alguna vez me dijeron no has de poder, que haces estudiando allá, no saben de lo que soy capaz.

Daniel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN	ii
CERTIFICACIÓN	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
DEDICATORIA.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xvi
ÍNDICE DE ANEXOS	xxiii
RESUMEN	xxiv
PRESENTACIÓN	xxvi
CAPITULO 1	1
ASPECTOS GENERALES DE LOS PROCESOS DE CORTE	1
1.1. GENERALIDADES	1
1.2. PROCESOS DE CORTE TÉRMICO EN METALES.....	3
1.2.1. CORTE CON OXÍGENO.....	3
1.2.1.1. Corte con fundente químico (FOC).....	3
1.2.1.2. Corte con lanza de oxígeno (LOC).....	3
1.2.1.3. Corte con polvo metálico (POC).....	4
1.2.1.4. Corte con gas oxi-combustible (OFC)	5
1.2.2. CORTE POR DESCARGA ELÉCTRICA Y ARCO ELÉCTRICO	6
1.2.2.1. Corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC).....	6
1.2.2.2. Corte por arco eléctrico (AC).....	7
1.2.3. CORTE TÉRMICO POR HAZ.....	13
1.2.3.1. Corte con haz de electrones (EBC).....	13
1.2.3.2. Corte por haz de láser (LBC).....	13
1.2.4. OTROS PROCESOS DE CORTE	14
1.2.4.1. Corte con alambre electroquímico (ECWC)	14
1.2.4.2. Corte con chorro de agua (WJC).....	15

1.2.4.3.	Corte con chorro de agua abrasiva (AWJC).....	16
CAPITULO 2		18
PROCESOS DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICO CON CONTROL NÚMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).		18
2.1.	PROCESO DE CORTE POR PLASMA (PAC)	18
2.1.1.	DESCRIPCIÓN.....	18
2.1.1.1.	Clasificación	20
2.1.1.2.	Aspectos metalúrgicos	22
2.1.1.3.	Residuos	22
2.1.2.	EQUIPO.....	23
2.1.2.1.	Antorcha	23
2.1.2.2.	Generador de plasma.....	23
2.1.2.3.	Controles de corte	24
2.1.2.4.	Corte por control numérico	24
2.1.3.	CALIDAD DE CORTE POR ARCO DE PLASMA	25
2.1.3.1.	Introducción.....	25
2.1.3.2.	Enfoque Sistémico del Proceso – Análisis de las Condiciones del Corte por Arco de Plasma.....	26
2.1.3.3.	Parámetros de Entrada	27
2.1.3.4.	Parámetros de Salida.....	34
2.1.3.5.	Claves para mejorar la calidad de corte	43
2.2.	PROCESO DE CORTE OXIACETILÉNICO (OFC)	47
2.2.1.	DESCRIPCIÓN.....	47
2.2.1.1.	Aspectos químicos	48
2.2.1.2.	Aspectos metalúrgicos	49
2.2.1.3.	Oxígeno y gases combustibles.....	51
2.2.2.	EQUIPO.....	53
2.2.2.1.	Equipo manual.....	53
2.2.2.2.	Equipo mecanizado	54
2.2.2.3.	Procedimientos de corte.....	55
2.2.3.	CALIDAD DE CORTE OXIACETILÉNICO.....	55
2.2.3.1.	Introducción.....	55

2.2.3.2.	Enfoque Sistémico del Proceso – Análisis de las Condiciones del Corte Oxiacetilénico	57
2.2.3.3.	Parámetros de Entrada	59
2.2.3.4.	Parámetros de Salida	63
2.2.3.5.	Claves para mejorar la calidad de corte	68
2.3.	INTRODUCCIÓN AL CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).....	71
2.3.1.	GENERALIDADES	71
2.3.1.1.	Definición.....	72
2.3.1.2.	Objetivo	73
2.3.1.3.	Ventajas y desventajas.....	73
2.3.2.	INTRODUCCION AL BURNY 10 LCD PLUS.....	74
2.3.2.1.	Componentes del panel frontal.....	75
2.3.2.2.	Descripción de Modos	78
CAPITULO 3.....	81	
DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA CNC-4000, MARCA HUGONG WELDER Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA MESA DE CORTE	81	
3.1.	INTRODUCCIÓN.....	81
3.2.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA TIPO CNC-4000 MARCA HUGONG WELDER.	82
3.2.1.	CONDICIONES DE TRABAJO	83
3.2.2.	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	84
3.2.3.	ESTRUCTURA PRINCIPAL	85
3.2.4.	OPERACIÓN	87
3.3.	TEORIA DE DISEÑO.....	87
3.3.1.	MATERIALES	87
3.3.1.1.	Acero al carbono	87
3.3.2.	ANÁLISIS DE CARGAS PARA EL DISEÑO.....	87
3.3.3.	CARGA ESTÁTICA.....	88
3.3.3.1.	Carga de peso propio	88
3.3.4.	CARGAS DINÁMICAS.....	89
3.3.4.1.	Carga de operación	89
3.3.5.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	91

3.3.5.1.	Esfuerzos de flexión	91
3.3.5.2.	Consideración de un valor de esfuerzo permisible.....	92
3.4.	COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA MESA DE CORTE	92
3.4.1.	ANÁLISIS DE CARGAS.....	93
3.4.1.1.	Cargas estáticas.....	93
3.4.1.2.	Cargas dinámicas.....	94
3.4.2.	DISEÑO ESTRUCTURAL.....	95
3.4.2.1.	Consideraciones de cálculo.....	95
3.4.2.2.	Primer caso - platina.....	95
3.4.2.3.	Primer caso – viga longitudinal.....	100
3.4.2.4.	Segundo caso - platina.....	104
3.4.2.5.	Segundo caso – viga longitudinal.....	106
CAPITULO 4		108
EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CORTE - METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL DESARROLLO DE PRUEBAS.....		108
4.1.	INTRODUCCIÓN.....	108
4.2.	EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CORTE.....	109
4.2.1.	EVALUACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICO DE LA EMPRESA PROMEC S.C.C.	109
4.2.2.	MÓDULO DE CORTE POR ARCO DE PLASMA	110
4.2.2.1.	Descripción de Funcionamiento	110
4.2.2.2.	Estado del generador de plasma.....	111
4.2.2.3.	Estado del sistema de alimentación de aire comprimido.....	114
4.2.2.4.	Estado de la antorcha de corte por plasma mecanizada T100M-2	117
4.2.3.	MÓDULO DE CORTE OXIACETILÉNICO.....	120
4.2.3.1.	Descripción de funcionamiento.....	120
4.2.3.2.	Estado del sistema de regulación de gases	121
4.2.3.3.	Estado de la antorcha de corte oxiacetilénico	123
4.2.4.	MÓDULO DE BANCADA Y PÓRTICO	125
4.2.4.1.	Descripción de funcionamiento.....	125

4.2.4.2.	Estado de la bancada y pórtico	125
4.2.5.	ACCIONES CORRECTIVAS	128
4.2.5.1.	INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO.....	128
4.2.5.2.	ACCIONES CORRECTIVAS DEL EQUIPO.....	132
4.3.	METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL DESARROLLO DE PRUEBAS PARA LOS PROCESOS PAC Y OFC	138
4.3.1.	SELECCIÓN DE MATERIALES.....	139
4.3.1.1.	Acero ASTM A-36.....	139
4.3.1.2.	Acero Inoxidable AISI 304.....	140
4.3.2.	PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	141
4.3.2.1.	Tamaño de las probetas.....	142
4.3.2.2.	Codificación de las probetas	142
4.3.3.	CONSUMIBLES PARA EL PROCESO PAC	143
4.3.3.1.	Selección de consumibles	143
4.3.3.2.	Componentes de una antorcha de plasma mecanizada.....	145
4.3.3.3.	Montaje correcto de los consumibles de la antorcha.....	147
4.3.3.4.	Tipo de consumible seleccionado.....	148
4.3.4.	VIDA ÚTIL DEL CONSUMIBLE	150
4.3.4.1.	Averías comunes.....	152
4.3.5.	CONSUMIBLES PARA EL PROCESO OFC	153
4.3.5.1.	Selección de boquillas.....	154
4.3.5.2.	Tipo de boquilla seleccionada	155
4.3.5.3.	Vida útil de la boquilla.....	157
4.3.6.	PRUEBAS DE CORTE TÉRMICO DE METALES	158
4.3.6.1.	Aspectos fundamentales de la práctica del corte.	159
4.3.6.2.	Parámetros de evaluación y calificación.....	160
4.3.6.3.	Proceso de evaluación y calificación de probetas	162
4.3.6.4.	Metodología experimental de pruebas	162
4.3.6.5.	Registro de pruebas de corte	163
4.3.6.6.	Matriz cuantitativa-cualitativa del proceso experimental.....	163
4.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	167
4.4.1.	CORTE POR PLASMA	167
4.4.1.1.	Defectos	167
4.4.1.2.	Velocidad de corte.....	170

4.4.2.	CORTE OXIACETILÉNICO	173
4.4.2.1.	Defectos	173
4.4.2.2.	Velocidad de corte.....	175
4.4.3.	COMPARACIÓN DE PROCESOS.....	177
CAPITULO 5		179
ANÁLISIS DE COSTOS Y SEGURIDAD INDUSTRIAL		179
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	179
5.2.	MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL COSTO DE CORTE PARA LOS PROCESOS PAC Y OFC.....	180
5.2.1.	COSTO DE DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN.....	180
5.2.2.	COSTO DE MANO DE OBRA	181
5.2.3.	COSTO DE OPERACIÓN.....	181
5.2.3.1.	Costo de operación para el proceso PAC	182
5.2.3.2.	Costo de operación para el proceso OFC	184
5.2.4.	COSTO DE CORTE POR METRO	186
5.3.	APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE COSTOS.....	186
5.3.1.	PARÁMETROS DE ENTRADA.....	186
5.3.1.1.	Proceso PAC.....	186
5.3.1.2.	Proceso OFC.....	188
5.3.2.	CÁLCULO DE COSTOS.....	189
5.3.2.1.	Costo total	189
5.3.2.2.	Costo de depreciación.....	189
5.3.2.3.	Costo de mano de obra	190
5.3.2.4.	Costo de operación	190
5.3.2.5.	Costo de corte por metro.....	190
5.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	194
5.4.1.	COSTO DE CORTE POR METRO vs. ESPESOR	194
5.4.1.1.	Acero ASTM A-36.....	194
5.4.1.2.	Acero Inoxidable AISI A-304 y Acero ASTM -36	196
5.4.1.3.	Costo de corte vs. Metros cortados	197
5.5.	SEGURIDAD INDUSTRIAL	200
5.5.1.	INTRODUCCION.....	200

5.5.2.	RIESGOS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS.....	200
5.5.2.1.	Riesgos	201
5.5.2.2.	Evaluación de riesgos	204
5.5.3.	MEDIDAS DE SEGURIDAD	205
5.5.3.1.	Ventilación.....	206
5.5.3.2.	Sistema de suministro de gases y dispositivos asociados proceso OFC	206
5.5.3.3.	Medidas para reducir el riesgo de exposición al humo genera en el PAC	207
5.5.3.4.	Equipo de protección personal	208
5.5.4.	PRÁCTICA SEGURA.....	211
5.5.4.1.	Preparación antes de iniciar el corte	211
5.5.4.2.	Durante el corte	211
5.5.4.3.	Después del corte proceso OFC	211
5.5.4.4.	Consideraciones especiales para el proceso PAC	211
5.5.4.5.	Prevención y protección del fuego.....	212
5.5.4.6.	Almacenamiento y transporte seguro de cilindros	213
5.5.4.7.	Prevención ante electrochoque	213
5.5.4.8.	Prevenciones especiales	215
5.5.5.	EMERGENCIA.....	215
5.5.5.1.	Procedimiento de respuesta ante una emergencia	216
5.5.5.2.	Respuesta a una posible situación de emergencia	216
CAPITULO 6	218
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	218
6.1.	CONCLUSIONES	218
6.2.	RECOMENDACIONES.....	220
BIBLIOGRAFÍA:	221
ANEXOS	224

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Capacidad de corte de los aceros con distintos elementos de aleación	50
Tabla 3.1 Condiciones de trabajo de la máquina	83
Tabla 3.2 Datos técnicos de la máquina	84
Tabla 3.3 Resumen de diseño.....	107
Tabla 4.1 Características técnicas del generador de plasma.....	113
Tabla 4.2 Características técnicas de compresor SCHULZ – SRP3030	115
Tabla 4.3 Características técnicas de la unidad de mantenimiento FRL.....	116
Tabla 4.4 Características técnicas de la bancada y pórtico	126
Tabla 4.5 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Generador de plasma.....	129
Tabla 4.6 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Alimentación de aire comprimido.....	129
Tabla 4.7 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Antorcha de corte por plasma.....	130
Tabla 4.8 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Sistema de regulación de gases	130
Tabla 4.9 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Antorcha de corte oxiacetilénico.....	131
Tabla 4.10 Instrucciones de mantenimiento, Bancada y pórtico	131
Tabla 4.11 Composición química del acero ASTM A-36.....	140
Tabla 4.12 Propiedades Mecánicas del acero ASTM A-36.....	140

Tabla 4.13 Composición química del acero AISI 304.....	141
Tabla 4.14 Propiedades Mecánicas del AISI 304.....	141
Tabla 4.15 Tipos de consumibles Powermax1650 Hypertherm	145
Tabla 4.16 Valores de amperaje de corte en función del espesor para el proceso PAC	149
Tabla 4.17 Tabla para seleccionar la boquilla correcta	157
Tabla 4.18 Criterio de aceptación de la inspección visual.....	161
Tabla 4.19 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso PAC, para acero ASTM A-36.....	164
Tabla 4.20 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso PAC, para acero inoxidable AISI 304	165
Tabla 4.21 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso OFC, para acero ASTM A-36.....	165
Tabla 4.22 Parámetros de trabajo, proceso PAC, Acero ASTM A-36	166
Tabla 4.23 Parámetros de trabajo, proceso PAC, Acero inoxidable AISI 304	166
Tabla 4.24 Parámetros de trabajo, proceso OFC.....	167
Tabla 4.25 Comparación de procesos OFC y PAC.....	178
Tabla 5.1 Costo de depreciación y mano de obra.....	186
Tabla 5.2 Costo de consumibles	187
Tabla 5.3 Tiempos de vida útil de los consumibles	187
Tabla 5.4 Costo de energía eléctrica y de aire comprimido	187

Tabla 5.5 Velocidades de corte para cada espesor y material	188
Tabla 5.6 Costo de depreciación y mano de obra OFC	188
Tabla 5.7 Costo de boquillas y flujos respectivos	188
Tabla 5.8 Costo de gases	189
Tabla 5.9 Velocidades de corte para cada espesor	189
Tabla 5.10 Resumen de costos para un espesor de 6 mm, material acero ASTM A-36 utilizando el proceso OFC.....	191
Tabla 5.11 Resumen de costos para un espesor de 2,5 mm, material acero ASTM A-36 utilizando el proceso PAC.....	192
Tabla 5.12 Costo por metro según espesor y material. Proceso PAC	193
Tabla 5.13 Costo por metro según espesor y material. Proceso OFC	193

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vista esquemática del corte con lanza de oxígeno	4
Figura 1.2 Esquema del proceso de corte con polvo metálico	5
Figura 1.3 Esquema del proceso de corte con gas oxi-combustible	6
Figura 1.4 Esquema del proceso de corte por descarga eléctrica con alambre .	7
Figura 1.5 Esquema del proceso de corte AOC usando electrodos tubulares ...	9
Figura 1.6 Hendidura con arco de electrodo de carbono y aire.....	10
Figura 1.7 Esquema del proceso de corte por arco de tungsteno con gas.	11
Figura 1.8 Proceso de corte por arco de electrodo metálico recubierto.	12
Figura 1.9 Proceso de corte por arco de plasma.....	12
Figura 1.10 Proceso de corte con haz de electrones	13
Figura 1.11 Proceso de corte por haz de láser.....	14
Figura 1.12 Esquema del proceso de corte con alambre electroquímico.....	15
Figura 1.13 Esquema del proceso de corte con chorro de agua.....	15
Figura 1.14 Proceso de corte con chorro de agua abrasiva.....	17
Figura 2.1 Temperaturas en el arco de plasma.....	18
Figura 2.2 Terminología del proceso PAC	19
Figura 2.3 Enfoque sistémico del proceso de corte por plasma.....	27
Figura 2.4 Terminología del arco de plasma convencional	28
Figura 2.5 Líneas de corte para una velocidad correcta	30

Figura 2.6 Líneas de corte para una velocidad baja.....	30
Figura 2.7 Líneas de corte para una velocidad alta.....	31
Figura 2.8 Velocidad de corte correcta.....	31
Figura 2.9 Velocidad de corte baja.....	31
Figura 2.10 Velocidad de corte alta.....	32
Figura 2.11 Relación del amperaje y la velocidad de corte	33
Figura 2.12 Ángulo de bisel normal en el plasma convencional.....	35
Figura 2.13 Angulo negativo de corte.....	35
Figura 2.14 Angulo positivo de corte	36
Figura 2.15 Parte superior e inferior redondeados	37
Figura 2.16 Escoria por alta velocidad	39
Figura 2.17 Escoria por baja velocidad	40
Figura 2.18 Escoria superior	40
Figura 2.19 Asperezas de la superficie.	42
Figura 2.20 Color en la superficie.....	42
Figura 2.21 Ángulos de corte normales del proceso PAC.....	43
Figura 2.22 Corte de contornos.....	43
Figura 2.23 Corte de orificios	44
Figura 2.24 Perpendicularidad necesaria para un corte exitoso.....	45
Figura 2.25 Efecto de la distancia antorcha-pieza de trabajo.....	46

Figura 2.26 Elementos del corte oxiacetilénico	47
Figura 2.27 Proceso de corte oxiacetilénico.....	48
Figura 2.28 Ajuste de la llama oxiacetilénica	53
Figura 2.29 Parámetros del proceso oxiacetilénico.....	57
Figura 2.30 Enfoque sistémico del proceso de corte oxiacetilénico	58
Figura 2.31 Corte correcto.....	58
Figura 2.32 Llama de precalentamiento excesiva	59
Figura 2.33 Exceso de oxígeno de corte.....	60
Figura 2.34 Velocidad de corte baja.....	61
Figura 2.35 Velocidad de corte alta.....	61
Figura 2.36 Boquilla demasiado lejos de la superficie.....	62
Figura 2.37 Boquilla demasiado cerca de la superficie	62
Figura 2.38 Boquilla sucia	62
Figura 2.39 Fusión del borde superior.....	64
Figura 2.40 Llama de precalentamiento demasiado fuerte	64
Figura 2.41 Boquilla demasiado cerca de la superficie	64
Figura 2.42 Boquilla demasiado lejos de la superficie.....	65
Figura 2.43 Líneas de arrastre por baja velocidad	66
Figura 2.44 Líneas de arrastre por alta velocidad	66
Figura 2.45 Ancho de corte	67

Figura 2.46 Socavamiento inferior.....	67
Figura 2.47 Panel frontal de BURNY 10 LCD Plus.....	75
Figura 2.48 Pantalla táctil LCD.....	76
Figura 2.49 Membrana de botones de control.....	77
Figura 2.50 Botones de avance (Jog Pad).....	77
Figura 2.51 Pantalla del menú principal	79
Figura 3.1 CNC – 4000 Flame/Plasma Cutting Equipment; a) Control numérico computacional (CNC); b) Antorcha de plasma; c) Antorcha de oxiacetilénico; d) Pórtico; e) Generador de plasma; f) Bancadas; g) Mesa de corte.	83
Figura 3.2 Ejes de movimiento de la máquina.....	85
Figura 3.3 Representación esquemática de la mesa de corte.....	93
Figura 3.4 Representación de la ubicación de las platinas (Primer caso)	96
Figura 3.5 Cortantes y momentos flectores máximos sobre una platina (Caso 1).....	97
Figura 3.6 Diagrama de esfuerzos de una platina (Caso 1).....	99
Figura 3.7 Comprobación de la deflexión de la platina (Caso 1).....	100
Figura 3.8 Cortantes y momentos flectores máximos sobre una viga (Caso 1).....	101
Figura 3.9 Diagrama de esfuerzos de una viga (Caso 1).....	103
Figura 3.10 Comprobación de la deflexión de la viga (Caso 1).....	104
Figura 3.11 Representación de la ubicación de las platinas (Caso 2).....	104

Figura 4.1 Partes que conforman el sistema de corte tipo pórtico; a) Control numérico computacional (CNC); b) Antorcha de plasma; c) Antorcha de oxiacetilénico; d) Pórtico; e) Generador de plasma; f) Bancadas; g) Mesa de corte.	109
Figura 4.2 Generador de plasma Powermax 1650 – Hypertherm.	111
Figura 4.3 Controles e indicadores del equipo de plasma.....	112
Figura 4.4 Compresor SCHULZ – SRP3030	115
Figura 4.5 Unidad de mantenimiento FRL.....	115
Figura 4.6 Ubicación de la fuga de aire.....	117
Figura 4.7 Sistema de levantamiento	118
Figura 4.8 Desalineación de la antorcha	119
Figura 4.9 Antorcha mecanizada T100M-2	119
Figura 4.10 Sistema de regulación de gases	121
Figura 4.11 Partes de la bancada y el pórtico; a) Servo-motor AC; b) Reductor; c) Engrane de salida; d) Rodamientos; e) Bancada.	125
Figura 4.12 Prueba de desplazamiento de la antorcha a través del pórtico...	126
Figura 4.13 Limpieza del generador de plasma	132
Figura 4.14 Desalineación de la antorcha corregida	133
Figura 4.15 Manómetros antes y después de las acciones correctivas	134
Figura 4.16 Acciones correctivas y puesta en marcha de la antorcha de corte oxiacetilénico.....	134

Figura 4.17 Acciones correctivas en la bancada; a) Elevación del pórtico; b) Ubicación de la guía de alineación; c) comprobación de desalineación; d) Lubricación y engrasado de las bancadas	135
Figura 4.18 Alineación correcta de la bancada	136
Figura 4.19 Limpieza y lubricación del pórtico.....	136
Figura 4.20 Acciones correctivas sobre las antorchas; a) Limpieza del dispositivo de levantamiento; b) Desmontaje del dispositivo de levantamiento; c) Colocación de rodamientos nuevos; d) Rodamientos defectuosos.....	137
Figura 4.21 Metodología de pruebas para el proceso PAC y OFC.	138
Figura 4.22 Dimensiones de probeta seleccionada para realizar las pruebas.	142
Figura 4.23 Componentes de la antorcha mecanizada T100M-2.....	146
Figura 4.24 Montaje correcto de los consumibles	148
Figura 4.25 Configuración de consumibles T100M-2 protegidos	149
Figura 4.26 Deterioro de los consumibles PAC.....	151
Figura 4.27 Boquilla de corte OFC.....	156
Figura 4.28 Deterioro de las boquillas OFC	158
Figura 4.29 Forma de ensayo de probetas.....	159
Figura 4.30 Proceso seguido en la evaluación y calificación de los cortes térmicos.....	162
Figura 4.31 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado.	170

Figura 4.32 Gráfico Velocidad de corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo.....	171
Figura 4.33 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado.	172
Figura 4.34 Gráfico Velocidad de corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo.....	172
Figura 4.35 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado	175
Figura 4.36 Gráfico Velocidad de Corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo.....	176
Figura 4.37 Comparación de Velocidad vs Espesor; Acero ASTM A-36, para los proceso PAC y OFC	177
Figura 5.1 Gráfico comparativo del costo de corte por metro lineal por los procesos PAC y OFC, para acero ASTM A-36.....	194
Figura 5.2 Gráfico comparativo del costo de corte por metro lineal por los procesos PAC y OFC, para acero ASTM A-36. (Ampliación).....	195
Figura 5.3 Gráfico comparativo del costo por metro lineal para el acero ASTM A-36 y acero inoxidable AISI 304	196
Figura 5.4 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 6mm.	197
Figura 5.5 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 10mm. ...	198
Figura 5.6 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 20mm. ...	199

ÍNDICE DE ANEXOS

- ANEXO 1: Especificación de perfiles usados en la mesa de corte **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 2: Características técnicas del generador de plasma Powermax 1650 G3 **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 3: Características técnicas del compresor **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 4: Registro de pruebas de corte..... **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 4.1: Registro de pruebas de corte, proceso PAC **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 4.2: Registro de pruebas de corte, proceso OFC **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 5: Valores requeridos para el cálculo de costos **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 5.1: Costo de consumibles proceso PAC **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 5.2: Costo de consumibles proceso OFC **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 5.3: Costo de oxígeno y acetileno..... **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 6: Cálculo de costo por metro para cada espesor **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 6.1: Cálculo de costo por metro para cada espesor, proceso PAC **Error! Marcador no definido.**
- ANEXO 6.2: Cálculo de costo por metro para cada espesor, proceso OFC **Error! Marcador no definido.**
- PLANOS..... **Error! Marcador no definido.**

RESUMEN

El presente documento tiene por objetivo obtener los parámetros de trabajo para un pórtico de corte por plasma y oxiacetilénico, Marca Hugong Welder, Modelo CNC – 4000, para cortar planchas de acero al carbono ASTM A-36, de espesores entre 2mm-80mm, y Acero inoxidable AISI 304, de espesores entre 2mm-12mm, para la empresa PROMEC S.C.C, la cual no posee parámetros de trabajo para el proceso de corte de dichas planchas, por ende no se está aprovechando correctamente los recursos como, maquinaria, mano de obra e instalaciones de apoyo.

En primera instancia se hace una breve revisión de todos los procesos de corte térmico de acuerdo a la Norma DIN 2310 para luego profundizar en los procesos empleados que son, el corte por arco de plasma y el corte oxiacetilénico, presentando sus fundamentos teóricos, un enfoque sistémico en donde se identifican los parámetros de entrada y salida que intervienen en cada proceso, lo que significa identificar y entender exactamente cuales son los parámetros que intervienen y su influencia en el proceso de corte, así como también una introducción a lo que es el control numérico computarizado.

Luego se realiza una descripción general de la máquina tipo CNC, enmarcando sus características técnicas y los componentes que la constituyen, para posteriormente presentar el análisis estructural de la mesa de corte que tiene la finalidad de comprobar si la estructura presenta la capacidad de soportar las diversas cargas a la que estará expuesta.

Además se hace una evaluación del correcto funcionamiento del sistema de corte, para evitar vibraciones, desalineaciones factores que inciden en la calidad de corte y en el incremento de las tolerancias geométricas de la pieza resultante.

Tras suplir el punto anterior se realizan las pruebas experimentales seleccionando y ajustando los parámetros correspondientes para posteriormente evaluar los defectos presentes en las diferentes probetas y clasificando las que presentan la calidad de corte requerida las cuales

enmarcan los parámetros de corte idóneos, siguiendo con el análisis de resultados en donde se compara principalmente el proceso inicial que se llevaba a cabo en la empresa con el final obteniendo sin lugar a duda las mejoras en la calidad del proceso.

Posteriormente se realiza el cálculo de los costos operativos de los dos procesos, con el fin de hallar el costo por metro cortado y así ejemplificar el cálculo de los mismos y presentar un análisis de mejora en lo que concierne a los costos de producción de la empresa. Se describe los principales aspectos de la seguridad industrial para la práctica segura del corte térmico PAC y OFC.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones derivadas de la realización del estudio.

PRESENTACIÓN

Cuando la separación de material se debe principalmente al efecto de las altas temperaturas localizadas sobre una pequeña zona de material estamos ante los procesos de corte térmico, estos poseen un amplio campo de aplicación, y ocupan un segmento cada vez mayor en la industria del corte de metales. Los procesos más usados en la industria por su costo y calidad son el corte por plasma y el oxiacetilénico.

Con la gran competencia que existe en el mercado actualmente, una operación productiva y eficiente de los dos procesos de corte térmico puede ser la diferencia entre ganancias y pérdidas en el trabajo de la fabricación de estructuras metálicas. Muchos talleres, están afectados por problemas crónicos con sus operaciones de corte que podrían reducirse o eliminarse por medio del entrenamiento al operador y el mantenimiento apropiado a las máquinas. Un operador de máquina de corte por plasma y oxiacetilénica bien entrenado produce más piezas cortadas, de calidad más alta, con menos chatarra y menos repetición de trabajo subsecuente. Ellos ahorran dinero en las antorchas y en los diferentes consumibles al usarlos correctamente y minimizan tiempo muerto de máquina por medio de medidas preventivas simples.

En lo general en lo que a las tecnologías de corte se refiere, el sector metalmecánico sufre una serie de carencias como son el bajo nivel de información acerca de los dos procesos, es por ende que el presente proyecto proporciona una fuente de información referente a los mismos, en donde además se establecen los parámetros de corte, requisitos que aseguran la buena calidad de los mismos, enmarcados en la productividad y reducción de los costos operativos lo que es sinónimo de mayor rentabilidad que es lo que buscan las empresas.

Finalmente se espera satisfacer las inquietudes del lector y haber contribuido en cierta forma con el desarrollo técnico de nuestro país.

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DE LOS PROCESOS DE CORTE

1.1. GENERALIDADES

Cuando la separación del material se debe principalmente al efecto de las altas temperaturas localizadas sobre una pequeña zona de material, estamos ante los procesos de corte térmico. Los procesos de corte térmico se aplican en diferentes campos de la ingeniería mecánica, en la construcción naval, en la tecnología de procesos para la producción de componentes y para la preparación de juntas de soldadura.

Los procesos de corte térmico se clasifican en diferentes categorías de acuerdo con la Norma DIN 2310. Como se muestra a continuación:

- Por la física del proceso de corte.
- Por el grado de mecanización. (manual, mecanizado, automático, etc.)
- Por el tipo de fuente de energía.

Clasificación según la física del proceso de corte.

- Corte por llama de gas.- El material es principalmente oxidado, los productos son limpiados por un flujo de oxígeno.
- Corte por fusión.- El material es principalmente fundido y limpiados por un flujo de gas de alta velocidad.
- Corte por haz.- El material principalmente es evaporado, este es transportado fuera de la ranura de corte por la expansión creada o por un gas adicional.

Los diferentes recursos energéticos para el corte térmico según la DIN 2310 son:

Corte térmico por Gas (Oxígeno):

- Corte con fundente químico..... FOC
- Corte con lanza de oxígeno..... LOC
- Corte con polvo metálico..... POC
- Corte con gas Oxi-combustible..... OFC

Corte térmico por descarga eléctrica y arco eléctrico.

- Corte por descarga eléctrica con alambre.....EDWC
- Corte por arco de oxígeno.....AOC
- Corte por arco de electrodo de carbono.....CAC
- Corte por arco de electrodo de carbono y aire.....CAC - A
- Corte por arco de metal protegido con gas.....GMAC
- Corte por arco de tungsteno con gas.....GTAC
- Corte por arco de electrodo metálico recubierto..... SMAC
- Corte por arco de plasma..... PAC

Corte térmico por haz.

- Corte por haz de electrones..... EBC
- Corte por haz de láser..... LBC

Otros procesos de corte.

- Corte con alambre electroquímico..... ECWC
- Corte por chorro de agua.....WJC
- Corte con chorro de agua abrasiva.....AWJC

1.2. PROCESOS DE CORTE TÉRMICO EN METALES

1.2.1. CORTE CON OXÍGENO

El corte con oxígeno (OC) abarca un grupo de procesos de corte empleados para separar metales mediante una reacción exotérmica del oxígeno con el metal base, es el procedimiento utilizado industrialmente para seccionar el acero al carbono, en piezas de gran espesor y diferentes formas. 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.

1.2.1.1. Corte con fundente químico (FOC)¹

El corte oxi-combustible de aceros inoxidable, de fundiciones, de cobre y sus aleaciones prácticamente es imposible de realizar a causa del insuficiente calor que desprende la llama de gas y de la formación de óxidos difíciles de fundir y otros resistentes a la oxidación, como es el óxido de cromo que impide la continuación del corte.

Para cortar estos metales, al chorro de oxígeno cortante se le añade constantemente fundente químico en polvo, los cuales pueden ser sales de sodio, tales como el carbonato de sodio, el cual desprende, al quemarse, la cantidad necesaria de calor que a su vez reacciona con el óxido de cromo y hace de ellos un compuesto soluble facilitando el corte de estos materiales.

1.2.1.2. Corte con lanza de oxígeno (LOC)²

El corte con lanza de oxígeno se pueden utilizar para cortar hormigón armado lo que ha sido un factor esencial para su utilización en trabajos de rescate después de terremotos. También se utiliza para cortar gruesas secciones de hierro fundido, aluminio y acero.

¹ DEGARMO P, BLACK T, KOHSER R, (2002), *Materiales y Procesos de Fabricación volumen 2*, Ed Reverté, España. Pág. 1017

² JEFFUS L, (2009), *Soldadura, Principios y Aplicaciones*, Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 211

Este proceso utiliza un tubo consumible de acero al carbono. La punta del tubo se calienta a su temperatura de ignición con la utilización de un soplete de oxiacetilénico. A través de la lanza se inicia un flujo de oxígeno de alta presión. El oxígeno reacciona con la punta de la lanza caliente, liberando suficiente calor como para mantener la reacción. Como se muestra en la Figura 1.1

El metal caliente, al dejar la punta de la lanza; no ha completado su reacción exotérmica. Cuando esta masa reactiva impacta con la superficie del material que se va a cortar, se libera una gran cantidad de energía en la superficie. Esto, junto con la quema continua del material de lanza en la superficie, origina que el material base se funda.

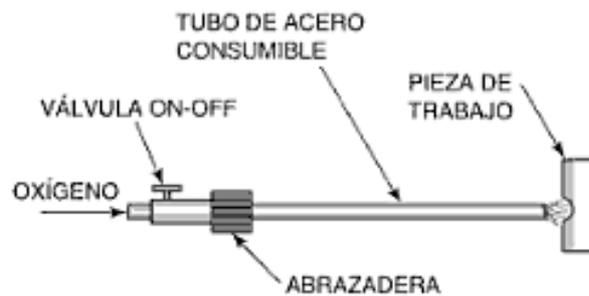


Figura 1.1 Vista esquemática del corte con lanza de oxígeno³

1.2.1.3. Corte con polvo metálico (POC)

Con frecuencia, los materiales difíciles de cortar pueden tratarse con técnicas de soplete modificada.⁴ De esta manera el corte con polvo metálico es un método que permite efectuar el corte de aceros inoxidables, también permite el corte del hierro fundido y el corte de hormigón, este último, hoy en día es el campo de aplicación más importante de dicho proceso de corte térmico.⁵

³ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. Prentice, Octava edición, México, Pág. 479

⁴ DEGARMO P, BLACK T, KOHSER R, (2002), *Materiales y Procesos de Fabricación volumen 2*, Ed Reverté, España, Pág. 1018.

⁵ CACUCI, Dan Gabriel, (2010), "Handbook of Nuclear Engineering volume 5", Ed. Springer, USA, Pág. 3124

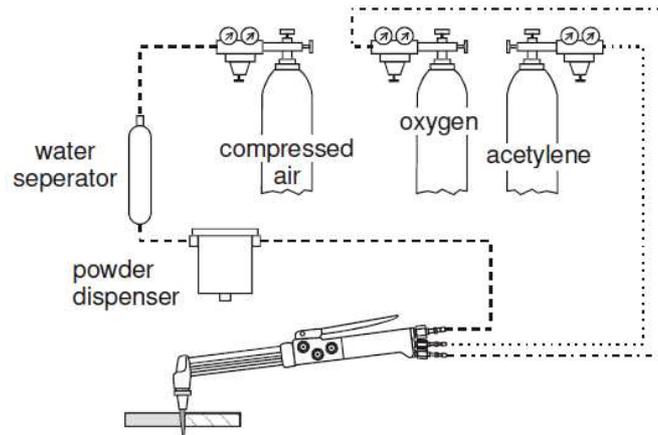


Figura 1.2 Esquema del proceso de corte con polvo metálico⁶

Así el corte con polvo metálico es una técnica en el cual polvo muy fino de hierro se inyecta en la llama de corte a través de una apertura especial en la punta de la antorcha de corte con gas oxi-combustible. Estas partículas de hierro se oxidan rápidamente dando lugar a un aumento repentino del calor sobre la superficie del metal, facilitando el corte con oxígeno o de materiales difíciles, los óxidos refractarios que se forman en la superficie del metal se funden y por consiguiente son expulsados de la zona de corte por el flujo de oxígeno, como se muestra en la Figura 1.2. El polvo de hierro, cuando se introduce en la zona de corte, acelera y propaga la reacción de oxidación y también la acción de fusión.

En la mayoría de los casos se emplea hierro en polvo y mezclas de polvo metálico como hierro y aluminio, en porcentajes de 85% Fe y 15% Al.

1.2.1.4. Corte con gas oxi-combustible (OFC)

El corte con gas oxi-combustible usa el calor de combustión de ciertos gases combinado con la reacción exotérmica del 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 en las cantidades correctas y dirigir una corriente de oxígeno a la región de corte. El mecanismo principal de la

⁶ <http://mercury.kau.ac.kr/welding/Welding%20Technology%20I%20-%20Welding%20Processes/Chapter%2012%20-%20Thermal%20Cutting.pdf>

remoción de material en el corte con oxígeno y gas combustible (OFC, por sus siglas en inglés) 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 hasta llegar al proceso de oxidación final. Cuando la mezcla de oxígeno y gas calienta el material de forma adecuada hasta producir el proceso de combustión, se inyecta un chorro de oxígeno en la boquilla, de tal manera que este oxígeno acelera el proceso. La combustión oxida el material y debido a la temperatura alcanzada, los óxidos se funden y luego son expulsados por la parte inferior, aprovechando el chorro de oxígeno. Como se observa en la Figura 1.3

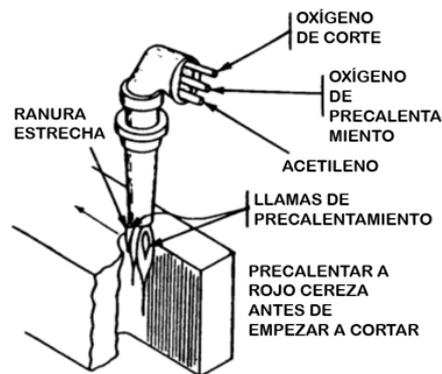


Figura 1.3 Esquema del proceso de corte con gas oxi-combustible⁷

1.2.2. CORTE POR DESCARGA ELÉCTRICA Y ARCO ELÉCTRICO

Los procesos de remoción de material con descarga eléctrica retiran metal mediante una serie de descargas eléctricas discontinuas (arcos eléctricos) que producen temperaturas localizadas suficientemente altas para fundir o evaporizar el metal en la vecindad inmediata a la descarga.

1.2.2.1. Corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC)⁸

El corte por descarga eléctrica con alambre (EDWC, por sus siglas en inglés), es una forma especial del corte con descarga eléctrica que usa un alambre de

⁷ http://www.tecnoficio.com/soldadura/corte_a_llama.php

⁸ GROOVER M, (1997), "Fundamentos de Manufactura Moderna", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México, Pág. 693.

diámetro pequeño como electrodo para cortar un canal delgado en la pieza de trabajo. La acción de corte en el EDWC se obtiene por medio de energía térmica, a partir de las descargas eléctricas entre el electrodo de alambre y la pieza de trabajo. El EDWC se ilustra en la Figura 1.4.

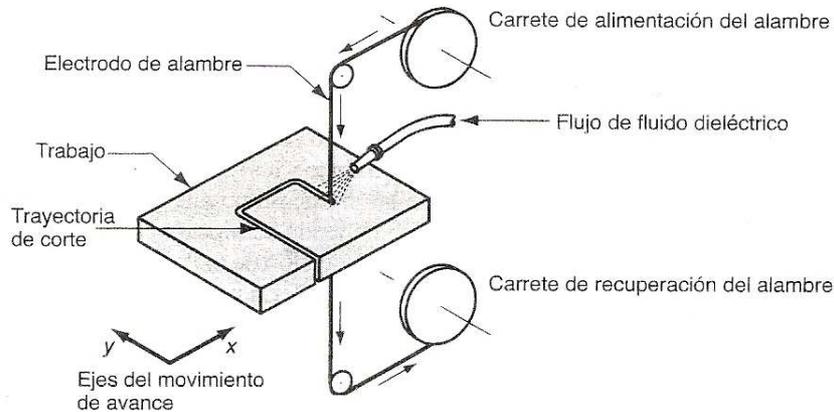


Figura 1.4 Esquema del proceso de corte por descarga eléctrica con alambre

La pieza de trabajo avanza en forma continua y lenta a través del electrodo de alambre para obtener la trayectoria de corte deseada. Conforme se realiza el corte, el alambre avanza en forma continua entre un carrete de alimentación y uno de recuperación. El corte por descarga eléctrica con alambre debe realizarse en presencia de un material dieléctrico. Este puede aplicarse ya sea mediante boquillas dirigidas a la intersección herramienta – pieza de trabajo, o por inmersión de la pieza de trabajo en un baño dieléctrico.

Los materiales que se usan para el alambre incluyen el latón, el cobre, el tungsteno y el molibdeno. Los fluidos dieléctricos incluyen el agua desionizada o aceite.

1.2.2.2. Corte por arco eléctrico (AC)

Básicamente todos los metales pueden cortarse mediante técnicas basadas en el arco eléctrico, en los que el intenso calor que proviene de un arco eléctrico puede usarse para fundir virtualmente cualquier metal con el propósito de cortar. La mayoría de los procesos de corte usan el calor generado por un arco entre un electrodo y una pieza de trabajo metálica para fundir una ranura que

separe la pieza. Estos procesos son, en su mayoría, adaptaciones de las operaciones de soldeo por arco.

1.2.2.2.1. Corte por arco de oxígeno (AOC)⁹

El procedimiento de corte con arco de oxígeno es ampliamente utilizado, tanto para el corte en superficie como bajo el agua, por sus buenas características. Este método puede ser utilizado para hacer cortes de aceros al carbono, aceros aleados, de metales no ferrosos y de fundiciones.

El fundamento del corte es muy simple, una corriente eléctrica que circula a través de un electrodo tubular metálico hueco que produce un arco que calienta el metal a cortar. Durante el corte, la extremidad del electrodo se apoya en la superficie del metal a cortar formando un ángulo de 80 a 85° con esta. Estos cortes pueden también realizarse con electrodos cerámicos y electrodos ordinarios revestidos. La operación de corte se efectúa al aplicar sobre esta zona caliente un chorro de oxígeno que circula por el interior del electrodo. El arco es una fuente de calor suficientemente energética para producir un corte casi instantáneo, incluso bajo el agua.

Al aplicar el flujo de oxígeno sobre una zona, previamente calentada, de una pieza de acero al carbono, se produce una oxidación energética o combustión de esta zona. El calor adicional liberado en esta reacción provoca la fusión del óxido y el calentamiento de la zona contigua. Los óxidos fundidos se alimentan por la acción mecánica del flujo de oxígeno y el corte va progresando por un proceso autoalimentado por la combustión del metal y al que también contribuye el calor del arco. Como se muestra en la Figura 1.5

⁹ JANAPETOV M, (1978), "Soldadura y Corte de Metales", Ed. MIR, Segunda edición, Moscú

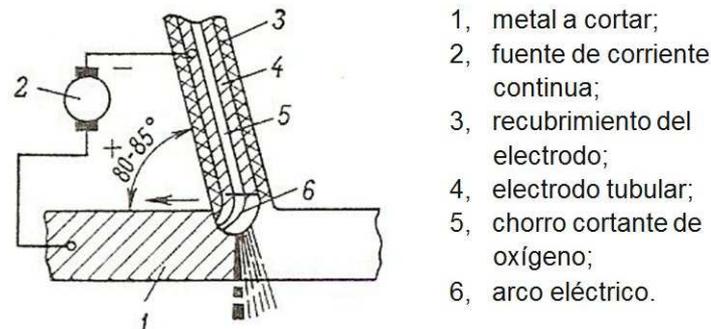


Figura 1.5 Esquema del proceso de corte AOC usando electrodos tubulares

1.2.2.2.2. Corte por arco con electrodo de carbono (CAC)¹⁰

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 emplea un arco eléctrico entre un electrodo de carbono (grafito) y el metal base para fundir el metal que, seguidamente desaparece de la ranura de corte por gravedad o merced al impulso del arco. Como el proceso depende de la gravedad para la eliminación del metal derretido, solo puede usarse en posición vertical o sobre cabeza.

1.2.2.2.3. Corte por arco con electrodo de carbón y aire (CAC-A)¹¹

El corte con arco de electrodo de carbono y aire fue una mejora del proceso con arco con electrodo de carbono. Se encontró que se podría eliminar el metal fundido utilizando un flujo de aire. Esto mejoró mucho la velocidad, la calidad y el control del proceso.

El soplete sujeta tanto el electrodo de carbono como el flujo de aire en la misma unidad. A diferencia del proceso de oxiacetilénico, el corte con arco de electrodo de carbono no requiere que el metal base reaccione con el flujo del aire, este más bien tiene la función de eliminar el metal fundido, con lo que aumenta enormemente la lista de metales que se pueden cortar, acero al carbono, acero de baja aleación, acero inoxidable, hierro fundido que incluye hierro maleable y dúctil, aleaciones de cobre, aluminio-bronce y aluminio-

¹⁰ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. Prentice, Octava edición, México, Pág. 499

¹¹ JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 204-206

níquel-bronce (aleación especial para hélices de barcos), aleaciones de níquel, titanio, circonio, hafnio y sus aleaciones.

El aire se debe apuntar justo debajo y detrás del electrodo y siempre en la misma dirección. Esto asegura que el flujo de aire se dirija al punto donde el electrodo produce un arco con el metal base. Figura 1.6

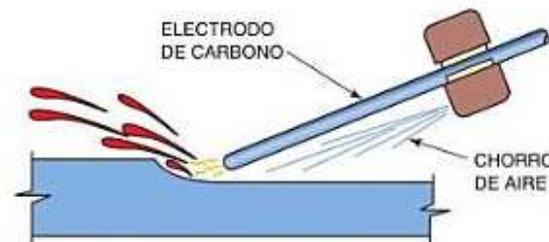


Figura 1.6 Hendidura con arco de electrodo de carbono y aire.

1.2.2.2.4. Corte por arco de metal protegido por gas (GMAC)¹²

El corte por arco de metal y gas es un proceso que emplea un electrodo consumible continuo y un gas protector. Si en el soldeo MIG, se ajustan la velocidad de alimentación del electrodo a velocidades mucho mayores y la intensidad de corriente mucho más elevada, de tal manera que aquel llegue a traspasar la placa por completo, se tendrá un corte y no una soldadura. El electrodo empleado se proyecta realmente a través de la ranura del corte; el arco salta entre las paredes de dicha ranura y el electrodo, no al extremo del alambre como en la soldadura. El procedimiento puede emplearse para cortar metales no ferrosos, aceros inoxidable y las aleaciones que sean difíciles o imposibles de cortar para el corte oxiacetilénico. Las principales desventajas del GMAC son el elevado consumo de electrodos de soldadura y las altas corrientes de corte (hasta 2000 amperios) requeridas.

1.2.2.2.5. Corte por arco de tungsteno con gas (GTAC)¹³

El corte por arco en atmosfera inerte con electrodo de tungsteno, más conocido como corte GTAC está especialmente indicado para metales no ferrosos y para

¹² MARKS L, (1960), "Manual del Ingeniero Mecánico", Editorial Hispano Americana, Primer edición, México

¹³ GONZÁLES J, (1991) "Manual de Soldadura con Llama", Ed. CEAC, Sexta Edición, España

abrir agujeros, de hasta unos 10 mm, en planchas de acero. El arco eléctrico se concentra sobre una zona muy pequeña, funde el metal y este es separado por un chorro de gas que forma una atmósfera inerte alrededor de la zona de corte, evitando la oxidación.

La Figura 1.7 es un esquema de los elementos que componen una instalación de corte por arco de tungsteno con gas.

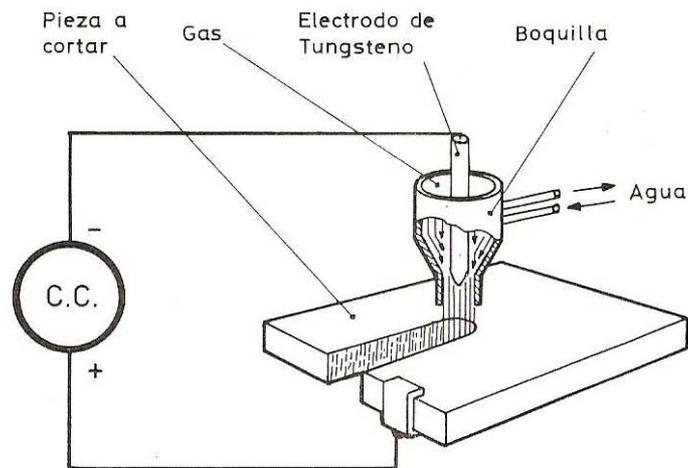


Figura 1.7 Esquema del proceso de corte por arco de tungsteno con gas.

1.2.2.2.6. Corte por arco con electrodo revestido (SMAC)¹⁴

En el corte por arco con electrodo revestido, la función principal del recubrimiento durante el corte es como un aislante eléctrico para que el electrodo pueda efectuar el corte en zonas estrechas sin hacer cortocircuito en los lados, y también funciona como estabilizador del arco, concentrando e intensificando su acción. Por lo regular se usan electrodos tipo E6010, E6012 y E6020, pero pueden lograrse cortes con prácticamente cualquier electrodo de soldadura con arco de metal protegido (SMAW). También hay en el mercado electrodos con cubiertas hechas especialmente para corte.

El SMAC se ha usado para recortar rebabas en fundiciones no ferrosas y para chatarra no ferrosa para reciclaje.

¹⁴ GONZÁLES J, (1991) "Manual de Soldadura con Llama", Ed. CEAC, Sexta Edición, España

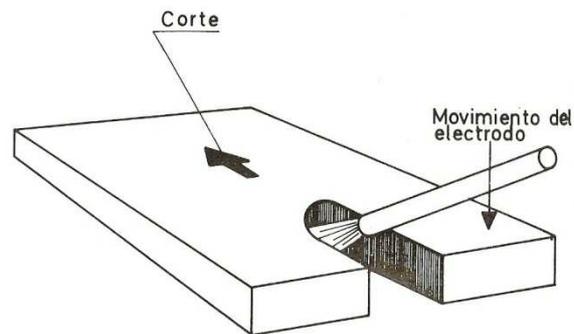


Figura 1.8 Proceso de corte por arco de electrodo metálico recubierto.

1.2.2.2.7. Corte por arco de plasma (PAC)¹⁵

La tecnología de corte por plasma utiliza el estado de ionización de un gas como herramienta de corte. Se establece un arco entre un electrodo (polo negativo) y una boquilla por el cual pasa el gas ionizado a la plancha metálica (polo positivo). De esta forma se genera un arco eléctrico que puede alcanzar los 14000 °C y que se utiliza como herramienta de corte mecánico.

El corte por plasma es un proceso térmico donde se funde el metal. La limitación que tiene este proceso es que es necesario que el material a cortar sea conductor de electricidad.

El aire se puede utilizar en todos los procesos de corte por plasma.



Figura 1.9 Proceso de corte por arco de plasma¹⁶

¹⁵ http://www.aecalpo.com/upload/docs/diagnosticosectorial_req_120210aecalpo%5B2%5D.pdf

¹⁶ http://ing-instalar.com.ar/imagenes/img_procesos/img_plasma/proceso-plasma-2.jpg

El corte por plasma permite alcanzar velocidades de corte muy rápidas en todos los espesores con pequeña zona afectada térmicamente.

1.2.3. CORTE TÉRMICO POR HAZ

1.2.3.1. Corte con haz de electrones (EBC)¹⁷

El corte con haz de electrones es un proceso que emplea una gran densidad de energía (superiores a 10 kW/cm²), el cual golpea a una pieza metálica en donde el 99% de su energía se libera en forma de calor, logrando que este material alcance su punto de fusión produciendo la evaporización instantánea del material, produciendo un corte instantáneo en la pieza de trabajo.

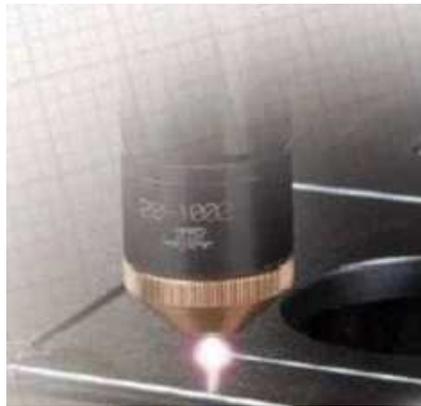


Figura 1.10 Proceso de corte con haz de electrones¹⁸

1.2.3.2. Corte por haz de láser (LBC)¹⁹

En el corte por haz de rayo láser se utiliza el intenso calor contenido en un rayo láser para derretir y/o vaporizar el material a cortar. El láser se consigue mediante un material activo en estado sólido, líquido o gaseoso, que al ser excitado por una fuente externa de energía, emite radiaciones luminosas de tipo láser, como se muestra en la Figura 1.11 Las temperaturas pueden exceder de los 11000°C.

¹⁷ LOBJOIS Ch, (2004), "Fabricación Mecánica, Soldadura y Calderería Transformación de la Chapa - Trazado, Corte, Curvado y Plegado", Ed. CEAC, España, Pág. 185.

¹⁸ <https://www.u-cursos.cl/fau/2008/0/DIT-204/1/material.../4033>

¹⁹ DEGARMO P, BLACK T, KOHSER R, (2002), "Materiales y Procesos de Fabricación volumen 2", Ed Reverté, España, Pág. 1022

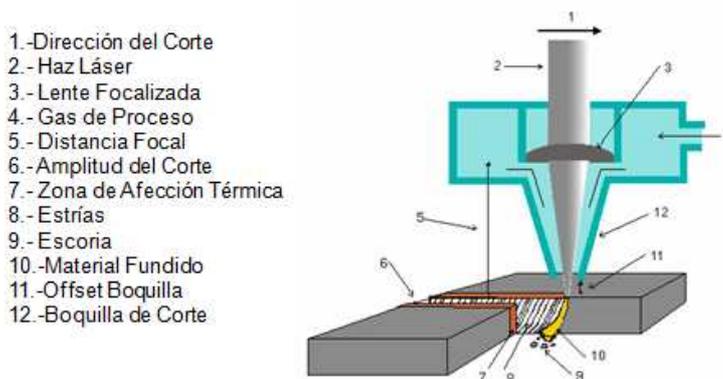


Figura 1.11 Proceso de corte por haz de láser²⁰

No permite cortar materiales reflectantes, tales como el aluminio o el cobre, se requiere de una inversión elevada en comparación con el corte oxiacetilénico, corte por plasma o por agua, debido al costo elevado de los consumibles.

1.2.4. OTROS PROCESOS DE CORTE

1.2.4.1. Corte con alambre electroquímico (ECWC)²¹

El corte con alambre electroquímico utiliza una herramienta de alambre como cátodo y la pieza de trabajo como ánodo para retirar el material. A la pieza de trabajo se le puede dar forma mediante el movimiento relativo entre ella y el alambre. Este proceso es adecuado para cortar en una o dos direcciones. Este proceso tiene una velocidad de avance limitada, pues la misma depende del ancho del alambre y del diámetro de la pieza de trabajo, como se muestra en la Figura 1.12 Es más adecuado para el proceso de alto acabado superficial alcanzando valores de hasta $0.15 \mu\text{m}$. El consumo de potencia es bajo y el sistema de manejo de herramientas es económico. El acabado superficial es afectado por parámetros como la velocidad de avance, la de rotación de la pieza de trabajo y la de flujo del electrolito.

²⁰ <https://www.u-cursos.cl/fau/2008/0/DIT-204/1/material.../4033>

²¹ BAWA H, (2007), "Procesos de Manufactura", Ed. McGraw-Hill, Primera edición, México, Pág. 473

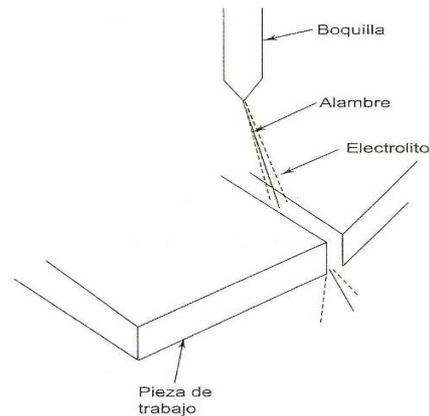


Figura 1.12 Esquema del proceso de corte con alambre electroquímico

1.2.4.2. Corte con chorro de agua (WJC)²²

El corte con chorro de agua (WJC, por sus siglas en inglés) usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte, como se ilustra en la figura 1.13. Para obtener un chorro fino de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla de un diámetro de 0.1 a 0.4 mm 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. Los fluidos de corte en el WJC son soluciones de polímeros, las cuales se prefieren debido a que tienden a producir una corriente consistente.

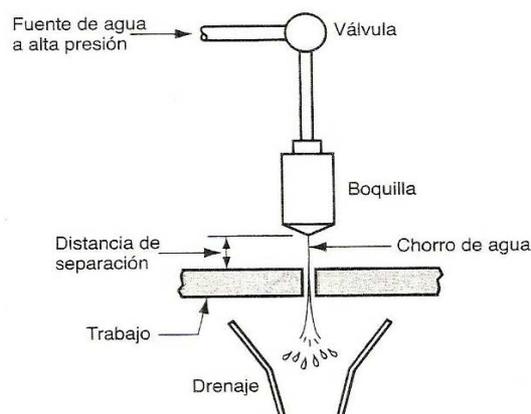


Figura 1.13 Esquema del proceso de corte con chorro de agua

²² GROOVER M, (1997), "Fundamentos de Manufactura Moderna", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México, Pág. 621.

El corte con chorro de agua se usa en forma eficaz para obtener tiras de materia plana, como plásticos, textiles, materiales compuestos, mosaicos para pisos, alfombras, piel y cartulinas. En estas aplicaciones, la ventaja del WJC incluyen que la superficie de trabajo no se deforma ni se quema como en otros procesos mecánicos o térmicos, en consecuencia, la pérdida de material es mínima porque el ancho de corte es estrecho. Una limitación del WJC es que no es conveniente para cortar materiales frágiles (por ejemplo vidrio), porque tiende a resquebrajarse durante el proceso. Tiene un alto costo de adquisición del equipo y de su mantenimiento.

1.2.4.3. Corte con chorro de agua abrasiva (AWJC)²³

Cuando se usa un WJC sobre piezas metálicas, por lo general deben agregarse partículas abrasivas al chorro de agua para facilitar el corte. Por tanto, este proceso se denomina corte con chorro de agua abrasiva (en inglés AWJC). Entre los parámetros de proceso adicionales están el tipo de abrasivo, el tamaño del grano y la proporción de abrasivo en el flujo. 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 aproximadamente 0.25 kg/min (0.5 lb/min) después de que salen de la boquilla para el WJC.

²³ GROOVER M, (1997), "*Fundamentos de Manufactura Moderna*", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México, Pág. 622

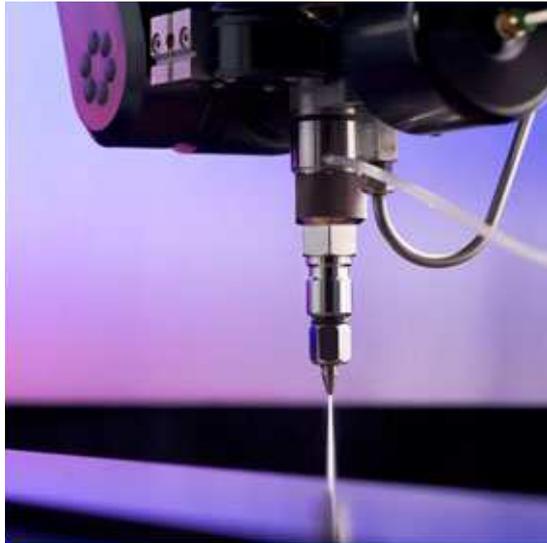


Figura 1.14 Proceso de corte con chorro de agua abrasiva²⁴

En esta técnica, las ventajas del AWJC es que puede cortar cualquier material con amplio rango de espesores, ancho de corte reducido (0.5 – 1 mm), proceso limpio sin gases, corta formas y geometrías de gran detalle, pero es más lento que el corte oxiacetilénico o el corte por plasma, costo elevado del abrasivo, generación de ruido, e inversión inicial elevada.

²⁴ http://www.taringa.net/posts/info/1288164/Cortar-metales-con-agua_-Increible_.html

CAPITULO 2

PROCESOS DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICO CON CONTROL NÚMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).

2.1. PROCESO DE CORTE POR PLASMA (PAC)

2.1.1. DESCRIPCIÓN²⁵

El término arco de plasma se define como gas calentado parcialmente, hasta una condición ionizada, que permite que conduzca una corriente eléctrica.²⁶

El corte por arco de plasma (PAC por sus siglas en inglés), usa un flujo de plasma que opera a altas temperaturas situadas en el rango de 10000 a 14000 °C (18000 a 25000 °F), para cortar metal por fusión como se muestra en la figura 2.1.

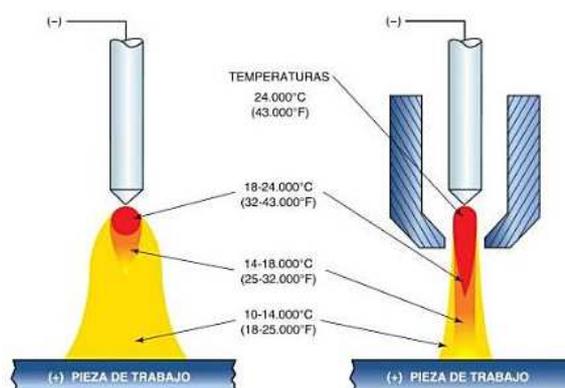


Figura 2.1 Temperaturas en el arco de plasma²⁷

En la acción de corte se dirige el flujo de plasma a alta velocidad hacia la pieza de trabajo; esta misma acción funde e impulsa el metal fundido por la ranura. El

²⁵ GROOVER M, (1997), "Fundamentos de Manufactura Moderna", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México. Pág. 698.

²⁶ ANSI/AWS A3.0-89 AN AMERICAN NATIONAL STANDARD, "Standard Welding Terms and Definitions".

²⁷ JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 179

arco de plasma se genera entre un electrodo (cátodo) dentro de la antorcha y la pieza de trabajo (ánodo). El plasma fluye a través de una boquilla, que controla y dirige el flujo a la posición deseada del trabajo. El chorro de plasma resultante es un flujo de alta velocidad bien alineado con temperaturas extremadamente altas en su centro, y con el calor suficiente para cortar a través de un metal.

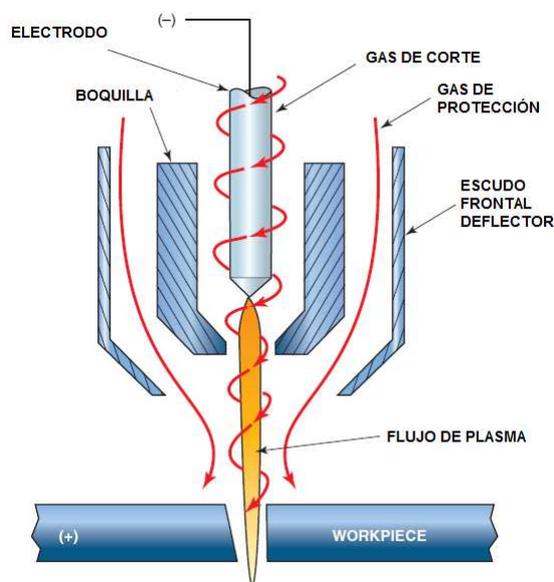


Figura 2.2 Terminología del proceso PAC²⁸

Los gases usados para crear el plasma en el PAC incluyen el aire, el nitrógeno, el argón, el hidrógeno o una mezcla de estos. 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 enfriar los componentes, confinar el arco y limpiar la ranura de metal que se forma. Como se muestra en la Figura 2.2

La mayoría de las aplicaciones del PAC implican el corte de láminas de metal. Las operaciones incluyen el biselado y el corte a lo largo de una trayectoria definida. La trayectoria definida se corta ya sea mediante un soplete manual controlado por una persona o dirigiendo la trayectoria de una antorcha mediante control numérico computarizado (CNC). Para una producción más rápida y una mayor precisión se prefiere el CNC, debido a que se supervisan

²⁸ http://webtools.delmarlearning.com/sample_chapters/Ch08_rev_CP.pdf

mejor las variables más importantes del proceso, como la distancia de separación de la antorcha a la pieza de trabajo y la velocidad de avance.

El corte con arco de plasma se usa para cortar casi cualquier metal eléctricamente conductor. Con frecuencia los metales cortados mediante PAC incluyen aceros al carbono, el acero inoxidable y el aluminio. En estas aplicaciones, la ventaja del corte con arco de plasma con CNC es la alta productividad. Las velocidades de alimentación a lo largo de la trayectoria de corte pueden ser tan altas como 12000 mm/min para una placa de aluminio de 6 mm y de 5100 mm/min para una placa de acero de 6 mm. Para materiales más gruesos, las velocidades de avance deben reducirse.

2.1.1.1. Clasificación²⁹

Hay distintas clasificaciones del corte por plasma dependiendo de la aplicación y del gas a utilizar de la siguiente manera:

2.1.1.1.1. Por aplicación

- **Convencional.** Solo cuenta con un gas, el que efectúa el corte. Se trata de una aplicación bastante limitada, se emplea para corte de planchas metálicas de hasta 25 mm de espesor.
- **Dual.** Utiliza dos gases uno de corte y otro de protección contra la atmósfera. Permite elevados valores de productividad y calidad. Aumenta la velocidad de corte en un 10 – 15% con respecto al convencional.
- **Con agua.** En vez de utilizar el gas protector en la parte exterior de la boquilla, se utiliza agua inyectada a presión lo cual favorece la refrigeración de la boquilla que es el consumible de la antorcha que más sufre durante el proceso debido a que es donde se producen las mayores temperaturas. Además el agua consigue mantener limpia la zona, aumentando la calidad y velocidad de corte al disminuir la temperatura del proceso.

²⁹ <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12114-Corte-de-chapa-por-plasma.html>

- **Arco sumergido.** Es necesario destacar la posibilidad de que el corte por arco de plasma sea bajo agua, lo cual es un medio de disminuir los ruidos, los humos y eliminar la radiación ultravioleta generada por el proceso, aparte de la posibilidad de disminuir las distorsiones del corte por la refrigeración que le aporta el agua a la pieza de trabajo.

2.1.1.1.2. Por proceso de corte/gas de corte

- **Aire.** Acero al carbono, acero inoxidable, aluminio.
- **Oxígeno.** Acero al carbono, cobre.
- **Nitrógeno.** Acero al carbono, acero inoxidable, aluminio.
- **H35 (Argón 65% + H₂ 35%).** Acero inoxidable, aluminio, cobre.

Hay que destacar que la elección del gas de corte es de vital importancia en lo que se refiere a resultados y aplicaciones que se esperan obtener de la pieza cortada.

También dentro de este proceso hay que hablar del plasma de alta definición como un proceso diferenciado por sus buenas prestaciones y niveles de calidad.

2.1.1.1.3. Alta definición

Se trata de una evolución del plasma convencional con el que se consiguen calidades de corte comparables con el láser.

Este proceso compite con el láser para el corte de espesores reducidos (por debajo de los 12 mm), tanto en la calidad como en la velocidad de corte.

2.1.1.2. Aspectos metalúrgicos³⁰

Durante el proceso PAC, el material en la superficie del corte se calienta hasta su temperatura de fusión y sale despedido por la fuerza del flujo de plasma. Esto produce una zona térmicamente afectada a lo largo de la superficie cortada. El calor no sólo altera la estructura del metal en esta zona, sino que también introduce esfuerzos de tensión internos a causa de la rápida expansión, alteración y contracción del metal en la superficie cortada.

La profundidad a la que el calor del arco penetra a la pieza de trabajo es inversamente proporcional a la velocidad de corte. Debido a las elevadas velocidades de corte en acero inoxidable, la pieza de trabajo pasa por la temperatura crítica de 650°C [1200°F] con gran rapidez. Por esto, prácticamente no hay oportunidad de que se precipite carburo de cromo a lo largo de las fronteras de los granos, con lo que se conserva la resistencia a la corrosión, en aceros inoxidables del tipo 304, la permeabilidad magnética no resulta afectada.

La conductividad del material a cortar tiene gran influencia en la afectación térmica, es decir, a mayor conductividad térmica la zona afectada por el calor es mayor.

2.1.1.3. Residuos

Los residuos son los compuestos de metal que se vuelven a solidificar y se unen a la parte inferior de un corte. Estos compuestos de metal están formados principalmente de metal no oxidado, óxidos y nitruros de metal, es posible hacer cortes libres de residuos, si el equipo de corte por plasma está en buenas condiciones y el metal no es de demasiado espesor para el tamaño de los consumibles que se vaya a utilizar. El espesor con el que se puede hacer un corte libre de residuos depende entre otras cosas de los gases utilizados, la velocidad de avance, la distancia de la antorcha a la pieza de trabajo, el diámetro del orificio de la punta de la boquilla, la condición de desgaste del electrodo y de la boquilla, el caudal y la presión del gas.

³⁰ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México

2.1.2. EQUIPO³¹

2.1.2.1. Antorcha

El proceso de corte por plasma emplea un soplete de mano o una antorcha montada mecánicamente. Las antorchas mecanizadas pueden montarse en una máquina de corte controlada por computadora. Por lo regular, se mantiene una separación entre la punta de la antorcha y la pieza de trabajo para obtener cortes de calidad óptima. La distancia de separación debe mantenerse dentro de tolerancias bastante estrechas para lograr resultados uniformes. Algunas antorchas mecanizadas están equipadas con un dispositivo de control automático de la separación para mantener una distancia fija entre la antorcha y la pieza de trabajo.

Los sopletes de PAC trabajan a temperaturas extremadamente altas, y a muchas de sus partes se les conoce como consumibles los cuales son: anillo distribuidor, electrodo, boquilla, capuchón de retención y escudo frontal deflector, que son los más vulnerables al desgaste durante el corte, y el rendimiento casi siempre se deteriora conforme se van desgastando. El remplazo oportuno de los consumibles es indispensable para obtener cortes de buena calidad.

2.1.2.2. Generador de plasma

El PAC requiere una fuente de potencia de corriente continua, de relativamente alto voltaje, con una característica volt-ampere de corriente constante o de caída. Las fuentes de potencia para corte por plasma ofrecen controles de fase electrónicos y diversos tipos de fuentes de potencia de “modo conmutado”, las que emplean semiconductores de alta velocidad y alta corriente para controlar la salida. Pueden regular la salida de una fuente de potencia estándar de CC o bien incorporarse en una fuente de potencia tipo inversor. Las fuentes de modo conmutado tienen la ventaja de ser más eficientes y menos voluminosas.

³¹ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) “Manual de Soldadura 2”, Ed. PRENTICE, Octava edición, México

2.1.2.3. Controles de corte

En el corte mecanizado, el encendido y el apagado del arco de corte pueden efectuarse manualmente con un botón pulsador o automáticamente mediante controles de movimiento del sistema. Los controles de corte pueden hacer que la operación completa de corte siga una secuencia que incluya variaciones de flujo de gas, y en el nivel de potencia si es necesario.

Los sistemas de PAC normalmente incluyen varias trabas automáticas, si la antorcha se opera sin un suministro adecuado de gas, puede dañarse por la formación de arcos internos, por esta razón, el circuito casi siempre incluye un interruptor de presión de gas.

Las antorchas de alta corriente están enfriadas por líquido, y en este caso el sistema de refrigeración cuenta con una traba adicional que impide la operación de la antorcha cuando no hay flujo de refrigerante, y que desconecta la fuente de potencia para evitar daños si el flujo de refrigerante se interrumpe durante la operación.

2.1.2.4. Corte por control numérico

Las grandes máquinas controladas por ordenador, han sido confeccionadas para sistemas de corte por arco de plasma. Tienen una alta velocidad de avance, requerida para producir cortes de buena calidad y obtienen un alto volumen de producción. Con estas máquinas, el operador puede introducir instrucciones de corte específicas, como la velocidad, amperaje, flujo de gas, posición y forma de la pieza que se va a cortar, y la máquina hará el corte con un grado de precisión alto.

2.1.3. CALIDAD DE CORTE POR ARCO DE PLASMA

2.1.3.1. Introducción

La tecnología de mecanizado basada en el efecto térmico del plasma tiene un lugar importante en el campo de las tecnologías no convencionales. Como en el caso de otros métodos de mecanizado, en el corte por arco de plasma se espera tener buenos resultados, para esto, es muy importante conocer bien el proceso, esto significa identificar y entender exactamente cuales son los parámetros que intervienen y su influencia en el proceso de corte.

Con este objetivo se emplea el método de enfoque sistémico, el cual consiste en el hecho de que podamos obtener un estudio general del proceso, lo que significa que todos los elementos que lo componen están siendo tomados en consideración, analizando la relación de los mismos en el sistema de corte por arco de plasma.

El primer pasó en la aplicación del método es establecer los parámetros de entrada, los parámetros de salida que pueden influir en el proceso. La investigación se refiere a esta etapa como la descripción paramétrica del proceso, es el nivel inicial de esta investigación.

Parámetros de entrada.- Son aquellos que pueden ser controlados, lo que significa que sus valores son conocidos desde el inicio, por ejemplo, el tipo de material a cortar, su espesor, o son los valores establecidos por el operador en función de algunos factores que deben ser considerados en el proceso de corte, con el fin de obtener el resultado de calidad esperado.

Parámetros de salida.- Se refiere a la calidad de corte obtenida, a la productividad del proceso, a los costos de producción.

Los cortes efectuados con arco de plasma deben ser buenos de manera tal que se pueda dar inicio en el proceso productivo, inmediatamente a la labor de soldadura, sin ningún trabajo extra.

Para determinar la calidad de un buen corte existen tres parámetros de salida, el ángulo de bisel, el nivel de escoria y la apariencia del corte. Por eso se establecen dos criterios técnicos para controlarlos: el medible, que incluye medir el ángulo de bisel y la inspección visual en la que se observa la superficie cortada y se describe su apariencia, teniendo en cuenta la formación de escoria, asperezas.

La calidad de corte depende en gran medida del ajuste de los parámetros de entrada, tales como la distancia de la antorcha a la pieza de trabajo, la velocidad de corte, el amperaje, la presión de gas, la alineación de la antorcha con la pieza.

2.1.3.2. Enfoque Sistémico del Proceso – Análisis de las Condiciones del Corte por Arco de Plasma

Al utilizar el método de enfoque sistémico, se identifican los parámetros de entrada y salida que intervienen en el proceso, ver la figura 2.3.

La figura tiene por objeto hacer hincapié en los parámetros que intervienen en el proceso de corte.

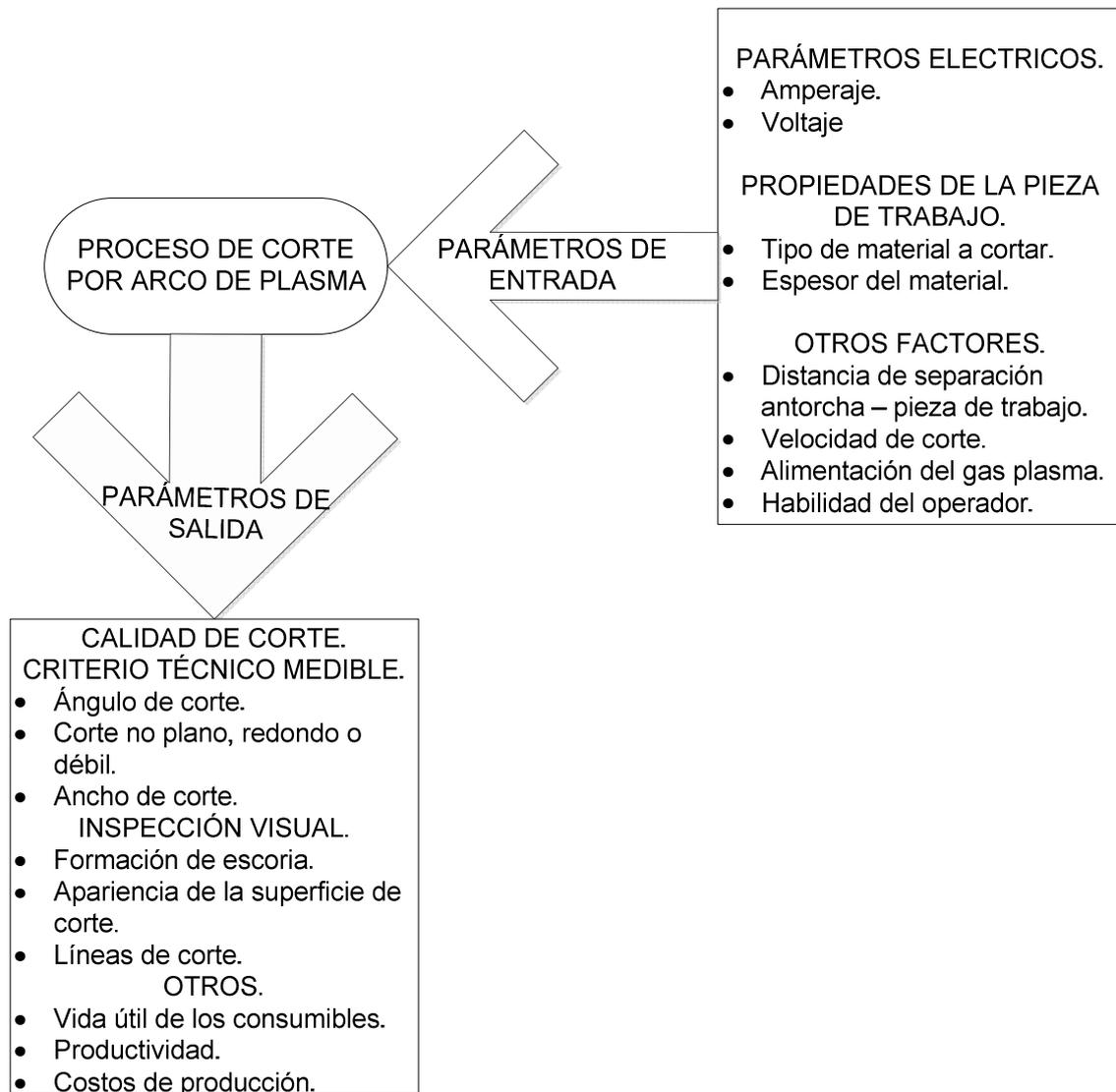


Figura 2.3 Enfoque sistémico del proceso de corte por plasma

2.1.3.3. Parámetros de Entrada

Normalmente, los parámetros de entrada bien manejados permitirán una buena calidad de corte, aunque los problemas pueden variar lo suficiente como para que se necesiten algunos ligeros ajustes.

2.1.3.3.1. Distancia de separación antorcha – pieza de trabajo³²

Es la distancia desde la punta de la antorcha a la pieza de trabajo, Figura 2.4. Esta distancia es muy crítica para producir cortes de calidad. Mientras la distancia aumenta, la fuerza del arco disminuye y tiende a extenderse, esto ocasiona que el ancho de corte sea grande, el borde superior de la placa llegue a ser redondo y se forme más residuo en el borde inferior de la placa.

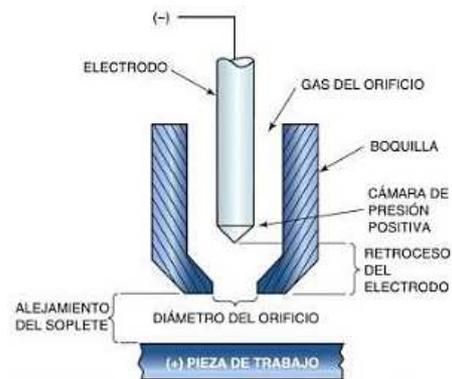


Figura 2.4 Terminología del arco de plasma convencional³³

Sin embargo, si esta distancia se hace demasiado corta, se reducirá la vida útil de la punta de la boquilla, en algunos casos se puede formar un arco entre la punta de la boquilla y el metal, lo que instantáneamente destruye la punta.

La apropiada altura de la antorcha – pieza de trabajo juega un papel integral en la obtención de cortes de buena calidad, la separación afecta de forma significativa el ángulo de bisel, debido a que en el proceso de corte por plasma se distingue, en que la altura de la antorcha por encima de la pieza de trabajo es proporcional a la tensión de arco de corte.

Si la velocidad de corte y amperaje son correctos, y la pieza tiene un excesivo ángulo positivo de corte, la separación es demasiado alta. Al disminuir la distancia de separación y observando la perpendicularidad de corte, tenemos la distancia de la antorcha a la pieza de trabajo idónea. La altura de la antorcha

³² http://www.windhavencommunications.com/pdfs/Technical_Articles/ESAB%20Plasma%20Cutting%20Tech.pdf

³³ JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 186

correcta es justo en el punto en que la pieza empieza a desarrollar un ángulo negativo de corte.

Una vez que se tiene la altura de la antorcha apropiada, los efectos de los cambios en otras variables se pueden ver. Una velocidad de corte más rápida producirá un ángulo positivo de corte, una velocidad de corte demasiado lenta dará como resultado un ángulo negativo de corte. Demasiada alta o demasiado baja la corriente de corte, en ambos casos se producirá un ángulo positivo de corte.

La perpendicularidad del corte es el resultado directo de tres variables: 1) Tensión de arco, 2) Velocidad de corte, 3) Amperaje de corte.

2.1.3.3.2. Velocidad de corte

Se define a la velocidad con que la antorcha se mueve respecto a la pieza de trabajo, y su valor depende del tipo de material, espesor, amperaje, tipo de consumibles. Representa uno de los parámetros más importantes en el proceso de corte por arco de plasma debido al hecho de que tiene una influencia directa en la productividad del proceso y en la calidad de las superficies obtenidas.

Las tablas de corte proporcionadas por el fabricante del generador de plasma especifican la velocidad recomendada de corte que producirá un mejor ángulo de bisel, mínima escoria y el mejor acabado de la superficie, sin embargo estas tablas tienen el propósito de proporcionar un buen punto donde comenzar para cada requerimiento de corte debido a que todo sistema de corte requiere después afinarse para obtener la calidad de corte deseada.

Las velocidades de corte producen líneas visibles en la superficie de la pieza de trabajo cortada, conocidas como líneas de corte. El uso de estas líneas es una excelente manera de determinar la velocidad de corte adecuada.

- **Lectura de las líneas de corte**
 - **Acero al carbono.** Las velocidades de corte óptimas producen líneas inclinadas hacia atrás de aproximadamente de 15° cuando se utilizan procesos que emplean aire u oxígeno como gas de plasma. Ver figura 2.5

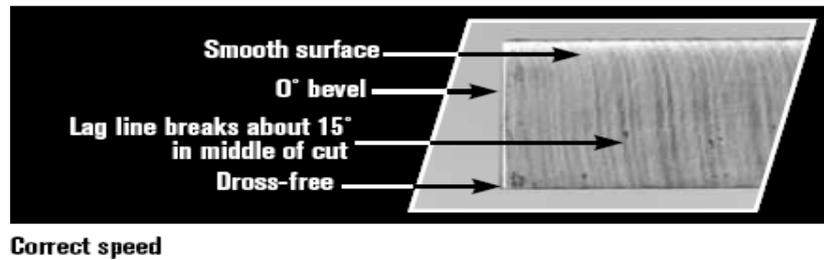


Figura 2.5 Líneas de corte para una velocidad correcta³⁴

Una velocidad de corte baja puede mostrar líneas de corte con un ángulo menor a 15° . Ver figura 2.6

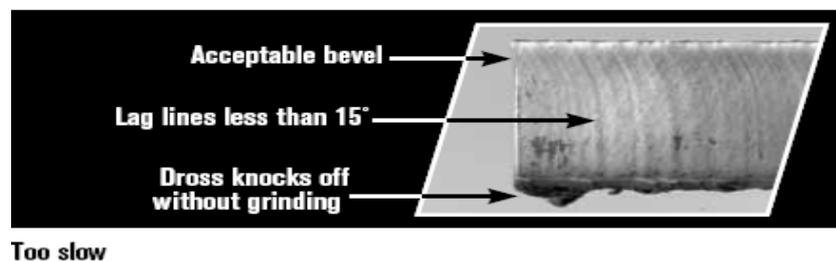


Figura 2.6 Líneas de corte para una velocidad baja

Mientras que una velocidad de corte alta mostrará líneas de arco con un ángulo más agudo mayor a 15° en relación a la parte superior de la placa. Ver figura 2.7

³⁴ <http://www.secmachines.com/downloads/autocut-1500/6.%20Plasma%20Machine%20Selection%20Guide.pdf>

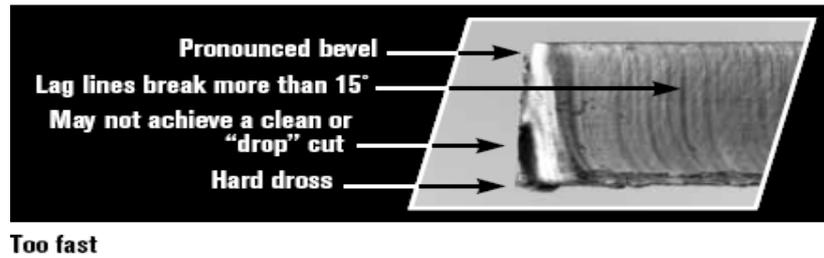


Figura 2.7 Líneas de corte para una velocidad alta

- **Acero inoxidable.** La velocidad de corte correcta, se caracteriza por una superficie de corte lisa y sin escoria. Ver figura 2.8

Cut Speed Correct



Figura 2.8 Velocidad de corte correcta³⁵

Una velocidad de corte baja se manifiesta por la decoloración de la superficie debido al calor que se concentra en la mitad de borde inferior del corte, existe la formación de escoria la cual es difícil de eliminar. Ver figura 2.9

Cut Speed Too Slow

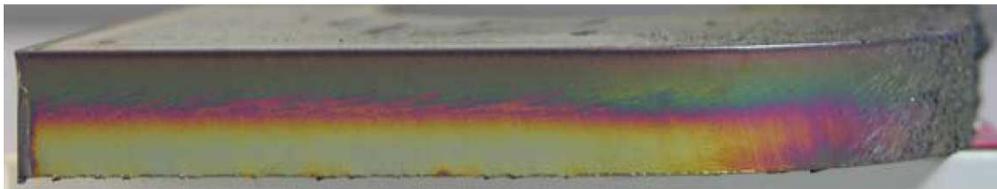


Figura 2.9 Velocidad de corte baja

Mientras que una velocidad de corte alta presenta decoloración por el calor presente tanto en el borde superior como en el inferior, además las

³⁵ <http://thermadyne.com/thermaldynamicsautomation/documents/63-2823%20Operator's%20Ready%20Reference.pdf>

líneas de corte muestran un ángulo mayor a 15° con formación de escoria de alta velocidad, difícil de remover. Ver figura 2.10

Cut Speed Too Fast

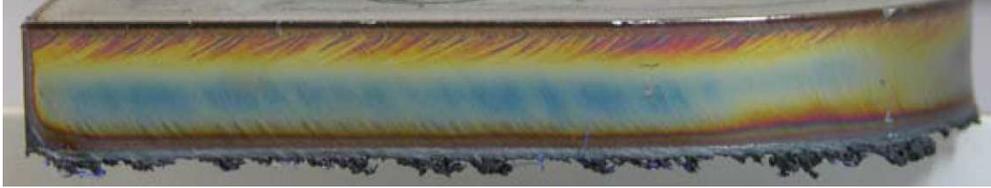


Figura 2.10 Velocidad de corte alta

Cualquier sistema de plasma se puede cortar a mayor o menor velocidad, pero esto afectará el rendimiento de corte y por ende su calidad. Si fuese así, se realiza ajustes de incremento o reducción en 130 mm/min al realizar las correcciones hasta que el estado mejore.

2.1.3.3.3. Voltaje

El voltaje para el proceso de arco de plasma va desde 50 a 200 voltios en circuito cerrado y desde 150 a 400 voltios en circuito abierto. Se requiere este potencial eléctrico, más alto porque la resistencia del gas aumenta al introducirlo a través de un orificio pequeño. El voltaje potencial de alimentación suministrado debe ser lo suficientemente alto como para superar la resistencia del circuito, a fin de que los electrones fluyan.

2.1.3.3.4. Amperaje de corte

Aunque el voltaje sea más alto, el amperaje es mucho más bajo en éste que en los diversos procesos de soldadura. Las máquinas de corte por arco de plasma pueden tener amperajes de hasta 200 amperios, y algunas máquinas de corte automatizadas muy grandes pueden tener capacidades de 1000 amperios. Cuanto más alto sea el amperaje, más rápido y más espesor se podrá cortar en el proceso.

La mejor calidad de corte y vida útil de los consumibles generalmente se consigue cuando el amperaje está fijado a la capacidad de los consumibles, y la selección de estos dos parámetros dependen del material y del espesor que

está cortándose. Como existe una relación inversamente proporcional entre amperaje y la velocidad de corte, se recomienda: No usar amperajes bajos porque la velocidad de corte será menor y los niveles de formación de escoria serán mayores teniendo un corte de mala calidad. En cambio el usar más amperaje del que sea necesario produce un leve redondeo a lo largo del borde superior de la superficie de corte de la pieza de trabajo, además se obliga a ajustar la velocidad para minimizar la acumulación de escoria y la vida útil de los consumibles será mucho menor. Es por esta razón que es importante hacer funcionar los consumibles al amperaje correcto y utilizar los consumibles apropiados.

Existe una relación entre el amperaje, el ancho de corte y la velocidad la cual se ilustra en la figura 2.11.

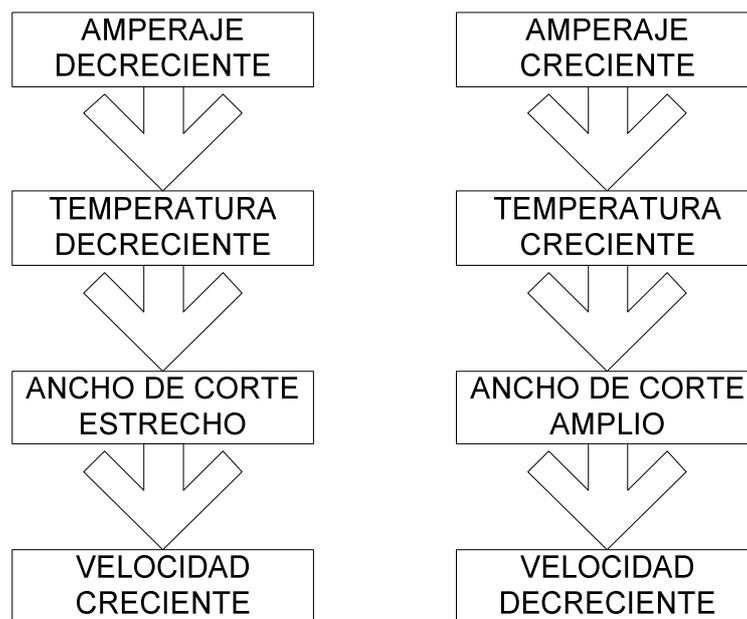


Figura 2.11 Relación del amperaje y la velocidad de corte

2.1.3.3.5. Presión y caudal de aire comprimido.

El aire presurizado sirve para dos propósitos en el corte por plasma. El objetivo principal es el suministro de gas para alimentar la reacción del plasma, y el secundario es para expulsar material fundido. La presión y el caudal de aire comprimido se determina como variables que afectan a la calidad, debido a que si la alimentación del gas al generador de plasma no es buena, la velocidad de

corte disminuirá, la calidad de corte se deteriorará, disminuirá la capacidad de cortar el espesor necesario y se acortará la vida útil de los consumibles.

2.1.3.4. Parámetros de Salida³⁶

Los requisitos para un corte de buena calidad difieren según la aplicación. Por ejemplo, la formación de escoria y el ángulo de bisel pueden constituirse en factores importantes si la superficie será soldada luego del corte. La ausencia de escorias en el corte es importante cuando se desea una calidad de acabado del corte que evite una operación secundaria de limpieza.

Las causas que afectan a la calidad de corte son interdependientes. Si se cambia una variable, el resto de variables también se ven afectadas. Determinar una solución puede resultar difícil. Para empezar, se selecciona el problema más prominente:

- Angulo de corte, negativo o positivo.
- Escoria.
- Corte no plano, redondo o débil.
- Aspereza de la superficie.

2.1.3.4.1. Ángulo de corte

Es el ángulo entre la superficie del borde del corte y un plano perpendicular a la superficie de la pieza. Un corte perfectamente perpendicular resultara en un ángulo de bisel de 0°.

En el plasma convencional un corte de calidad se caracteriza por un ángulo de bisel entre 4° y 8°, como se muestra en la Figura 2.12, por lo cual se requiere la distancia adecuada de la antorcha a la pieza de trabajo para producir un ángulo de biselado mínimo.

³⁶ <http://ebookbrowse.com/pt-24-precision-plasmarc-system-iefc-s-ce-f-15-771-spanish-jun05-pdf-d373109606>

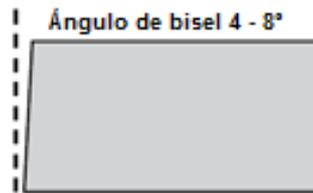


Figura 2.12 Ángulo de bisel normal en el plasma convencional³⁷

- **Ángulo negativo de corte.** Se caracteriza porque la dimensión superior de la pieza es ligeramente mayor que la dimensión inferior, ver figura 2.13 y se debe a los siguientes factores:
 - Distancia antorcha - pieza es demasiada baja.
 - Velocidad de corte baja.
 - Antorcha mal alineada.
 - Consumibles desgastados o dañados.
 - Material doblado o combado.

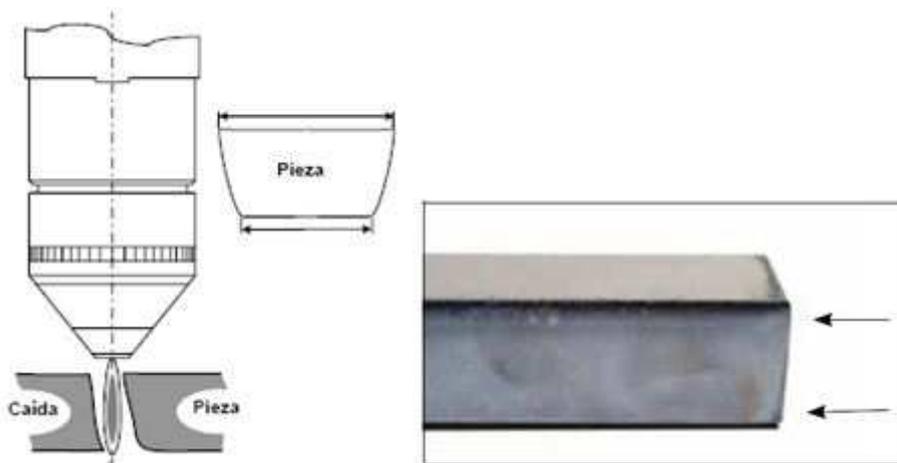


Figura 2.13 Ángulo negativo de corte³⁸

- **Ángulo positivo de corte.** La dimensión superior de la pieza es ligeramente menor que la dimensión inferior, Ver figura 2.14 este defecto se da por:
 - Distancia de separación de la antorcha – pieza es demasiado alta.
 - Velocidad de corte alta.

³⁷ https://boc.com.au/boc_sp/au/downloads/gas_brochures/BOC_217076_FactsAboutPlasmaTechnology_FA%20low%20res.pdf

³⁸ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

- Antorcha mal alineada.
- Consumibles desgastados o dañados.
- Amperaje bajo o alto (Consulte la hoja de datos de proceso para los niveles de corriente recomendados y sus respectivos consumibles).
- Material doblado o combado.

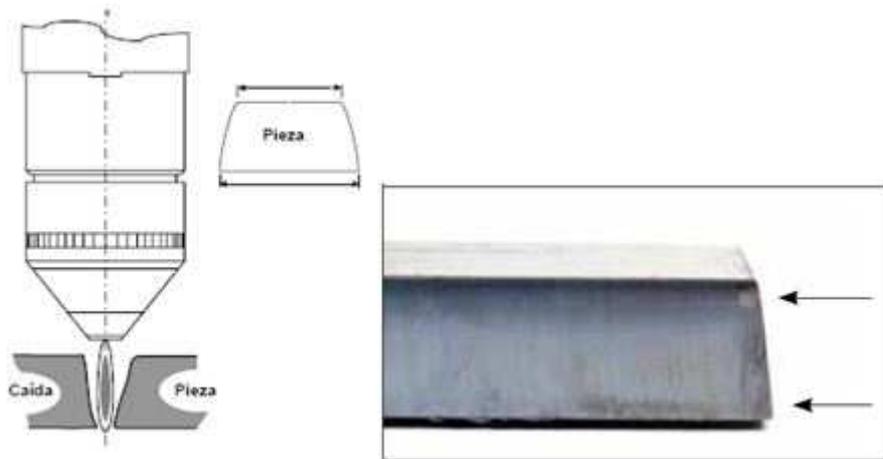


Figura 2.14 Ángulo positivo de corte³⁹

2.1.3.4.2. Parte superior e inferior redondeadas

Se produce un leve redondeo a lo largo del borde superior de la superficie de corte. Ver figura 2.15 Este problema se suele dar cuando el material tiene un espesor de 6 mm o inferior, y es debido a un amperaje alto para un espesor específico de material.

³⁹ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

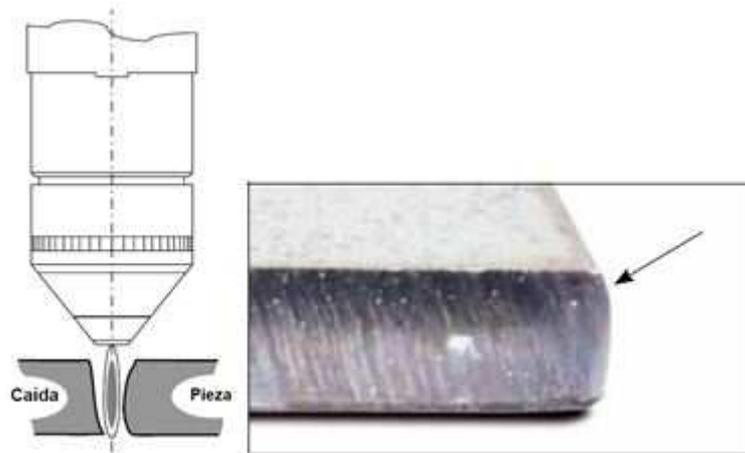


Figura 2.15 Parte superior e inferior redondeados

2.1.3.4.3. Ancho de corte

Es el espacio dejado en el metal mientras se elimina mediante un corte, la anchura de una cortadura del proceso de corte por arco de plasma es, a menudo, mayor que la de un corte oxiacetilénico. Varios factores afectan al ancho de la cortadura. Algunos de ellos son los siguientes:

- Distancia de alejamiento. Cuando más cerca esté la punta de la boquilla del antorcha, más estrecha será la cortadura.
- Distancia del orificio. Mantener el diámetro del orificio de la boquilla tan pequeño como sea posible, mantendrá la cortadura más pequeña.
- Asignación de potencia. La asignación de potencia demasiado alta o baja causará un aumento en el ancho de la cortadura.
- Velocidad de corte. Mientras la velocidad de corte aumenta, el ancho de la corte disminuye, sin embargo, si las velocidades son excesivas el biselado de los lados y la formación de residuos aumentará.
- Gas. El tipo de gas o mezcla de gases afectará al ancho de la corte porque el cambio de gas afecta a la velocidad de avance, la potencia, la concentración del flujo de plasma y a otros factores.
- Punta del electrodo y de la boquilla. Cuando estas partes empiezan a desgastarse por el uso o daños, la calidad del corte por arco de plasma y el ancho de corte se verán afectados desfavorablemente.

2.1.3.4.4. Formación de escoria⁴⁰

Escoria es un subproducto del proceso de corte que se acumula en la parte inferior de la pieza de trabajo a medida que se realiza el corte, es el material no deseable que permanece en la pieza. La escoria se produce cuando el procedimiento de operación y la técnica no son los óptimos. Se requiere práctica y experiencia para obtener cortes sin escoria, aunque siempre se producirá alguna cantidad de escoria al cortar plasma con aire comprimido. Los dos principales parámetros de entrada que influyen en la formación de escoria son el amperaje utilizado para el corte y la velocidad de la antorcha a través de la pieza de trabajo. Generalmente como existe una relación inversamente proporcional entre amperaje y la velocidad de corte, se recomienda no usar más amperaje del que sea necesario y ajustar la velocidad de corte para minimizar la acumulación de escoria. En algunos materiales y espesores, es imposible conseguir cortes sin escoria. Es mucho más probable la formación de escoria en el metal caliente que en el frío. Por ejemplo, el primer corte de una serie generalmente produce la menor cantidad de escoria, a medida que la pieza a cortar se calienta, puede acumularse más escoria en los siguientes cortes.

- **Escoria por alta velocidad.** Generalmente forma un pequeño cordón lineal de material fundido que se adhiere y se endurece a lo largo del borde inferior del corte, es muy tenaz, difícil de quitar por lo general requiere esmerilado, no un simple raspado. Ver figura 2.16. Se presentan con líneas de corte curvas en forma de S. Son causadas por:
 - Velocidad de corte alta
 - Amperaje alto.
 - Consumibles desgastados o dañados.
 - Presión de gas inadecuado.

⁴⁰ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

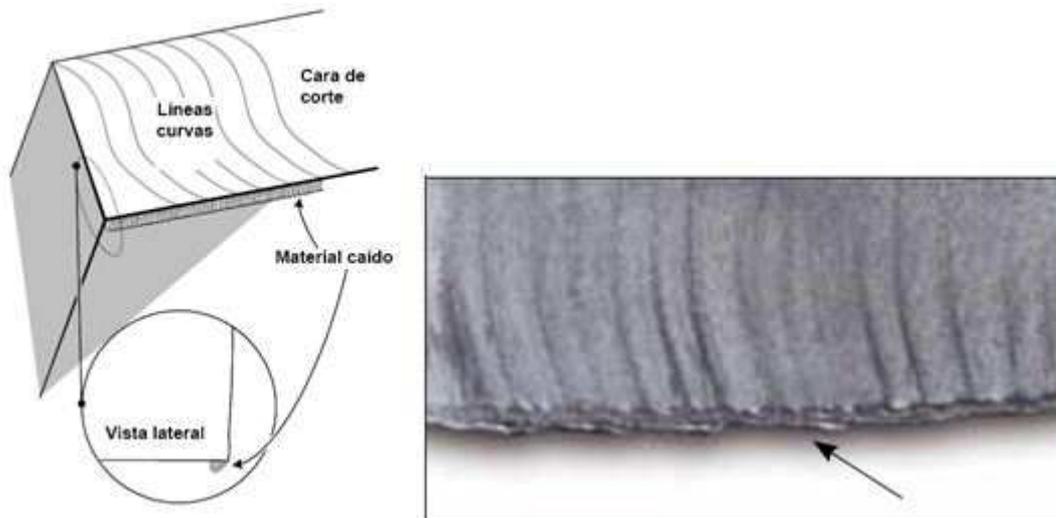


Figura 2.16 Escoria por alta velocidad⁴¹

- **Escoria por baja velocidad.** Una acumulación globosa o globular de material fundido se adhiere y se endurece a lo largo del borde inferior del corte. La escoria puede variar desde un reborde suave a uno pesado, pero no se adhiere muy ajustado al borde y se puede quitar fácilmente. Se pueden presentar líneas de corte verticales. Se presenta básicamente por una velocidad de corte baja. Ver figura 2.17
Al cortar un acero de alta aleación con PAC, es útil a veces reducir la velocidad de corte para producir escoria de baja velocidad, debido a que cualquier limpieza que resulte se puede lograr raspando no esmerilando.

⁴¹ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

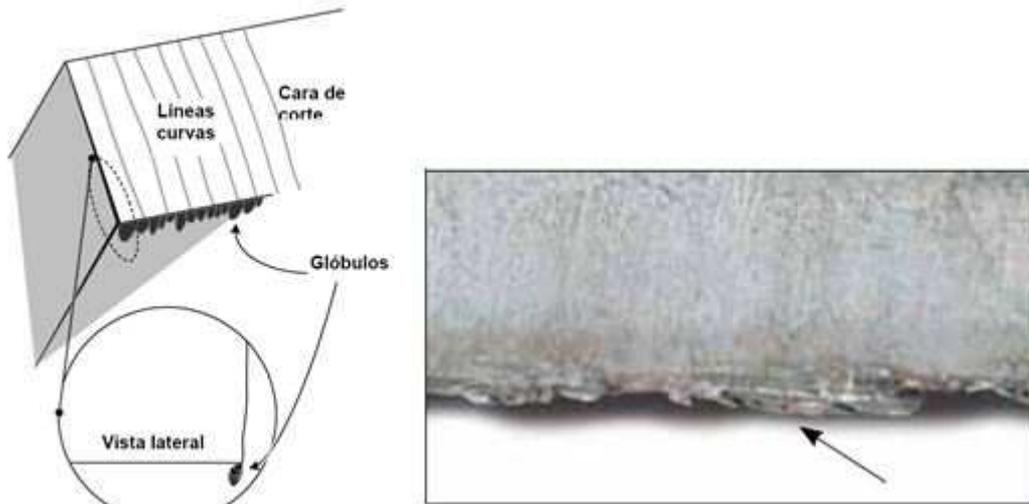


Figura 2.17 Escoria por baja velocidad⁴²

- **Escoria superior.** Se presenta en la parte superior de la pieza y aparece como salpicaduras, ver figura 2.18, por lo general, no es de mucha importancia y se produce más comúnmente en el plasma de aire comprimido, normalmente se elimina sin dificultad. Es a causa de:
 - Velocidad de corte alta.
 - Distancia de separación de la antorcha – pieza es demasiado alta.

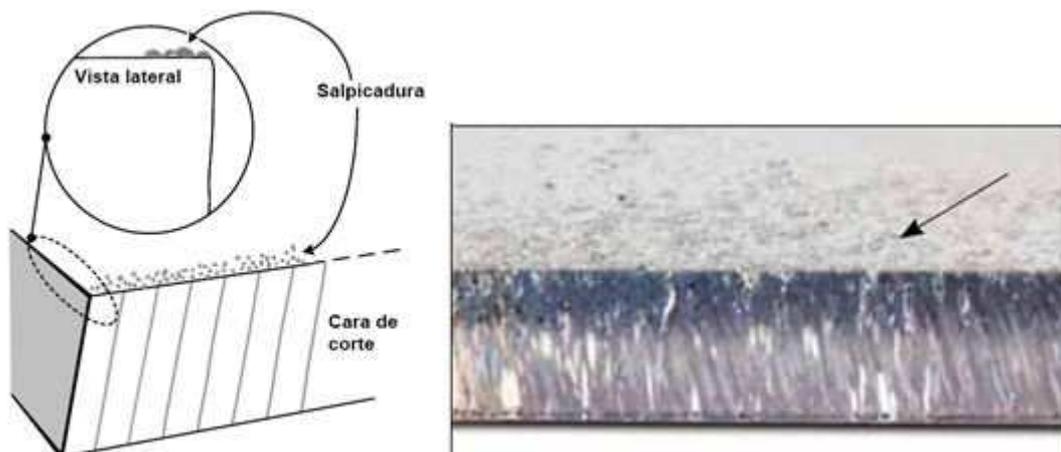


Figura 2.18 Escoria superior⁴³

⁴² <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

⁴³ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

- **Escoria intermitente.** Aparece en la parte superior o inferior, a lo largo del corte. No continuo. Puede aparecer en cualquier forma de escoria. Son resultado de consumibles posiblemente desgastados o dañados.

Otros factores que afectan a la formación de escoria son:

- Temperatura del material.
- Presencia de incrustaciones u óxidos.
- Aleaciones altas en carbono.
- Fuente de gas contaminada.

2.1.3.4.5. Apariencia de la superficie

Según el tipo de material que se corte, es probable que se observe aspereza, esta describe la textura de la cara del corte dando como resultado un corte no liso. Ver figura 2.19

- **Aspereza provocada por el proceso.** La cara del corte es consistentemente áspera. Son provocadas por:
 - Mezcla de gas de protección incorrecta.
 - Consumibles desgastados y dañados.
- **Aspereza provocada por la máquina.** Puede ser difícil de distinguir la aspereza provocada por el proceso. La aspereza no es consistente. Es resultado de:
 - Guías, rodamientos, cremalleras y engranaje de salida de avance sucio.

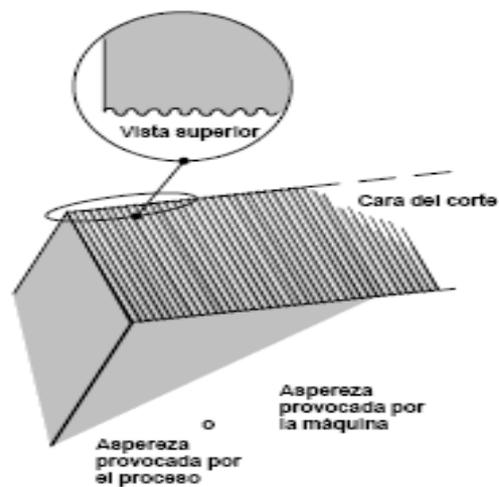


Figura 2.19 Asperezas de la superficie.

- **Color.** Es el resultado de una reacción química entre un metal y el gas plasma que se usa para cortarlo; los cambios de color son previsible, este varía mayormente con el acero inoxidable.



Figura 2.20 Color en la superficie⁴⁴

⁴⁴ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

2.1.3.5. Claves para mejorar la calidad de corte⁴⁵

En la siguiente guía de referencia, se ofrecen varias soluciones para mejorar la calidad de corte.

2.1.3.5.1. Dirección apropiada de corte

La corriente de gas de plasma forma un remolino cuando abandona la antorcha para mantener una columna de gas uniforme. Este efecto de remolino hace que un lado del corte resulte más perpendicular a la placa que el otro. Los ángulos de corte más perpendiculares siempre estarán a la derecha con respecto al movimiento del avance de la antorcha. Ver figura 2.21

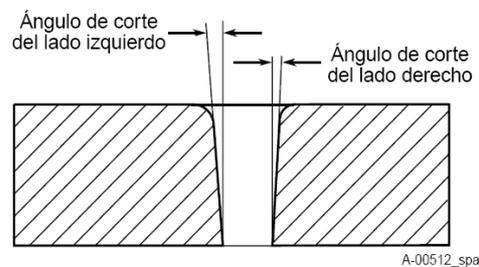


Figura 2.21 Ángulos de corte normales del proceso PAC

- **Contorno.** Para mantener el corte perpendicular al borde de la pieza al cortar un contorno exterior, la antorcha debe moverse en sentido horario. El lado bueno del corte queda del lado derecho de la antorcha, al moverse hacia adelante. Ver figura 2.22

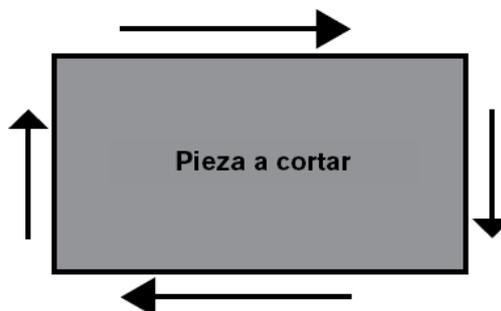


Figura 2.22 Corte de contornos

⁴⁵ <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20PLASMA%20CONSEJOS..pdf>

- **Característica interna (orificio).** Para hacer un corte perpendicular al borde de la pieza al cortar un orificio interior, la antorcha debe moverse en sentido anti horario alrededor del orificio. El lado bueno del corte queda del lado derecho de la antorcha, al moverse hacia adelante. Ver figura 2.23

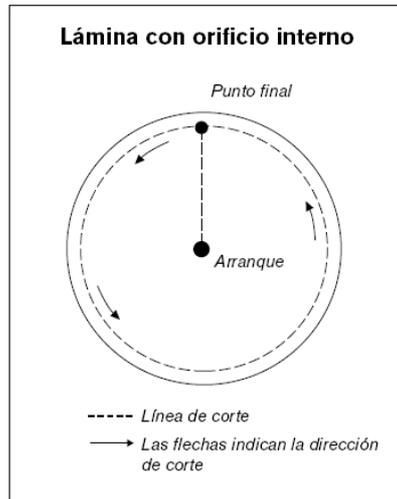


Figura 2.23 Corte de orificios

2.1.3.5.2. *Proceso correcto para el tipo y el espesor del material a cortar*

Asegúrese de seguir las especificaciones de las tablas de corte:

- Seleccione el proceso adecuado para:
 - El tipo de material.
 - El espesor del material.
 - La calidad de corte deseada.
 - Los objetivos de productividad.
- Seleccione los parámetros correctos para:
 - Las presiones de gas.
 - La distancia de la antorcha a la pieza de trabajo.
 - La velocidad de corte.
 - Asegúrese de que se usen los consumibles apropiados.

Nota: Por lo general, los procesos con amperajes más bajos ofrecen mejor angulosidad y acabado de la superficie; sin embargo, la velocidad de corte será menor y los niveles de formación de escoria serán mayores.

2.1.3.5.3. Consumibles

- Verificar que los consumibles no estén desgastados.
- Cambiar los consumibles desgastados.
- Siempre cambiar la boquilla y el electrodo al mismo tiempo.

2.1.3.5.4. Ubicación geométrica de la antorcha

- Nivelar la pieza a cortar.
- Colocar la antorcha en ángulo recto con la pieza a cortar tanto la parte frontal como la parte lateral de la antorcha.

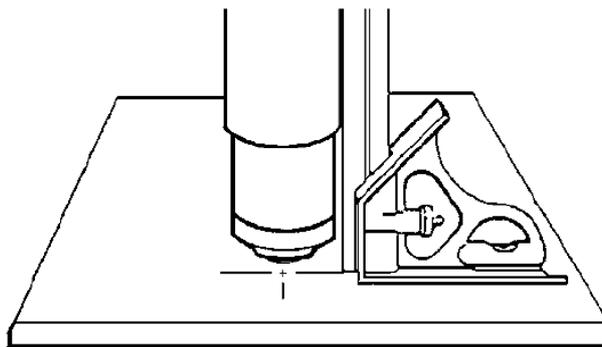


Figura 2.24 Perpendicularidad necesaria para un corte exitoso

2.1.3.5.5. La distancia antorcha – pieza de trabajo

- Ajustar la distancia antorcha - pieza de trabajo correctamente.
- La distancia antorcha – pieza de trabajo puede afectar la angulosidad.

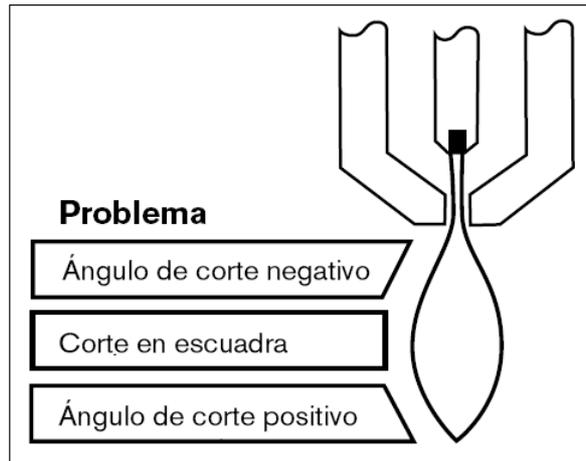


Figura 2.25 Efecto de la distancia antorcha-pieza de trabajo

- **Ángulo negativo de corte.-** La antorcha está demasiado baja, aumente la distancia antorcha – pieza de trabajo.
- **Ángulo positivo de corte.-** La antorcha está demasiado alta, reduzca la distancia antorcha – pieza de trabajo.

Nota: Una leve variación en los ángulos de corte puede ser normal, siempre y cuando este dentro de tolerancia.

2.1.3.5.6. *Velocidad de corte*

Ajustar la velocidad de corte, según sea necesario.

- **Formación de escoria de alta velocidad.-** La velocidad de corte es demasiado alta (el arco se atrasa), reducir la velocidad de corte.
- **Formación de escoria de baja velocidad.-** La velocidad de corte es demasiado baja (el arco se adelanta), aumentar la velocidad de corte.
- **Formación de escoria superior.-** La velocidad de corte es demasiado alta, reduzca la velocidad de corte.

Nota: Además de la velocidad, la composición química del material y el acabado de la superficie pueden determinar los niveles de formación de escoria. Cuando la pieza a cortar se calienta, puede formarse más escoria en los cortes subsiguientes.

2.1.3.5.7. *Sistema de suministro de gas*

- Identifique y repare las fugas o los bloqueos.
- Use reguladores y tubos de gas del tamaño adecuado.

- Use gas puro de alta calidad.

2.1.3.5.8. Antorcha

- Verifique que la antorcha está firmemente unida al pÓrtico de la mesa.

2.2. PROCESO DE CORTE OXIACETILÉNICO (OFC)

2.2.1. DESCRIPCIÓN

El proceso utiliza el calor de la combustión de ciertos gases combinado con la reacción exotérmica del metal con el oxígeno de corte. La antorcha de corte que se usa en estos procesos está diseñada para proporcionar una mezcla de gas combustible y oxígeno en las cantidades correctas y dirigir una corriente de oxígeno a la región de corte. El mecanismo principal de la remoción de material en el proceso OFC es la reacción química del oxígeno con la pieza de trabajo. El propósito de la combustión del oxígeno y el gas es elevar la temperatura en la región de corte para dar lugar a la reacción.⁴⁶

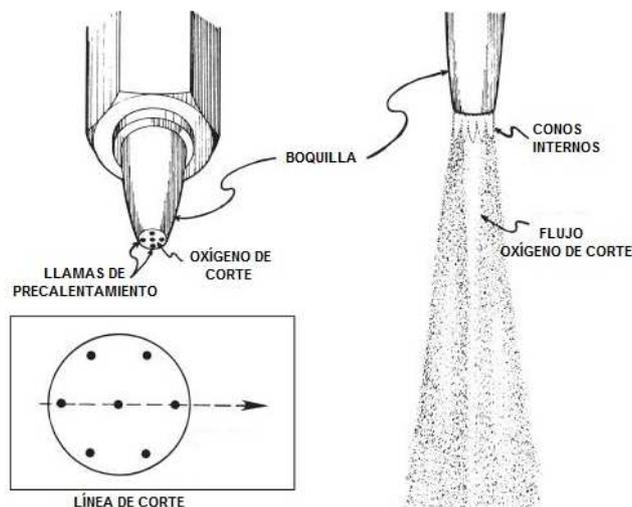


Figura 2.26 Elementos del corte oxiacetilénico⁴⁷

⁴⁶ GROOVER M, (1997), "Fundamentos de Manufactura Moderna", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México, Pág. 689

⁴⁷ <http://alec.tamu.edu/LinkClick.aspx?fileticket=f2yzlgm7utQ%3D&tabid=618>

El proceso de corte se vale de un soplete provisto de una boquilla. Las funciones del soplete son producir llamas de precalentamiento mediante la mezcla del gas y el oxígeno en las proporciones correctas y suministrar un flujo concentrado de oxígeno de alta pureza a la zona de reacción. La boquilla del soplete contiene varias salidas para llamas de precalentamiento y un conducto central para el oxígeno de corte. Como se indica en la figura 2.26

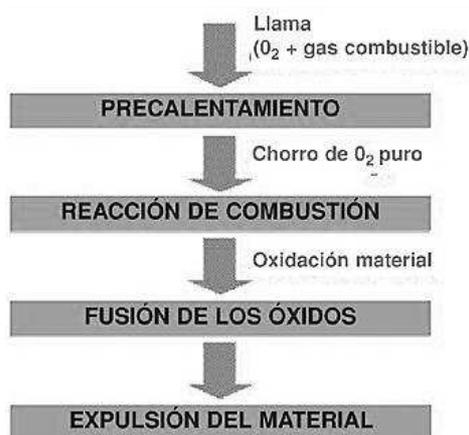


Figura 2.27 Proceso de corte oxiacetilénico⁴⁸

El flujo de oxígeno oxida rápidamente casi todo el metal de una sección angosta para efectuar el corte, como se muestra en la figura 2.27. Los óxidos de metal y el metal derretido son expulsados del área de corte por la energía cinética del flujo de oxígeno. Cuando el soplete se desplaza sobre la pieza de trabajo a una velocidad apropiada, se obtiene una acción de corte continua.⁴⁹

2.2.1.1. Aspectos químicos⁵⁰

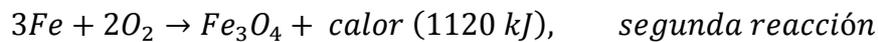
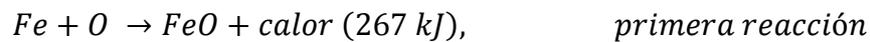
El corte básicamente se produce por la rápida reacción química del oxígeno de alta pureza con el hierro cuando este se calienta hasta su temperatura de ignición, por encima de 870°C [1600°F]. La reacción se produce de inmediato, liberándose calor por varias reacciones.

⁴⁸ <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12110-Tecnologias-de-corte-de-chapa.html>

⁴⁹ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 451.

⁵⁰ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 452.

Las ecuaciones químicas balanceadas para estas reacciones son las siguientes:



La segunda de las reacciones mencionada es la que produce la mayor cantidad de calor en la operación de corte. Estequiométricamente, 0.29 m³ [104 ft³] de oxígeno oxidan 1 kg [2.2 lb] de hierro a Fe₃O₄. En la práctica el consumo del oxígeno de corte por unidad de masa de hierro varía dependiendo del espesor del metal, así para espesores menores a 40 mm [1.5 pulg] el consumo de oxígeno por unidad de masa es mayor que el de la reacción estequiométrica ideal, para el caso de secciones mayores el consumo de oxígeno es menor que en la reacción estequiométrica ideal porque solo una parte del hierro se oxida por completo hasta Fe₃O₄.

Analizando los residuos producidos por el corte por oxígeno, se comprueba que aproximadamente el 30% del material removido no está en su estado de óxido, o solo parcialmente. Esto se debe a la energía cinética desarrollada por la fuerte presión del oxígeno, la cual desprende parte del material sin estar oxidado totalmente.

Los elementos de aleación que se encuentran en los aceros al carbono se oxidan o disuelven en la escoria sin interferir de manera apreciable en el proceso de corte, por otro lado, los aceros que contienen adiciones grandes de elementos resistentes a la oxidación, como níquel o cromo, se hace necesario modificar la técnica para sostener la acción de corte. Ver Tabla 2.1

2.2.1.2. Aspectos metalúrgicos⁵¹

Los efectos a nivel metalúrgico sobre los materiales cortados no resultan tan severos en los aceros bajos en carbono (0.25%), pero provoca efectos

⁵¹ RODRÍGUEZ Pedro, "Manual de Soldadura", Ed. Alsina

adversos en los aceros con alto contenido de carbono y aquellos levemente aleados. Se ha comprobado que en los aceros que han sido cortados con este sistema, se encuentra un porcentaje mayor de carbono en la superficie de corte que en el resto. En los aceros levemente aleados, en particular con níquel, se observa un porcentaje mayor de níquel en el corte que en el resto de la estructura del metal.

Tratando de explicar este fenómeno, existe una teoría que afirma que el oxígeno ataca en forma diferente al carbono, al níquel y al hierro, produciéndose una oxidación selectiva.

En los aceros con alto carbono y los levemente aleados, la zona del corte adquiere una dureza sensiblemente superior al resto del material. Esto se debe a que el calor producido por el corte es transferido rápidamente al resto del metal de base, enfriándolo en forma prematura y produciendo un templado en la zona en cuestión.

Tabla 2.1 Capacidad de corte de los aceros con distintos elementos de aleación⁵²

Capacidad de corte sobre distintas aleaciones y metales (Aceros)	
Al carbono	Buena hasta un contenido de 0.25% de carbono. Aceros con mayor contenido deben ser precalentados para evitar el endurecimiento y el fisurado. El hierro fundido (4% de carbono) puede ser cortado con dificultad, utilizando técnicas especiales.
Manganeso	Aceros con 14% de manganeso y 1.5% de carbono pueden ser cortados con dificultad. Es necesario precalentar el material.
Silicio	Con cantidades habituales de silicio en los aceros, no se presenta dificultad alguna. La chapa de hierro para transformador (4% Si) se corta sin problemas.
Cromo	Buena con un contenido de cromo de hasta 5%, siempre que la superficie se encuentre limpia. Con un 5 a 10%, se requiere de técnicas especiales.
Níquel	Buena hasta 3% de níquel, si el contenido de carbono es bajo. Por sobre un 7%, el resultado no es del todo bueno. Los aceros inoxidables 18/8 y

⁵² RODRÍGUEZ Pedro, "Manual de Soldadura", Ed. Alsina

	35/15 pueden ser cortados con métodos y técnicas especiales.
Molibdeno	Básicamente los mismos requisitos del níquel.
Cobre	Hasta un 2%, responde como un acero al carbono. Con porcentajes mayores no puede ser cortado. Tampoco puede ser cortado el cobre puro.
Aluminio	En su estado puro no puede ser cortado. En cantidades normalmente halladas en los distintos aceros no se encuentra efectos contraproducentes.

2.2.1.3. Oxígeno y gases combustibles⁵³

El oxígeno de corte debe tener una pureza mayor o igual al 99.5%, pues las impurezas reducen la eficiencia de la operación. Si se da una reducción de la pureza del oxígeno a 98.5% el efecto directo es la reducción de la velocidad de corte de aproximadamente un 15%, y un aumento de cerca del 25% en el consumo de oxígeno de corte. La calidad del corte se reducirá y aumentará la tenacidad de la escoria adherida. Si la pureza del oxígeno se reduce al 95% o menos, la acción de corte desaparece, convirtiéndose en una acción de fusión y lavado de material inaceptable.

Por otro lado, los combustibles de precalentamiento producen una llama que durante la operación de corte tiene las siguientes funciones:

- Elevar la temperatura del acero hasta el punto de ignición.
- Agregar energía calorífica al trabajo para mantener la reacción de corte.
- Crear un escudo protector entre el chorro de oxígeno de corte y la atmósfera.
- Eliminar el orín de la superficie del acero, así como incrustaciones, pintura y demás sustancias extrañas que impedirían o retardarían el avance normal de la acción de corte.

Los cortes de alta calidad pueden realizarse con intensidades de precalentamiento bastante bajas que las requeridas normalmente para un calentamiento rápido. En la mayor parte de las máquinas de corte grandes, se

⁵³ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 453.

cuenta con controles de gas de intervalo doble que limitan el precalentamiento de alta intensidad a la operación inicial. Luego, las llamas de precalentamiento se reducen a una intensidad menor durante la operación de corte, a fin de ahorrar combustible y oxígeno y lograr una mejor superficie de corte.

El gas combustible más utilizado es el acetileno, sus ventajas principales son la disponibilidad, la alta temperatura de la llama y la familiaridad que un gran número de usuarios tienen con las características de la llama.

Regulando las proporciones de oxígeno/acetileno se puede controlar las características de la llama, ver figura 2.28, así, una llama neutral se obtiene con una proporción aproximada de una parte de oxígeno a una parte de acetileno y se utiliza para el corte manual; una llama reductora se produce al reducirse el flujo de oxígeno que tiene una característica brillante y se utiliza para cortes burdos de hierro colado; una llama oxidante se da cuando se suministra oxígeno en exceso, el cono de la llama interna se acorta y se vuelve más intenso, la temperatura de la llama aumenta a un máximo cuando la razón oxígeno/acetileno es de aproximadamente 1.5 a 1, se utiliza para obtener tiempos de precalentamiento cortos y para cortar secciones gruesas.

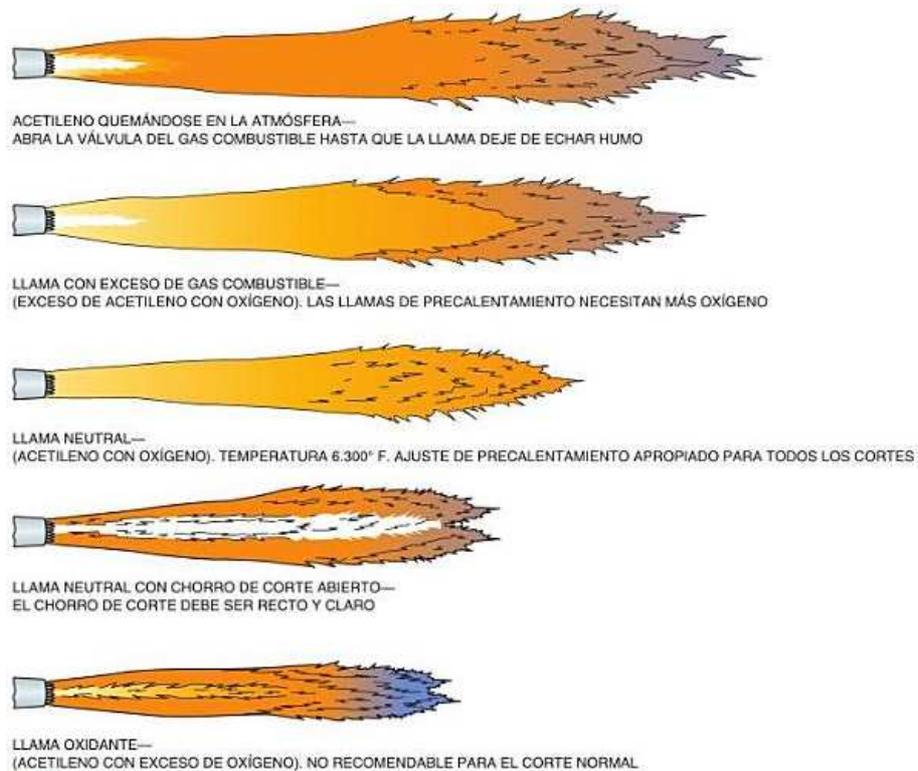


Figura 2.28 Ajuste de la llama oxiacetilénica⁵⁴

2.2.2. EQUIPO⁵⁵

2.2.2.1. Equipo manual

Este equipo es más utilizado para mantenimiento, corte de chatarra, para quitar rebabas de piezas coladas y operaciones que no requieren un alto grado de precisión, el equipo requiere de lo siguiente:

- Uno o más sopletes de corte adecuados para el gas combustible utilizado y el intervalo de espesores de material a cortar.
- Boquillas requeridas para cortar un intervalo dado de espesores de material
- Mangueras para el oxígeno y combustible.
- Reguladores de presión

⁵⁴ JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 734

⁵⁵ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 456.

- Encendedores de flama, protección para los ojos, guantes y vestimenta adecuada.

2.2.2.2. Equipo mecanizado

Este equipo difiere del manual por su diseño para manejar presiones de combustible más elevadas y velocidades de corte más elevadas. Para el corte mecanizado se requiere recursos adicionales que dependen de la aplicación:

- Una máquina para mover una o más antorchas en el patrón de corte requerido.
- Una mesa de corte para sostener el trabajo.
- Dispositivos de encendido automático, en el caso de las máquinas de múltiples antorchas.

2.2.2.2.1. Antorchas.

Consiste en un cuerpo robusto similar al de corte manual pero de construcción más pesada y con una boquilla, por dentro se encuentran los tubos de oxígeno y gas combustible que conducen los gases al extremo de la boquilla que se sujeta mediante una tuerca, la antorcha tiene un sistema de posicionamiento para ajustar la distancia entre la boquilla y el material a cortar que puede ser por cremallera.

2.2.2.2.2. Boquillas.

Están diseñadas para trabajar a presiones de oxígeno y combustible altas, estas se basan en el principio del flujo de gas a través de un venturi, al salir del mismo, los gases alcanzan grandes velocidades, lo que minimiza la distorsión de los gases al salir de la boquilla.

Para la realización de trabajos en serie se utilizan máquinas estacionarias, donde la materia prima es llevada a la máquina, se corta y el producto final se transporta a otro lugar.

2.2.2.3. Procedimientos de corte⁵⁶

Las condiciones de operación para corte mecanizado varían dependiendo del gas combustible y de la antorcha de corte que se use.

Se deberá utilizar el diagrama de corte del fabricante para seleccionar el tamaño de boquilla apropiado para el espesor del material, además del tamaño de la boquilla es necesario ajustar la presión inicial del combustible y del oxígeno, y las velocidades del recorrido.

Si no se utiliza una boquilla de tamaño adecuado no se alcanzará la velocidad de corte máxima ni se obtendrá un corte de la calidad requerida. El ajuste de la presión de oxígeno de cortar es una condición esencial, cualquier desviación de lo recomendado afecta significativamente la calidad de corte.

Otros ajustes importantes son las presiones de combustible y oxígeno de precalentamiento y la velocidad de recorrido. La limpieza de la boquilla, el tipo de metal base, la pureza del oxígeno de corte.

Para determinar la velocidad correcta para una aplicación, es necesario iniciar el corte a una velocidad inferior a la recomendada y aumentarla gradualmente hasta que la calidad del corte alcance el nivel requerido.

2.2.3. CALIDAD DE CORTE OXIACETILÉNICO

2.2.3.1. Introducción

Para lograr la calidad requerida se deben reunir ciertas condiciones indispensables: la boquilla utilizada para el corte, la llama de precalentamiento, la presión y el flujo de oxígeno, y las velocidades de avance de la antorcha sean los correctos.

La calidad de la superficie cortada depende de muchas variables, siendo las más significativas las mencionadas a continuación⁵⁷:

⁵⁶ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "*Manual de Soldadura 2*", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 464.

- Tipo de acero
- Espesor del material
- Calidad del acero (libre de contaminantes, inclusiones, segregaciones, etc.).
- Condición superficial del acero.
- Intensidad de la llama de precalentamiento y la relación entre gas combustible y oxígeno.
- Pureza del oxígeno utilizado.
- Tamaño y forma del orificio del oxígeno de cortar.
- Velocidad de corte.
- Limpieza de la boquilla.
- Fluidez del oxígeno hacia la antorcha.

Los parámetros tecnológicos en el corte oxiacetilénico son definidos para lograr la calidad requerida según la necesidad del producto obtenido, de esta manera lo que se desea en un corte es:

- Esquina superior cuadrada (con radio mínimo)
- Cara de corte plana de arriba a abajo (sin cortes sesgados)
- Cara de corte cuadrada con respecto a la superficie superior
- Superficie limpia y fina con líneas de arrastre casi verticales
- Sin escoria, o muy poca, en el borde inferior (se elimina fácilmente rascando)

⁵⁷ RODRÍGUEZ Pedro, "Manual de Soldadura", Ed. Alsina, Pág. 42

2.2.3.2. Enfoque Sistémico del Proceso – Análisis de las Condiciones del Corte Oxiacetilénico

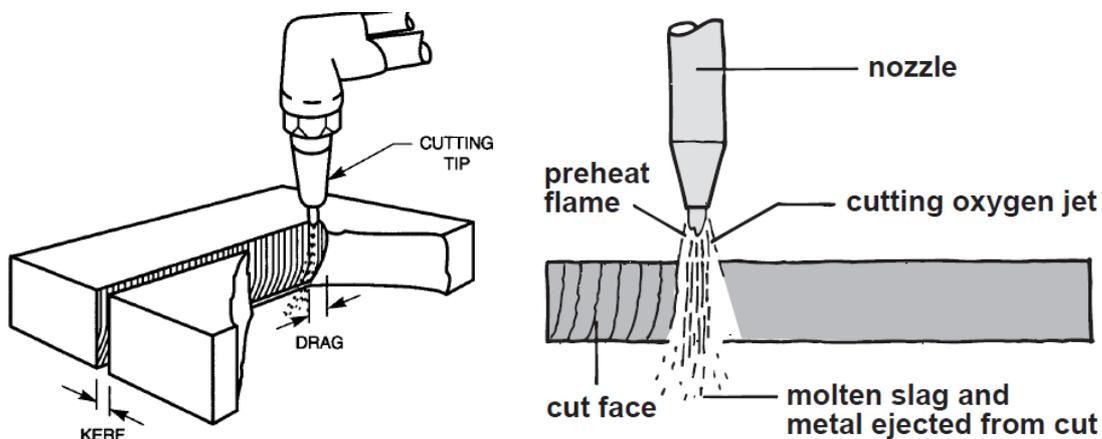


Figura 2.29 Parámetros del proceso oxiacetilénico⁵⁸

- **Parámetros de Entrada.** En el corte oxiacetilénico los parámetros que se fijan antes o durante el proceso se denominan parámetros de entrada, son los siguientes: Presión y flujo de la llama de precalentamiento (presión de oxígeno y acetileno), Presión y flujo del oxígeno de corte, Velocidad de avance de la antorcha; otros parámetros que inciden en menor grado son: altura entre la boquilla y la pieza de trabajo, Suciedad de la boquilla, Alineación de la antorcha.
- **Parámetros de Salida.** Los parámetros que se pueden observar, medir o juzgar después de realizado el corte se denomina parámetros de salida del proceso, son los siguientes: Formación de escoria, derretimiento del borde superior de corte, líneas de arrastre (drag), otros parámetros de salida que se presentan en menor grado son: socavamientos en la superficie de corte. Ver figura 2.29.

⁵⁸ <http://www.cedengineering.com/upload/Fundamentals%20of%20Gas%20Welding%20and%20Cutting.pdf>

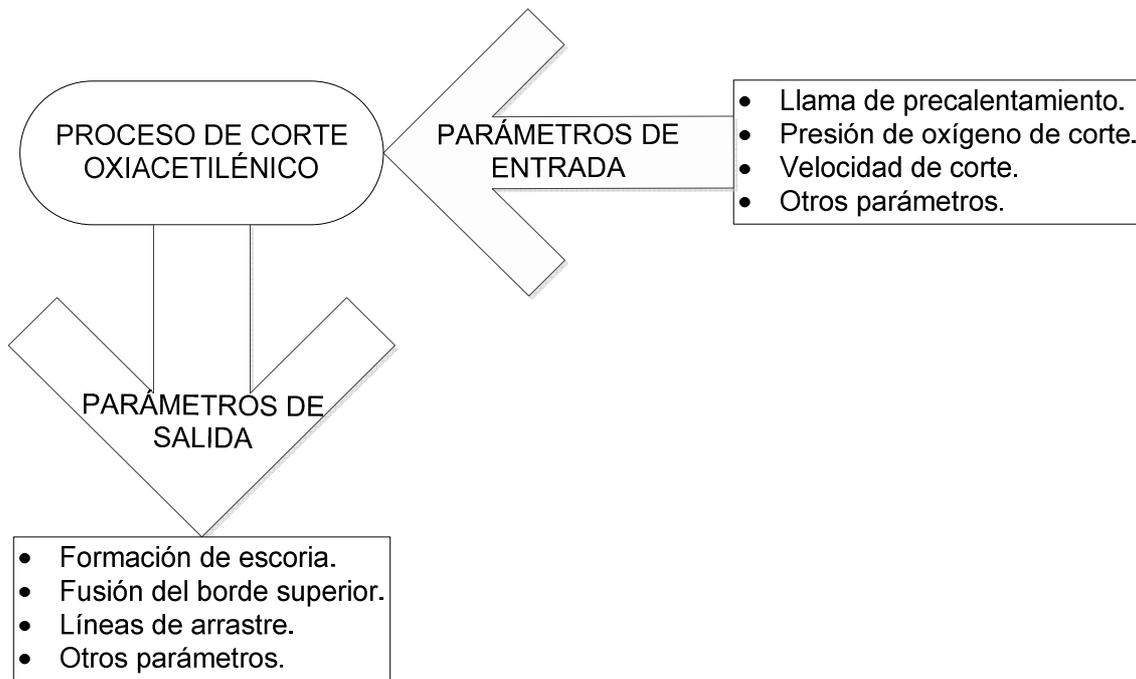


Figura 2.30 Enfoque sistémico del proceso de corte oxiacetilénico

Un corte correcto se caracteriza por la superficie de corte suave y cuadrada, y los bordes de corte son paralelos. Presenta poca escoria y de fácil remoción en el borde inferior. El extremo superior está ligeramente redondeado cuando las llamas del precalentamiento están bien ajustadas. Ver figura 2.31



Figura 2.31 Corte correcto⁵⁹

⁵⁹ http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf

2.2.3.3. Parámetros de Entrada

2.2.3.3.1. Llama de precalentamiento

El tamaño y el número de agujeros para el precalentamiento en una boquilla tienen efecto en los dos bordes del metal, el superior y el inferior. Una cantidad excesiva de llama para el calentamiento previo produce que el borde superior de la pieza de trabajo se funda o redondee. Además, una cantidad excesiva de escoria, difícil de eliminar, se deposita a lo largo del borde inferior. Si la llama es demasiado pequeña, la velocidad de avance debe ser más lenta. Una reducción en la velocidad puede ocasionar que el chorro de corte pase de un lado al otro. La antorcha se puede levantar ligeramente para eliminar un poco del daño causado por el excesivo calentamiento previo. Sin embargo, levantar la antorcha causa que el chorro de corte de oxígeno sea menos fuerte y menos preciso.⁶⁰

- **Llama de precalentamiento excesiva.** Los operarios poco experimentados suelen intentar aumentar la velocidad de corte utilizando una llama de calentamiento fuerte. Un precalentamiento excesivo hace que se derrita el borde superior y es posible que reduzca la velocidad de corte. Además, se malgastan tanto oxígeno como combustible. Ver figura 2.32



Figura 2.32 Llama de precalentamiento excesiva⁶¹

⁶⁰ JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág. 160

⁶¹ http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf

2.2.3.3.2. Presión oxígeno de corte

Una asignación de presión correcta produce que los lados del corte sean planos y lisos. Una asignación de presión demasiado alta causa que el chorro de corte se expanda al dejar la boquilla, ocasionando que los lados de la cortadura queden ligeramente redondeados.

- **Exceso de oxígeno de corte.** Si la presión del oxígeno de corte es demasiado elevada o si la boquilla es demasiado grande, se reduce la calidad del corte. Las boquillas están pensadas para funcionar a intervalos limitados de presión de antorcha. Así, una presión de oxígeno excesiva produce distorsiones en el haz de oxígeno cuando abandona la boquilla. Ver figura 2.33



Figura 2.33 Exceso de oxígeno de corte

2.2.3.3.3. Velocidad de corte

La velocidad de corte debería ser lo suficiente rápida como para que las líneas de arrastre tengan una inclinación ligera hacia atrás si la boquilla se sujeta en un ángulo de 90° con la pieza de trabajo. Si la velocidad de corte es demasiado rápida, el chorro de oxígeno puede no tener tiempo de traspasar completamente el metal, lo que provoca un corte incompleto.⁶²

A medida que aumenta la velocidad, las líneas de arrastre se hacen más finas hacia la parte trasera. El resultado es cierto redondeo del extremo inferior de la forma de corte.

⁶² JEFFUS L, (2009), "Soldadura, Principios y Aplicaciones", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España, Pág 166.

- **Velocidad de corte baja.** Una velocidad de corte baja implica la formación de agujeros mal hechos en la superficie de corte, y la adherencia de escoria. En este caso, se malgasta el oxígeno y el combustible. Ver figura 2.34



Figura 2.34 Velocidad de corte baja⁶³

- **Velocidad de corte alta.** Una velocidad de corte extremadamente elevada tiene como resultado mucha escoria, como indican las líneas de escoria curvas de la superficie de corte. La cara está razonablemente suave pero un poco cóncava. La escoria se adhiere durante el corte, pero puede eliminarse con facilidad. Se recomienda cortar las acumulaciones de escoria solo en líneas de corte rectas. Ver figura 2.35



Figura 2.35 Velocidad de corte alta

2.2.3.3.4. Otros parámetros

- **Distancia boquilla-pieza de trabajo alta.** Cuando se eleva la boquilla demasiado tiene lugar un redondeo excesivo del borde superior. Además, es posible que se tenga que reducir la velocidad de corte. Con la utilización de la boquilla adecuada, las llamas de precalentamiento no deberían superar 1/4 de pulgada de la superficie de trabajo. Ver figura 2.36

⁶³ http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf



Figura 2.36 Boquilla demasiado lejos de la superficie⁶⁴

- **Distancia boquilla-pieza de trabajo baja.** Cuando la boquilla se sitúa demasiado abajo, parte de los conos internos de las llamas de precalentamiento se entierran en la sangría. Esto produce surcos en la cara de corte y un derretimiento excesivo en el borde superior. Además, la llama queda sujeta a pequeñas explosiones y puede producirse una pérdida del corte. Ver figura 2.37

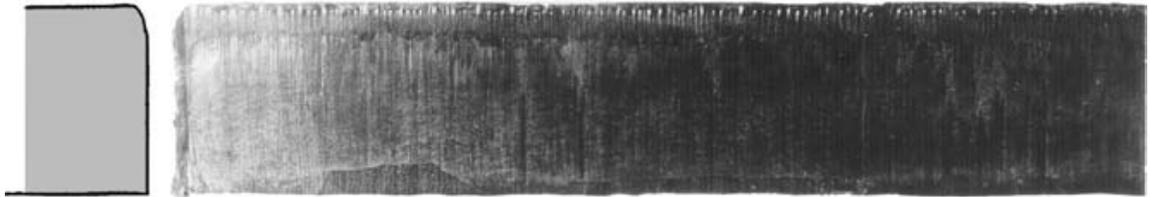


Figura 2.37 Boquilla demasiado cerca de la superficie

- **Boquilla Sucia.** Cuando la boquilla ha sido salpicada por la escoria y el haz de oxígeno pierde su forma paralela, la superficie de corte ya no es suave ni cuadrada y la formación de escoria es evidente. La boquilla debería limpiarse con cuidado para no distorsionar el flujo de oxígeno de corte. Ver figura 2.38



Figura 2.38 Boquilla sucia⁶⁵

⁶⁴ http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf

⁶⁵ http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf

2.2.3.4. Parámetros de Salida

2.2.3.4.1. Formación de escoria

La escoria es hierro oxidado que se produce durante el corte. Parte se adhiere a la parte inferior del extremo del corte. La facilidad para eliminarla va relacionada con la potencia de la oxidación. Cuanto menor sea la oxidación, más difícil es eliminar la escoria; y reducir la velocidad suele ayudar.

Si la llama de precalentamiento ha sido demasiado fuerte la parte superior del corte se funde y queda adherida mucha escoria en la parte inferior. Si se ha usado demasiada presión de oxígeno de corte se produce mucha escoria y el corte es disparejo.⁶⁶ Entonces, la formación de escoria es dependiente de los siguientes parámetros de entrada:

- Velocidad de corte demasiado baja. Borde inferior rugoso, escoria en la parte inferior difícil de remover
- Llama de precalentamiento demasiado fuerte. Excesiva cantidad de escoria adherida fuertemente en el borde inferior.
- Elevada presión de oxígeno de corte. Mucha escoria y el corte es disparejo

2.2.3.4.2. Fusión del borde superior

Este defecto del borde superior es producido por una excesiva entrega de energía y se da de dos maneras: la parte superior del corte es redondeada como se da en la figura a) y un borde sobresaliente como se muestra en la figura b). Ver figura 2.39.

⁶⁶ AGA, "Guía del operario para el corte y la soldadura".

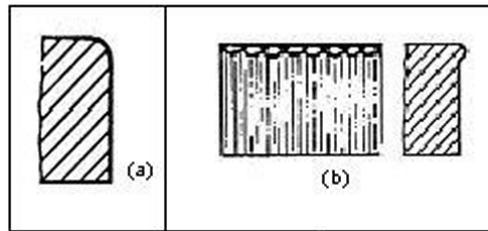


Figura 2.39 Fusión del borde superior⁶⁷

- **Borde superior redondeado**

- Llama de precalentamiento demasiado fuerte. Genera un derretimiento en la parte superior del corte y además se produce excesiva escoria en la parte inferior. Ver figura 2.40

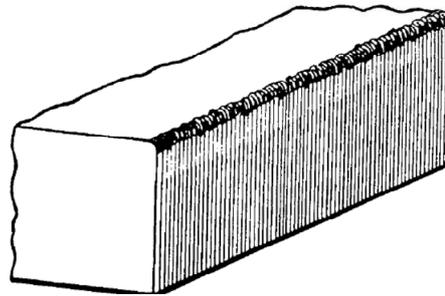


Figura 2.40 Llama de precalentamiento demasiado fuerte⁶⁸

- La boquilla está demasiado cerca de la superficie. Además de formarse el redondeo se producen pequeñas explosiones en la superficie, también puede perderse el corte. Ver figura 2.41

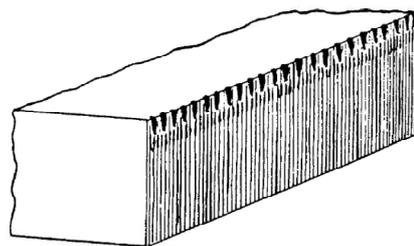


Figura 2.41 Boquilla demasiado cerca de la superficie

⁶⁷ [http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-\(1-parte\).html?R=12109](http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-(1-parte).html?R=12109)

⁶⁸ http://www.bugo.com/pdf/Flame%20Ctg%20Hndbk%205_07.pdf

- **Borde superior sobresaliente**
 - La llama de precalentamiento es demasiado fuerte.
 - La boquilla esta demasiado lejos de la superficie.

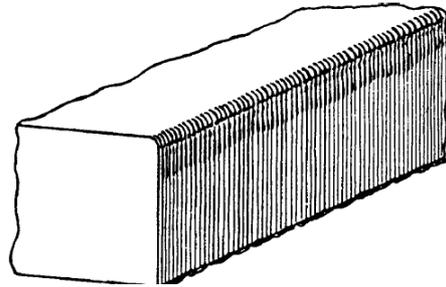


Figura 2.42 Boquilla demasiado lejos de la superficie

2.2.3.4.3. Líneas de arrastre

Cuando se ajusta la velocidad de la antorcha de corte de modo que el chorro de oxígeno entra por la parte superior del corte y sale por la parte inferior sin apartarse del eje de la punta de la antorcha, el corte tendrá arrastre cero. Si se aumenta la velocidad de corte, o si se reduce el flujo de oxígeno, habrá menos oxígeno disponible en las regiones inferiores de corte. Al haber menos oxígeno, la velocidad de la reacción de oxidación disminuirá, y además el chorro de oxígeno tendrá menos energía para expulsar los productos de reacción del área de corte. El resultado es que la parte más distante del chorro de corte, es decir, la salida del chorro en la parte inferior de la pieza de trabajo de atrasa con respecto a la entrada del chorro de corte por la parte superior de la pieza de trabajo. La longitud de este retraso medida a lo largo de la línea de corte se denomina *arrastre*.⁶⁹

- **Líneas de arrastre a baja velocidad.** En este caso el corte en la parte inferior se pierde y se forman agujeros. Hay que tener en cuenta que una disminución de la velocidad de corte con el objetivo de disminuir el arrastre puede ocasionar irregularidades en el ancho de corte. Ver figura 2.43

⁶⁹ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 450.

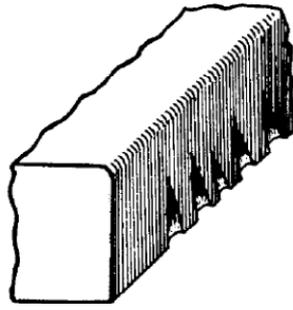


Figura 2.43 Líneas de arrastre por baja velocidad⁷⁰

- **Líneas de arrastre de alta velocidad.** Las líneas de arrastre son demasiado inclinadas. Un aumento en la velocidad de corte sin incrementar el flujo de oxígeno por lo general produce un arrastre mayor, lo cual perjudica la calidad de corte. Ver figura 2.44

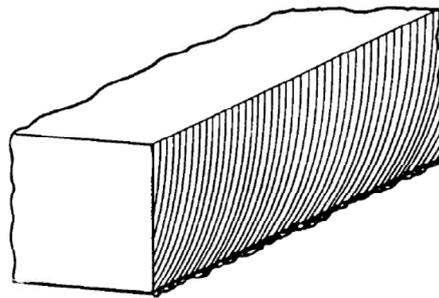


Figura 2.44 Líneas de arrastre por alta velocidad

2.2.3.4.4. Otros parámetros

- **Ancho de corte (Kerf)**⁷¹. Es el ancho de la franja angosta de metal que se elimina en el corte, su control es importante en las operaciones en las que la precisión dimensional y la ortogonalidad de los bordes son factores determinantes. Ver figura 2.45

⁷⁰ http://www.bugo.com/pdf/Flame%20Ctg%20Hndbk%205_07.pdf

⁷¹ AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "Manual de Soldadura 2", Ed. PRENTICE, Octava edición, México, Pág. 450.

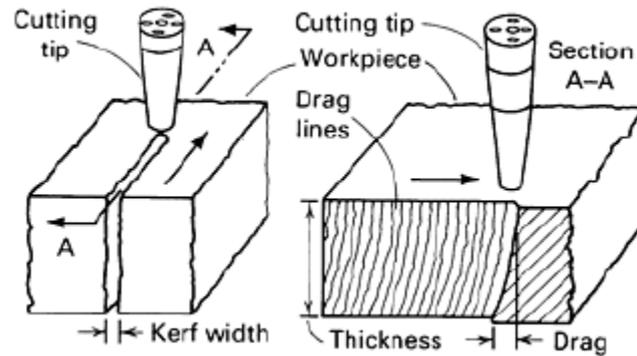


Figura 2.45 Ancho de corte⁷²

El ancho de corte depende del tamaño de salida del oxígeno, el tipo de punta empleada, de la velocidad de corte y de los gases de precalentamiento. Al aumentar el espesor del material, por lo general es necesario incrementar la velocidad de flujo de oxígeno, en consecuencia, la anchura del corte aumenta al aumentar el espesor del material cortado.

- **Socavamiento inferior.** Se produce cuando la boquilla se ha manchado por la escoria y el haz de oxígeno pierde su forma paralela, además se forma escoria en la parte inferior. Ver figura 2.46

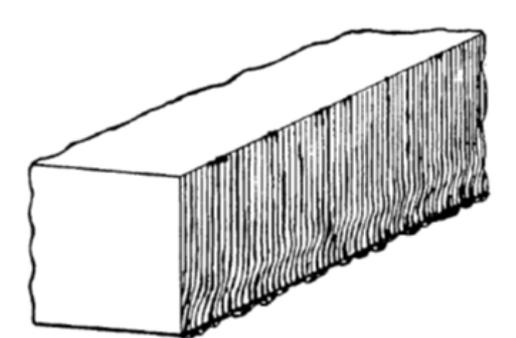


Figura 2.46 Socavamiento inferior⁷³

- **Socavamiento superior.** Se produce cuando la presión de oxígeno es elevada, creando un flujo turbulento en la parte superior.

⁷² https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/1/ME58A/1/material_alumnos/

⁷³ http://www.bugo.com/pdf/Flame%20Ctg%20Hndbk%205_07.pdf

2.2.3.5. Claves para mejorar la calidad de corte⁷⁴

2.2.3.5.1. Regular la llama de precalentamiento

La principal función de la llama de precalentamiento es llevar la pieza hasta la temperatura de ignición. La llama está compuesta por una mezcla proporcionada de gas y oxígeno, elementos que permiten que conserve la temperatura máxima para mayor eficacia de corte. En ese sentido, el operario debe tener presente que, cuando el equipo trabaja con acetileno, la relación adecuada entre oxígeno y combustible debe ser de 1.5/1 y la temperatura máxima debe alcanzar los 3.160 °C (5.720° F.).

2.2.3.5.2. Haz de oxígeno de corte

Para obtener la dimensión exacta en el ancho del corte, un ángulo recto y un proceso de calidad, el operario debe elegir correctamente el tipo de boquilla, la velocidad de corte y el caudal de oxígeno, con los cuales va a trabajar. Si la velocidad es muy alta, el soplete no tendrá el tiempo suficiente para alcanzar a quemar el material, así mismo, si el flujo de oxígeno es demasiado bajo, éste no atravesará la pieza totalmente y dejará la escoria en el interior de la ranura.

El haz largo y uniforme, está dado por el diseño de la boquilla, la limpieza del orificio por donde circula el O₂ y la presión; por ejemplo, cuando el operario utiliza boquillas demasiado amplias, ocasiona que el chorro de oxígeno sea demasiado grande y exceda el ángulo de corte, por lo tanto, la parte inferior de la pieza resulta con un corte más ancho que la parte superior.

Para obtener el haz correcto, cortes limpios y eficientes, es conveniente no utilizar presiones de O₂ ni demasiado elevadas ni tampoco muy bajas.

Generalmente, los fabricantes de equipos de corte oxiacetilénico suministran tablas con los valores más recomendados de presión y velocidad de corte, en función del espesor del material a cortar.

⁷⁴ <http://metalactual.com/revista/14/Oxicorte.pdf>

Verifique que los reguladores, tubos y mangueras estén en buenas condiciones, el oxígeno mantendrá la misma pureza que tiene en el cilindro o tanque, al momento de fluir por la boquilla de corte.

Utilice el tamaño de boquilla y la presión de funcionamiento recomendados por el fabricante para obtener los mejores resultados. En el caso que sea necesario cortar líneas rectas a alta velocidad, por ejemplo, el operario debe usar 1 o 2 tamaños mayores que los que normalmente se aconsejan.

2.2.3.5.3. Velocidad de corte

Es uno de los factores más importantes en las operaciones de corte oxiacetilénico. A continuación se presentan los efectos que la velocidad tiene sobre la calidad de este proceso:

- Cuando el operario realiza diferentes cortes para cada grosor de material la calidad de éste aumentará a medida que disminuya la velocidad, es decir si el operario aplica una velocidad adecuada, el haz de corte libera mayor pureza en el oxígeno y por lo tanto, la muesca es más fina.
- A medida que el operario aumenta la velocidad, las líneas de arrastre se vuelven más finas hacia la parte trasera, lo cual origina cierto redondeo en el extremo inferior del corte; cuando utiliza una velocidad extrema, el arrastre será tan marcado que la esquina inferior del corte no se completará, pues la llama pierde contacto con el material. Lo anterior, recibe el nombre de corte severo.
- Cuando el operario emplea una velocidad mayor a la recomendada, pueden aparecer barrigas en la superficie del corte que destruyen la suavidad deseada.
- Las velocidades bajas también ocasionan problemas en el corte y es que al liberar demasiado oxígeno produce inestabilidad de funcionamiento de la llama y por lo tanto una acción de corte insuficiente en el extremo de la lámina.
- Por lo regular, cuando el operario debe cortar materiales gruesos (mayor o igual a 8”), la mayoría del calor generado durante el corte procede de

la reacción exotérmica entre oxígeno y hierro, sólo un pequeño porcentaje proviene del precalentamiento; por el contrario, cuando se cortan láminas finas, la estabilidad y uniformidad de la reacción de corte depende del calor generado por la oxidación.

- Lo anterior significa que si la velocidad de desplazamiento es demasiado lenta, el volumen del metal oxidado y el calor generado son insuficientes para mantener la operación de corte a lo largo de la lámina y cuando la velocidad es muy elevada, genera mucho calor, lo cual impide que el equipo libere el suficiente oxígeno para que el corte sea correcto.

2.2.3.5.4. Composición del material

La propiedad excepcional de los óxidos de Fe, de fundirse a temperaturas menores que el Hierro puro, hace posible el fenómeno del corte oxiacetilénico. Por ello, la condición para que funcione adecuadamente el proceso, es verificar que el metal a cortar tenga puntos de fusión superiores a los de sus óxidos; requisito que se cumple, básicamente, en los aceros.

El Hierro puro alcanza un calentamiento máximo de 1.530 °C (2.790°F) mientras sus óxidos logran un punto de fusión en 1.400 °C (2.550 °F); en comparación, el óxido de Aluminio posee un punto de fusión que se encuentra a más de 1.000 °C (3.830°F) por encima del metal puro; precisamente por éste motivo metales como el Al, Mg o Cr no pueden ser cortados por este proceso.

Trabajar con materiales compuestos por elementos como carbono, níquel, cromo, manganeso y silicio puede provocar un efecto negativo en el corte oxiacetilénico, incluso en concentraciones bajas, ya que cada uno de ellos actúa como contaminante y presenta una composición tan compacta que el haz de oxígeno no logra oxidar el metal con facilidad.

Los metales de baja calidad también producen grandes cantidades de escoria y óxido, por ello el operario debe tener presente que estos materiales requieren un mayor precalentamiento para penetrar en la superficie protectora que es menos reactiva al oxígeno; además trabajar con metales laminados o con alguna composición afecta notablemente, el quemador, pues ambos actúan

como barreras que impiden la oxidación continua del metal y origina una pérdida del corte.

2.2.3.5.5. Limpieza de la boquilla

La limpieza en el agujero de oxígeno de la boquilla es un factor fundamental para que el gas circule libremente y obtener una buena llama; si está sucio o dañado, el haz no será uniforme y causará defectos como 'barrigas' en la cara de corte, además, en el caso que el operario corte formas, la intensidad y la ubicación del defecto se desplazará alrededor de la línea de corte de la pieza. Una boquilla sucia ocasiona que el haz de oxígeno se distorsione y provoque un mal corte.

2.3. INTRODUCCIÓN AL CONTROL NUMÉRICO COMPUTARIZADO (CNC).

2.3.1. GENERALIDADES

Existen cinco formas de automatizar el corte en la industria moderna, de modo que se deberá analizar cada situación a fin de decidir correctamente el esquema más adecuado. Los tipos de automatización son:

- Control Automático de Procesos
- El Procesamiento Electrónico de Datos
- La Automatización Fija
- El Control Numérico Computarizado
- La Automatización Flexible.

El Control Automático de Procesos, se refiere usualmente al manejo de procesos caracterizados de diversos tipos de cambios (generalmente químicos y físicos); un ejemplo de esto es el proceso de refinación de petróleo.

El Proceso Electrónico de Datos, frecuentemente es relacionado con los sistemas de información, centros de cómputo, etc. Sin embargo en la

actualidad también se considera dentro de esto la obtención, análisis y registros de datos a través de interfaces y computadores.⁷⁵

La Automatización Fija, es aquella asociada al empleo de sistemas lógicos tales como: los sistemas de relevadores y compuertas lógicas; sin embargo estos sistemas se han ido flexibilizando al introducir algunos elementos de programación como en el caso de los PLC's

Un mayor nivel de flexibilidad lo poseen las máquinas de control numérico computarizado. Este tipo de control se ha aplicado con éxito a Máquinas de Herramientas de Control Numérico (MHCN). Entre las MHCN podemos mencionar:

- Fresadoras CNC.
- Tornos CNC.
- Máquinas de corte CNC

El mayor grado de flexibilidad en cuanto a automatización se refiere a robots industriales que en forma más genérica se les denomina como: "Celdas de Manufactura Flexible".

2.3.1.1. Definición

El Control Numérico Computarizado (CNC) es un proceso asistido por computador para controlar los mecanismos de una máquina, por medio de instrucciones generadas por un procesador y almacenadas en un sistema de memoria para un uso presente como para un uso futuro.

Controlar máquinas por comandos numéricos ha causado una revolución en la industria manufacturera. El CNC puede ser adaptado a cualquier tipo de máquina o proceso que requiera ser direccionado por la inteligencia humana.

⁷⁵http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/EL_CONTROL_NUMERICO_COMPUTARIZADO_EN_EL_DESARROLLO_INDUSTRIAL.pdf

El CNC es una forma específica de un sistema de control donde la posición es la principal variable controlada. Los valores numéricos representan las posiciones deseadas de la herramienta.⁷⁶

2.3.1.2. Objetivo

El objetivo principal para la aplicación del CNC a las operaciones de trabajo en metal es la reducción de los costos de producción de partes maquinadas. Este objetivo ha sido logrado con la reducción del tiempo de programación, incremento de la capacidad operativa y haciendo todo el proceso de maquinado más amigable al usuario.

2.3.1.3. Ventajas y desventajas⁷⁷

Es importante conocer que las operaciones realizadas con control numérico son beneficiosas si el resultado final es de mejor calidad y se realiza en menor tiempo en comparación con la forma convencional. Algunas de las mayores áreas donde el CNC puede y debe mejorar son:

- Reducción del tiempo de configuración
- Reducción del tiempo de maniobra
- Precisión y repetitividad
- Contorno de formas complejas
- Tiempo de corte constante
- Incremento de la productividad en general

Desafortunadamente, como todo sistema de control, este tiene desventajas notorias antes, durante y después de la operación, se puede citar:

- Elevados costos de accesorios y maquinaria.
- Necesidad de cálculos, programación, y preparación de la forma correcta para un eficiente funcionamiento.

⁷⁶ MADISON J, (1996), "*CNC Machining Handbook*", Ed. Industrial Press Inc., First edition, New York, Pág. 5-6

⁷⁷ SMID P, (2003), "*CNC programming handbook*", Editorial Industrial Press Inc., Second edition, New York, Pág. 2-3

- Costos de mantenimiento más elevados, ya que el sistema de control y mantenimiento de los mismos es más complicado, lo que genera la necesidad de personal de servicio y mantenimiento con altos niveles de preparación.
- Necesidad de mantener varios volúmenes de pedidos para una mejor amortización del sistema.

2.3.2. INTRODUCCION AL BURNY 10 LCD PLUS

El CNC BURNY 10 LCD Plus es un sistema de control de movimiento, provee una estabilidad y precisión en tiempo real excelente en el control de movimiento para una variedad de procesos de corte, incluyendo: oxi-combustible, plasma, láser, chorro de agua.

Consta de un PC industrial, diseñado para operar en ambientes extremos del taller, donde la temperatura y la humedad son extremas y donde existe frecuentemente polvo metálico, radiaciones RF, vibraciones y movimientos constantes de la máquina. Es fácil de aprender como se maneja, su uso es simple y se pueden ejecutar simultáneamente tareas múltiples de control y programación.⁷⁸

El control del proceso es una característica extraordinariamente potente que proporciona un control exacto de los ajustes usados en los procesos de corte oxiacetilénico, corte con plasma, chorro de agua y de otros tipos.

Los parámetros de corte tales como voltaje, corriente, gas de corte, gas secundario, velocidad de marcha, altura del soplete y otros pueden integrarse en el programa.

Este controlador está diseñado para máquinas de corte que utilicen los ejes X-Y (Plano) y acepta virtualmente todos los formatos de programa, está diseñado con una calidad industrial Touch-Screen que permite al operador maximizar la

⁷⁸ http://www.burny.com/downloads/ds_burny10lcdplus_spanish.pdf

productividad mediante la realización de tareas rápidas y en la mayoría de los casos, simultáneamente.⁷⁹

Acepta descargas directas de ficheros DXF CAD/CAM lo que reduce los gastos de software post-procesamiento de terceros. Además, puede asignar automáticamente posiciones Entradas/Salidas o el operador puede hacer estas asignaciones manualmente.⁸⁰

2.3.2.1. Componentes del panel frontal

El panel frontal es la pantalla inicial para la operación del controlador, en esta se encuentran los botones necesarios para ingresar a los modos subsiguientes y consiste en varias partes importantes que son:

- Pantalla táctil (LCD).
- Unidad de disco.
- Botones de avance.
- Botones de control.

Una captura de la pantalla se encuentra en la figura 2.47



Figura 2.47 Panel frontal de BURNY 10 LCD Plus⁸¹

⁷⁹ <http://www.chodansinh.net/multidata/20090417180733271682.pdf>

⁸⁰ http://www.burny.com/downloads/ds_burny10lcdplus_spanish.pdf

⁸¹ CLEVELAND MOTION CONTROLS, "Burny 10 LCD plus operator's guide", Pág. 4

La pantalla táctil sensible LCD permite al operador controlar el BURNY, muchas funciones y características son intuitivas. Ver figura 2.48

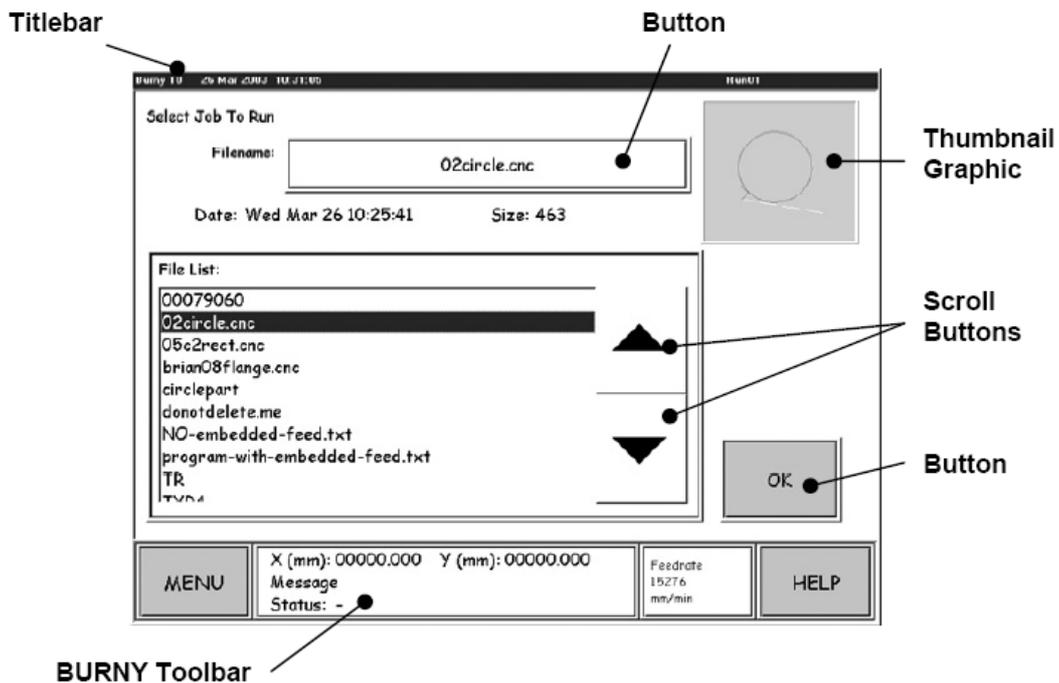


Figura 2.48 Pantalla táctil LCD⁸²

Los componentes de la pantalla táctil:

- Barra de título (Titlebar). Muestra la fecha, hora, nombre de la pantalla actual y una notificación si la contraseña está activada.
- Vista gráfica (Thumbnail graphic). Al presionar este botón se muestra una ventana expandida del gráfico con mayor detalle.
- Botones de desplazamiento (Scroll buttons). Al presionar se sube o baja en la lista, el archivo seleccionado será resaltado.
- Botón OK (Button). Presionar firmemente para activar el botón y mostrar las pantallas asociadas o función.
- Barra de herramientas (BURNY toolbar). Es usada para ver el Menú, Ayuda, Estado, Pantallas de avance. Es común que esté de color verde.

⁸² <http://www.chodansinh.net/multidata/20090417180733271682.pdf>; Pág. 5

2.3.2.1.1. Membrana de control.



Figura 2.49 Membrana de botones de control⁸³

- Ir a (GO TO). Usada para moverse a lugares predefinidos en el programa activo o a la posición de inicio.
- Reversa (REVERSE). Es usado para retroceder a lo largo de la trayectoria de corte siempre y cuando el botón se mantenga pulsado.
- Inicio del ciclo (START). Empieza la operación de corte.
- Parada del ciclo (STOP). Presionar para detener el proceso de corte o la actividad de movimiento actual.

2.3.2.1.2. Botones de avance

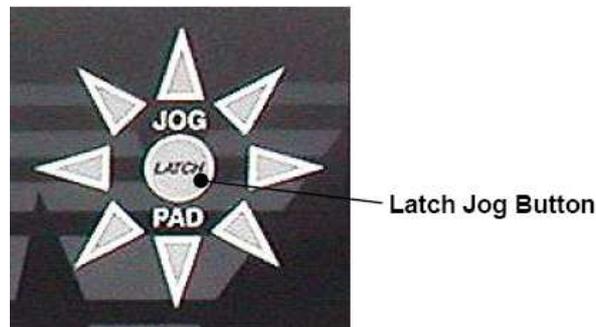


Figura 2.50 Botones de avance (Jog Pad)

Presionando los botones de avance (ver figura 2.50) activa el movimiento de la herramienta de corte en cualquiera de las ocho direcciones indicadas y continuara moviéndose durante el tiempo que el botón se mantenga pulsado. La trayectoria puede ser “bloqueada” primero presionando el botón de bloqueo (Latch Jog Button), y luego presionando la dirección requerida.

⁸³ CLEVELAND MOTION CONTROLS, “Burny 10 LCD plus operator’s guide”, Pág. 6

El movimiento continuará hasta una de las siguientes situaciones:

- Activación de botón de parada (STOP)
- Los límites de la máquina han sido alcanzados

2.3.2.2. Descripción de Modos

El BURNY comprende dos funciones principales que son preparar el programa y el proceso de corte propiamente dicho:

Preparar el programa: los programas son cargados o creados usando el modo de formas (Shape mode). La información del proceso de corte es añadida como: velocidad de corte, ancho de corte, etc. y el trabajo está listo para empezar.

Proceso de corte: es iniciado o detenido usando los controles físicos en el panel de control.

2.3.2.2.1. Programas e instrucciones de trabajo

Las instrucciones que controlan la forma a ser cortada son de dos tipos: un programa o una instrucción de trabajo.

Un **Programa** contiene la información requerida para construir una pieza como dimensiones, geometría, etc.

Un **Trabajo** es una instrucción que contiene ambos la información del programa junto con las condiciones operativas requeridas para producir una pieza como: velocidad de corte, ancho de corte, orientación geométrica, escala, orientación, dimensión y localización de la chapa, tipo de proceso, temporizadores del proceso, etc.

Las condiciones operativas pueden ser adicionadas al programa por dos pantallas: **Run Setup Screen (Run02)**, si la operación se va a ejecutar inmediatamente o el **Job Setup Screen (Job04)**, donde el operador puede especificar las velocidades de avance, ancho de corte, etc. para un trabajo que será realizado en el futuro.

2.3.2.2.2. Modos

El BURNY tiene 8 modos operativos que pueden ser seleccionados del menú principal, como se observa en la figura 2.51. Cada modo tiene su propio set de pantallas para interactuar con el operador. Más de un modo pueden estar activos simultáneamente.

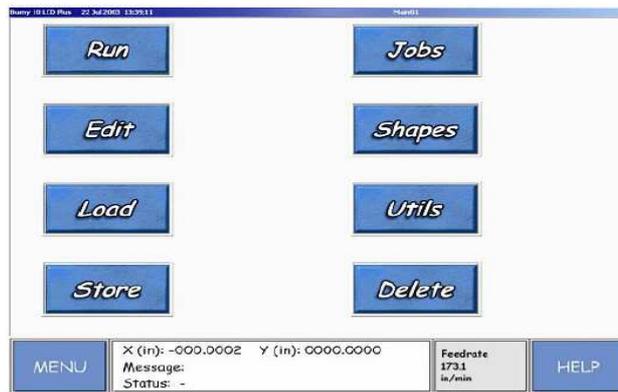


Figura 2.51 Pantalla del menú principal⁸⁴

Se presenta una breve descripción y operaciones disponibles de cada modo:

- RUN. Seleccionar el programa, configurar el programa y la chapa a cortar, prueba de funcionamiento.
- EDIT*. Edita un programa existente, una forma personalizada, o un archivo ASCII; escribe un nuevo programa.
- LOAD. Selecciona la fuente, selecciona la carpeta, selecciona el programa, selecciona el directorio de destino, Copia el archivo al Burny 10 con la conversión del programa.
- STORE. Selecciona el dispositivo de destino, selecciona el directorio fuente (File Type), selecciona el archivo, selecciona la carpeta de destino (depende del dispositivo de destino), selecciona el código de conversión de salida.
- JOBS. Coloca un programa en la lista de trabajos (Job List) por configuración, examina y modifica detalles del programa en la lista de

⁸⁴ CLEVELAND MOTION CONTROLS, "Burny 10 LCD plus operator's guide", Pág. 8

trabajos (Job List), elimina un trabajo (Job) de la lista de trabajos (Job List).

- SHAPES. Crea un programa de 50 formas estándar genéricas disponibles, crea un programa de una forma genérica personalizada.
- UTILITIES. Examina el valor de los parámetros de control, cambia los valores de los parámetros de control, configura la máquina por puesta a punto de los parámetros de control.
- DELETE*. Borra un archivo de los programas, ASCII, Aux Code, configuración CAD, o un directorio de formas personalizadas, borra un archivo de una unidad de almacenamiento.

* No pueden ser modificados durante el corte.

CAPITULO 3

DESCRIPCIÓN DE LA MAQUINA CNC-4000, MARCA HUGONG WELDER Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA MESA DE CORTE

3.1. INTRODUCCIÓN

Para tener una visión amplia del estudio que se está realizando se hace necesario conocer de manera general la constitución de la máquina, condiciones de servicio, así como las características técnicas, este paso previo servirá como base para el desarrollo del análisis estructural y también para la evaluación y mejoramiento del sistema de corte que se realizará en los capítulos siguientes.

El propósito de este capítulo es proporcionar la información necesaria para el análisis estructural de la mesa de corte, basada en especificaciones, valores recomendados y métodos de cálculo necesarios para estimar las cargas a las cuales la mesa pueda estar previsiblemente expuesta durante su vida útil.

En una primera etapa se desarrolla la teoría de diseño estructural prevista para las condiciones particulares a las que está expuesta la mesa, se mencionan los tipos de carga para las cuales se diseña una estructura metálica, y como estas pueden ser determinadas.

Posteriormente se procede a realizar los cálculos pertinentes con el fin de verificar si la mesa de corte soporta las condiciones de carga que actualmente se requieren.

3.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA MÁQUINA TIPO CNC-4000 MARCA HUGONG WELDER.

Con el propósito de mejorar la capacidad de producción de la planta en su área de corte térmico PROMEC S.C.C. dentro de su marco de inversiones adquirió y puso en marcha una máquina que este destinada a solucionar los requerimientos de corte, integrados en una sola unidad, es decir; que tenga la capacidad para corte vía plasma u oxiacetilénico mecanizado, que se hacían emergentes debido al aumento de la capacidad de producción, debido a eso se optó por un sistema de corte tipo pórtico diseñado para aplicaciones de corte más exigentes equipada con una antorcha de oxi-combustible y una antorcha de plasma.

Es un equipo de corte térmico controlado por computadora, que adopta una estructura de pórtico por lo que tiene una buena estabilidad, precisión, confiabilidad y durabilidad. Está prevista de un servo-motor AC de alta precisión que produce un movimiento suave y uniforme⁸⁵. Ver figura 3.1 Tiene las siguientes características:

- El sistema CNC se basa en el sistema de Windows que puede utilizar el dibujo de AutoCAD para cortar cualquier tipo de forma complicada.
- Sistema de encendido automático y sistema de ajuste automático para la distancia de la pieza de trabajo y la antorcha.
- Posee una interface USB para la transmisión de información entre la máquina y un dispositivo de almacenamiento compatible USB.
- Tiene un control remoto de interfaz de red, diagnóstico de fallas de apoyo a distancia y actualización remota.
- Tolerancia de corte de 0.5 mm
- Precisión de corte de Ra 12.5
- Velocidad de corte de 80 a 1000 mm/min.
- Espesores de corte: 4-150 mm (corte por oxígeno); el espesor de corte por plasma depende de la fuente de poder, 4 – 70 mm.

⁸⁵ <http://www.topfreebiz.com/product/3614804/CNC-Plasma-Cutting-Machine-CNC-3000-CNC-4000.htm>

- Los materiales que se pueden cortar son: aceros de bajo carbono, aceros al carbono, acero inoxidable, aceros rápidos, cobre, otros materiales no ferrosos.



Figura 3.1 CNC – 4000 Flame/Plasma Cutting Equipment; a) Control numérico computacional (CNC); b) Antorcha de plasma; c) Antorcha de oxiacetilénico; d) Pórtico; e) Generador de plasma; f) Bancadas; g) Mesa de corte.⁸⁶

3.2.1. CONDICIONES DE TRABAJO⁸⁷

Tabla 3.1 Condiciones de trabajo de la máquina

Condiciones de Trabajo	
Voltaje de la Fuente de energía	AC 220V, Trifásico
Capacidad de la fuente de energía	32 kW
Fluctuación de Voltaje	Menos de $\pm 10\%$
Frecuencia de la fuente	60 Hz
Pureza del oxígeno	$\geq 99,5\%$

⁸⁶ <http://www.ec21.com/product-details/CNC-Flame-Cutting-Machine--2915592.html>

⁸⁷ SHANGAI GAS WELDING EQUIPMENT CO., "CNC-4000 Flame/Plasma Cutting equipment operation manual"

oxígeno	Presión del oxígeno de Corte 6,84x10 ⁵ Pa
	Presión del oxígeno de Calentamiento 3,92x10 ⁵ Pa
Gas	Presión del gas 0,49x10 ⁵ Pa
Aire	Presión del aire 6,5x10 ⁵ Pa

Ambiente de Trabajo	
Temperatura	0°C-45°C
Humedad Relativa	Menos de 90%; sin condensación
Ventilación	No vibración violenta

3.2.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Tabla 3.2 Datos técnicos de la máquina

Principales datos técnicos	
Ancho máquina	4000 mm
Largo máquina	12000mm
Máxima coordenada de corte (Y)	3200 mm
Máxima coordenada de corte (X)	10000 mm
Máxima velocidad de corte	4000 mm/min
Antorcha de corte con oxígeno	1 grupo
Antorcha de plasma	1 grupo
Angulo de ajuste de la antorcha de corte con oxígeno	±45°

3.2.3. ESTRUCTURA PRINCIPAL⁸⁸

Un sistema de corte tipo pórtico se caracteriza porque todos los componentes del equipo interactúan y se comunican entre sí, siendo el centro neurálgico el Control Numérico Computacional (CNC), que a su vez es la interfaz gráfica con el operador permitiendo automatizar el trazado e identificar las partes cortadas, es la unidad de gobierno que tolera los sistemas de corte oxiacetilénico y plasma.



Figura 3.2 Ejes de movimiento de la máquina

Este equipo está constituido de una mesa de corte con dos bancadas completamente independientes de la mesa, montadas sobre el suelo al que se asigna el nombre de eje X. Las partes principales se explican a continuación:

- Las dos bancadas soportan el deslizamiento de una viga de acero llamada pórtico (eje Y) a través de rodamientos y también la acción de rodadura de los piñones y cremallera que transmiten el movimiento en el eje X. Las bancadas proveen soporte estructural. Ver figura 3.2

⁸⁸ SHANGAI GAS WELDING EQUIPMENT CO., "CNC-4000 Flame/Plasma Cutting equipment operation manual"

- El pórtico es una plataforma rígida para el montaje y deslizamiento de los dos cabezales de corte que contienen a las antorchas de plasma y oxiacetilénico. Este asegura el movimiento sincronizado y el espacio superior es dejado para instalar las tuberías principales, esto hace una característica de buena rigidez. Los limpiadores instalados en las dos terminaciones de carrera eliminan el polvo de la pista.
- Un servo-motor AC controla al reductor. El engranaje de salida del reductor engrana con la cremallera de la bancada y gobierna el movimiento de la máquina a lo largo del eje (X). La relación de transmisión de la salida es $i=32/40$. La misma configuración se aplica para la caja de engranajes de las antorchas (eje Z), en consecuencia, estas pueden llegar a cualquier posición a lo largo del eje X e Y.
- Dispositivo de banda metálica. Une todas las partes móviles en la dirección (Y).
- Dispositivo de sujeción. La antorcha de corte puede ser seleccionada por el ajuste del dispositivo de sujeción. Se debe aflojar el dispositivo de sujeción cuando ha sido seleccionado corte por plasma, y ajustar el dispositivo de sujeción cuando ha sido seleccionado corte oxiacetilénico.
- Dispositivo de levantamiento. El eje de levantamiento impulsa el movimiento ascendente y descendente de la antorcha para mantener la distancia adecuada entre la pieza de trabajo y la boquilla. El movimiento vertical de la antorcha de corte puede satisfacer los requerimientos de corte para chapas de acero de diferentes espesores.
- Dispositivo de autoencendido, está equipado a la antorcha de corte oxiacetilénico para lograr el encendido automático, el encendido manual también está disponible.
- El controlador CNC de la máquina es adoptado por un sistema de control fabricado por BURNY 10 LCD system control, la interfaz hombre-máquina (HMI) y sus acciones pueden llevarse a cabo con los botones correspondientes

3.2.4. OPERACIÓN⁸⁹

Para la operación de la máquina es requerido personal calificado. La secuencia básica de operación es la siguiente:

- Encender la fuente de energía y la fuente de gas.
- Cuando ha sido ubicada la pieza de trabajo en la mesa de corte, ajustar el volante de mano de la antorcha para definir la distancia definitiva de la boquilla a la pieza de trabajo.
- Activar todas las válvulas manuales.
- La máquina puede ser operada manualmente o automáticamente.

3.3. TEORIA DE DISEÑO

3.3.1. MATERIALES

3.3.1.1. Acero al carbono

El acero es una aleación consistente en su mayor parte de hierro, con un contenido en peso de carbono que puede oscilar entre 0,04 y 2%. El carbono es el material aleante principal en los aceros debido a su facilidad de obtención y a su bajo costo, sin embargo en los aceros se usan también otros elementos aleantes como manganeso, cromo, vanadio, tungsteno, etc. Al variar las cantidades de elementos aleantes, y la forma en la que están presentes en la aleación, es posible controlar propiedades como la dureza, ductilidad, y resistencia a la tracción del acero.

3.3.2. ANÁLISIS DE CARGAS PARA EL DISEÑO

Una parte primordial del proceso de diseño de cualquier tipo de estructura es la determinación de las cargas que actúan o pueden actuar sobre una estructura, con el propósito de predecir el comportamiento resultante de la misma.

⁸⁹ SHANGAI GAS WELDING EQUIPMENT CO., "CNC-4000 Flame/Plasma Cutting equipment operation manual"

Las cargas estructurales son clasificadas atendiendo su carácter y a su duración. Las cargas que suelen aplicarse a edificios o estructuras se clasifican como sigue:

- Cargas estáticas. Aquellas cargas de magnitud constante que permanecen en una sola posición. Estas incluyen el peso de la estructura considerada, así como cualquier accesorio que quede permanentemente unido a ella.
- Cargas dinámicas. Aquellas cargas que pueden cambiar su magnitud y posición. Estas representan las cargas probables sobre la estructura debido a la ocupación y el uso, y generalmente se considera como uniformemente distribuidas sobre el área del piso, están incluyen las cargas de operación, los materiales almacenados, las cargas de construcción y las cargas para operar el equipo. En general, las cargas dinámicas son inducidas por gravedad.
- Cargas ambientales. Aquellas cargas causadas por el ambiente en que se encuentra la estructura. Por lo que se refiere a los edificios, las cargas ambientales son causadas por lluvia, nieve, viento, temperatura y sismos. Estrictamente hablando, estas también son cargas vivas, pero son el resultado del ambiente en que se localiza la estructura.
Estas cargas no serán utilizadas en el presente estudio, debido a que la estructura no lo amerita.

3.3.3. CARGA ESTÁTICA

Se denomina carga estática a la sumatoria de todos los pesos propios de la estructura, de la siguiente manera:

$$D = W_{pp} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

3.3.3.1. Carga de peso propio

El peso propio de la estructura constituye una parte fundamental de la carga muerta. La carga de cada uno de los elementos puede ser determinada de acuerdo a la siguiente formula:

$$W_{PP} = \sum(\text{Peso del elemento} * \text{Número de elementos}) \quad (\text{Ec. 3.2})$$

El peso de cada uno de los elementos se puede determinar a partir de los datos de peso que los distribuidores de los distintos elementos como planchas y vigas tienen en sus registros. También se puede calcular en base al conocimiento del peso volumétrico y de las dimensiones del material utilizado para la construcción del sistema estructural.

$$W_{PP} = \text{volumen} \times \text{densidad} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

3.3.4. CARGAS DINÁMICAS

3.3.4.1. Carga de operación

La carga de operación de la estructura estudiada, es la capacidad máxima que soportaría en condiciones extremas. Esta se refiere a la plancha metálica de mayor espesor que se puede trabajar con los módulos de corte, que es de 80 mm de espesor.

La carga de operación se refiere entonces a la capacidad de máxima de la mesa de corte y adicionalmente una carga de seguridad en caso de sobrecarga, que se puede asumir como un 30% (según recomendaciones estructurales) de la carga nominal, para fines de cálculo.

Por lo tanto, la disposición de carga sobre cada platina esquemáticamente se muestra en la Figura 3.3.

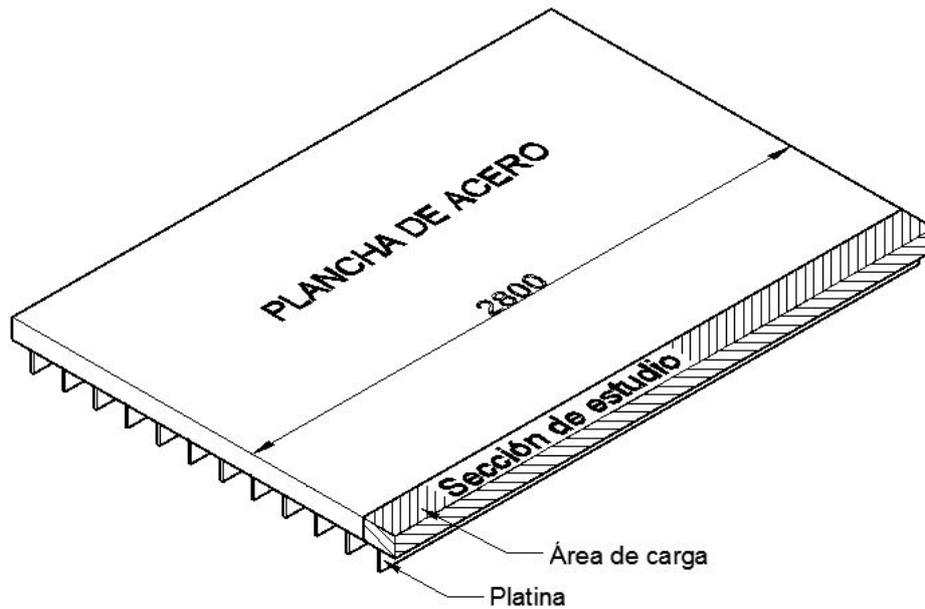


Figura 3.3 Sección de estudio, área de carga sobre cada platina

La carga que se aplica sobre cada platina es:

$$C[kN] = A_c \times e \times \delta \times g \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$Q[kN] = C + 0,3 \times C \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$q \left[\frac{kN}{m} \right] = \frac{Q[kN]}{l[m]} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde:

C : Carga sobre cada platina. $[kN]$

A_c : Área de carga sobre cada platina. $[m^2]$

e : Espesor de la plancha de acero cargada sobre la mesa. $[m]$

δ : Densidad del acero. $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

g : Aceleración de la gravedad. $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

Q : Carga de operación. $[kN]$

q : Carga por unidad de longitud. $\left[\frac{kN}{m}\right]$

l : Longitud de la platina. $[m]$

3.3.5. DISEÑO ESTRUCTURAL

Pueden considerarse tres grandes grupos, en los que se pueden clasificar las estructuras metálicas: edificios, puentes o estructuras especiales. Dentro de esta última clasificación incluyen torres, tanques, barcos o aviones. Es en esta última clasificación es donde se puede incluir la mesa de corte.

Para el diseño de estructuras, la especificación AISC ha desarrollado dos métodos generales. Estos son de acuerdo con las disposiciones del método *Diseño en Base a Factores de Carga y Resistencia* (LRFD) o a las disposiciones del método *Diseño en Base a Resistencias Admisibles* (ASD).

Cualquiera de las 2 teorías son validas para el diseño; sin embargo, se recomienda que ambos métodos no deben mezclarse.

En el presente proyecto se seguirá las especificaciones AISC –ASD. Esta establece que los esfuerzos admisibles de un elemento o conexión no deben ser sobrepasados por las cargas de trabajo. A las teorías de esfuerzos admisibles se incorpora el factor de seguridad mínimo para estructuras mencionadas mas adelantes.

3.3.5.1. Esfuerzos de flexión⁹⁰

Si la viga esta sujeta a momentos flexionantes, el esfuerzo en cualquier punto puede calcularse con la fórmula de la flexión:

$$f_b = \frac{M}{S} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

⁹⁰ McCORMAC, J; "Diseño de Estructuras Metálicas: Método ASD"

Si la viga se va a diseñar para un momento flexionante M dado y para un cierto esfuerzo permisible F_b , el módulo de sección S necesario para que la viga tenga suficiente resistencia a la flexión puede obtenerse con la fórmula de la flexión:

$$\frac{M}{F_b} = S \quad (\text{Ec. 3.8})$$

3.3.5.2. Consideración de un valor de esfuerzo permisible.⁹¹

La especificación ASD- F1, da diferentes esfuerzos permisibles por flexión para diferentes condiciones, para la mayoría de los casos, el esfuerzo permisible por flexión es:

$$F_b = 0,66 \cdot S_y \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Esta expresión se puede utilizar para determinar el esfuerzo permisible por flexión en las fibras externas, de un material laminado en caliente y de miembros armados simétricos y cargados respecto a sus ejes menores.

Para obtener un diseño confiable la siguiente ecuación debe cumplirse:

$$\frac{f_b}{F_b} \leq 1 \quad (\text{Ec. 3.10})$$

3.4. COMPROBACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LA MESA DE CORTE

La construcción de la mesa fue realizada de manera empírica, por lo tanto el objetivo de los siguientes cálculos es verificar si la misma cumple con las solicitaciones a las que será expuesta.

Se considera que la carga máxima a la que estará sometida la estructura será aplicada por una plancha de acero de espesor 100 mm, las dimensiones de la

⁹¹ McCORMAC, J; "Diseño de Estructuras Metálicas: Método ASD"

mesa son 2800x11800mm, los cálculos se realizarán suponiendo que la carga de la plancha actúa en toda la longitud de las platinas, como se muestra en la figura 3.4. Todas las dimensiones de la mesa de corte se detallan en los planos adjuntos.

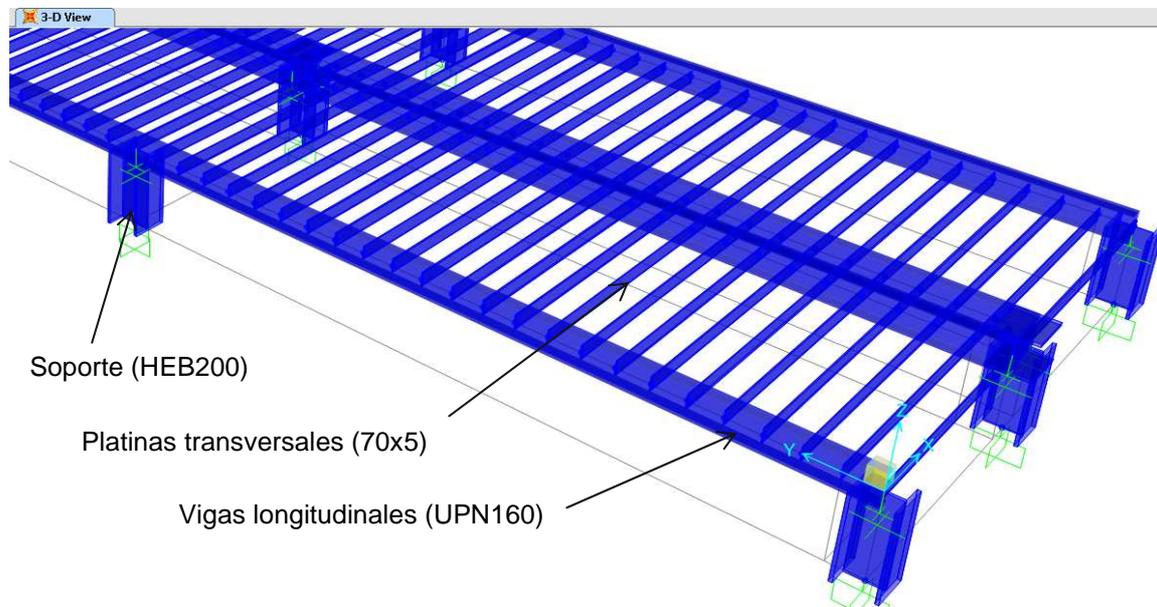


Figura 3.4 Representación esquemática de la mesa de corte

3.4.1. ANÁLISIS DE CARGAS

El paso previo para el cálculo de los esfuerzos y deflexiones en los diferentes elementos de la estructura es conocer todas las cargas que están actuando sobre esta.

3.4.1.1. Cargas estáticas

3.4.1.1.1. Carga de peso propio W_{pp} .

Esta carga incluye los elementos inherentes de la estructura que permanecen en todo momento de con ella, los parámetros son los siguientes:

- Peso de una platina transversal (70x5 mm)

$$W_{pp} = \text{volumen} \times \text{densidad} = 0,07 \times 0,005 \times 2,8 \times 7850 \text{ kg}$$

$$W_{pp} = 7,7 \text{ kg} = 0,075 \text{ kN}$$

$$W_{pp} = 0,027 \text{ kN/m}$$

- Peso de una viga longitudinal (UPN160)

Del manual de aceros DIPAC, se obtiene el valor en *kg por metro* para el perfil seleccionado, para este caso $18,8 \text{ kg/m}$, cuya especificación se muestra en el anexo 1, entonces:

$$W_{UPN} = 18,8 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 11,8\text{m} = 222 \text{ kg}$$

$$W_{UPN} = 2,17 \text{ kN}$$

$$W_{UPN} = 0,19 \text{ kN/m}$$

- Peso de vigas soporte (HEB200)

Del manual de aceros DIPAC, se obtiene el valor en *kg por metro* para el perfil seleccionado, para este caso $61,3 \text{ kg/m}$, cuya especificación se muestra en el anexo 1, entonces:

$$W_{HEB} = 61,3 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 0,44 \text{ m} = 27 \text{ kg}$$

$$W_{HEB} = 0,26 \text{ kN}$$

$$W_{HEB} = 0,6 \text{ kN/m}$$

En este punto no se toma en cuenta el peso de la plancha de acero que se va a cortar ya que esta depende de las necesidades de producción, la misma que se tomará con el nombre de carga de operación.

3.4.1.2. Cargas dinámicas

Este valor corresponde a la carga de operación que será calculado en cada caso que se presenta a continuación.

3.4.2. DISEÑO ESTRUCTURAL

3.4.2.1. Consideraciones de cálculo.

Para el diseño de estos elementos es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones que fueron tomadas directamente de la máquina:

- Para el estudio se toma solo un tercera parte de la mesa ya que la producción no es a gran escala y las piezas que son cortadas no son de gran magnitud, además el caso de estudio se podría considerar una condición extrema de trabajo.
- El número de platinas transversales que pueden colocarse es de 7 platinas por cada 977 mm, es decir 7,16 *platinas/metro*, dato proveniente de la medición in situ, por otro lado, al ser las platinas simplemente apoyadas en ranuras ubicadas a la distancia anteriormente mencionada estas pueden colocarse una por ranura o dependiendo del requerimiento, lo cual es uno de los objetivos de este cálculo.
- Se estudiarán dos casos, donde la carga se distribuye a lo largo de toda la platina, esta carga se calculará posteriormente para cada caso de la siguiente manera:

Caso 1.- La separación entre platinas es de 164 mm.

Caso 2.- La separación entre platinas es de 328 mm.

- La longitud de la platina se toma como la longitud entre los soportes, que es de 2800 mm.
- El material es un acero ASTM A-36, cuyas propiedades principales utilizadas a continuación son, densidad del acero = 7850 kg/m^3 y límite de fluencia $S_y = 248 \text{ MPa}$

3.4.2.2. Primer caso - platina

3.4.2.2.1. Carga de operación

La separación como se mencionó anteriormente es de 164 mm entre platinas y la carga que soporta cada una, como se muestra en la figura 3.5, se calcula de la siguiente manera:

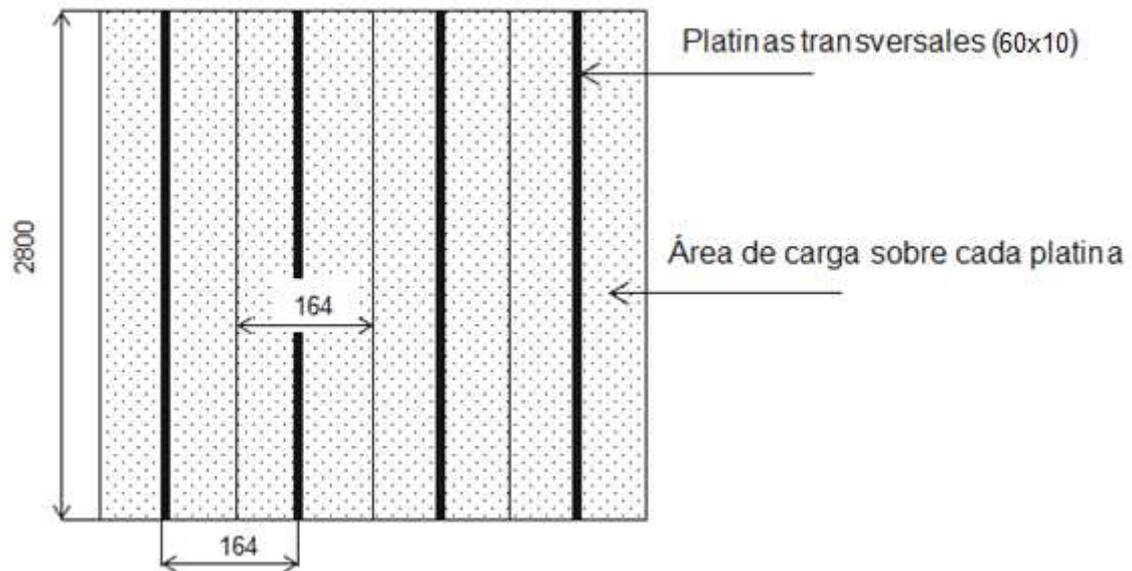


Figura 3.5 Representación de la ubicación de las platinas (Primer caso)

La carga que se aplica sobre cada platina es:

$$\text{Carga} = \text{Área de carga} \times \text{espesor} \times \text{densidad acero}$$

$$\text{Carga} = (2,8 \times 0,164) \times 0,1 \times 7850 = 360,5 \text{ kg}$$

$$\text{Carga} = 3,53 \text{ kN}$$

$$Q(\text{kN}) = \text{Carga} + 0,3 \times \text{Carga} = 4,59 \text{ kN}$$

$$q \left(\frac{\text{kN}}{\text{m}} \right) = \frac{4,59}{2,8} = 1,64 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

Por otro lado, el número de platinas cargadas se puede tomar del gráfico que se muestra a continuación y la carga total que soporta la estructura es:

$$Q_T = q \times l_{\text{platina}} \times N_{\text{platinas}}$$

$$Q_T = 1,64 \times 2,8 \times 23 = 105,6 \text{ kN}$$

3.4.2.2.2. Cortantes y momentos flectores máximos sobre las platinas

Los cortantes y momentos máximos sobre las platinas son prácticamente los mismos en todas las platinas debido a que la carga es la misma en todas, sin

embargo tomaremos del programa SAP2000, una platina intermedia ya que en la misma se presenta la mayor deformación. La Figura 3.6 muestra los momentos flectores y cortantes de una platina intermedia:

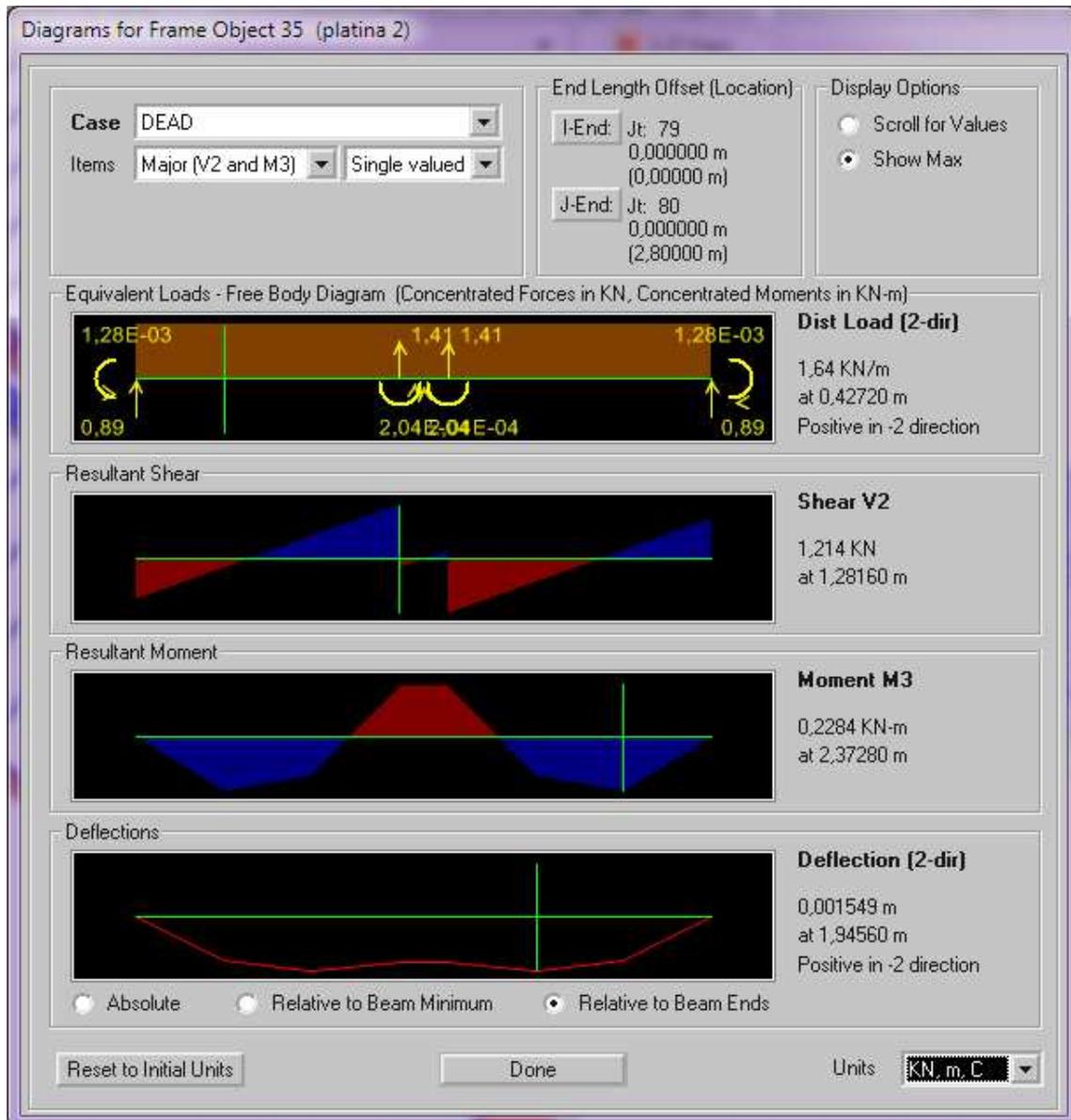


Figura 3.6 Cortantes y momentos flectores máximos sobre una platina (Caso 1)

De esta figura se puede obtener los valores máximos que son necesarios para el posterior cálculo de esfuerzos de la estructura y consecuentemente el factor de seguridad de la platina, estos valores son:

$$|V_{m\acute{a}x}| = 1,21 \text{ [kN]}$$

$$|M_{m\acute{a}x}| = 0,23 \text{ [kN - m]}$$

Una vez obtenidos estos valores, el paso siguiente es realizar el cálculo de esfuerzos y el respectivo factor de seguridad.

3.4.2.2.3. Consideración de un valor de esfuerzo permisible

$$F_b = 0,66 \cdot S_y$$

$$F_b = 0,66 \cdot 248 \text{ MPa}$$

$$F_b = 163,7 \text{ MPa}$$

3.4.2.2.4. Módulo de sección

$$S_x = \frac{b \cdot d^2}{6} = \frac{0,01 \cdot 0,06^2}{6} = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

3.4.2.2.5. Esfuerzo real

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F_b$$

$$f_b = \frac{M_{\text{máx}}}{S_x} = \frac{0,23 \text{ kN} \cdot \text{m}}{6 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 38,1 \text{ MPa}$$

Lo cual se comprueba en la figura 3.7:

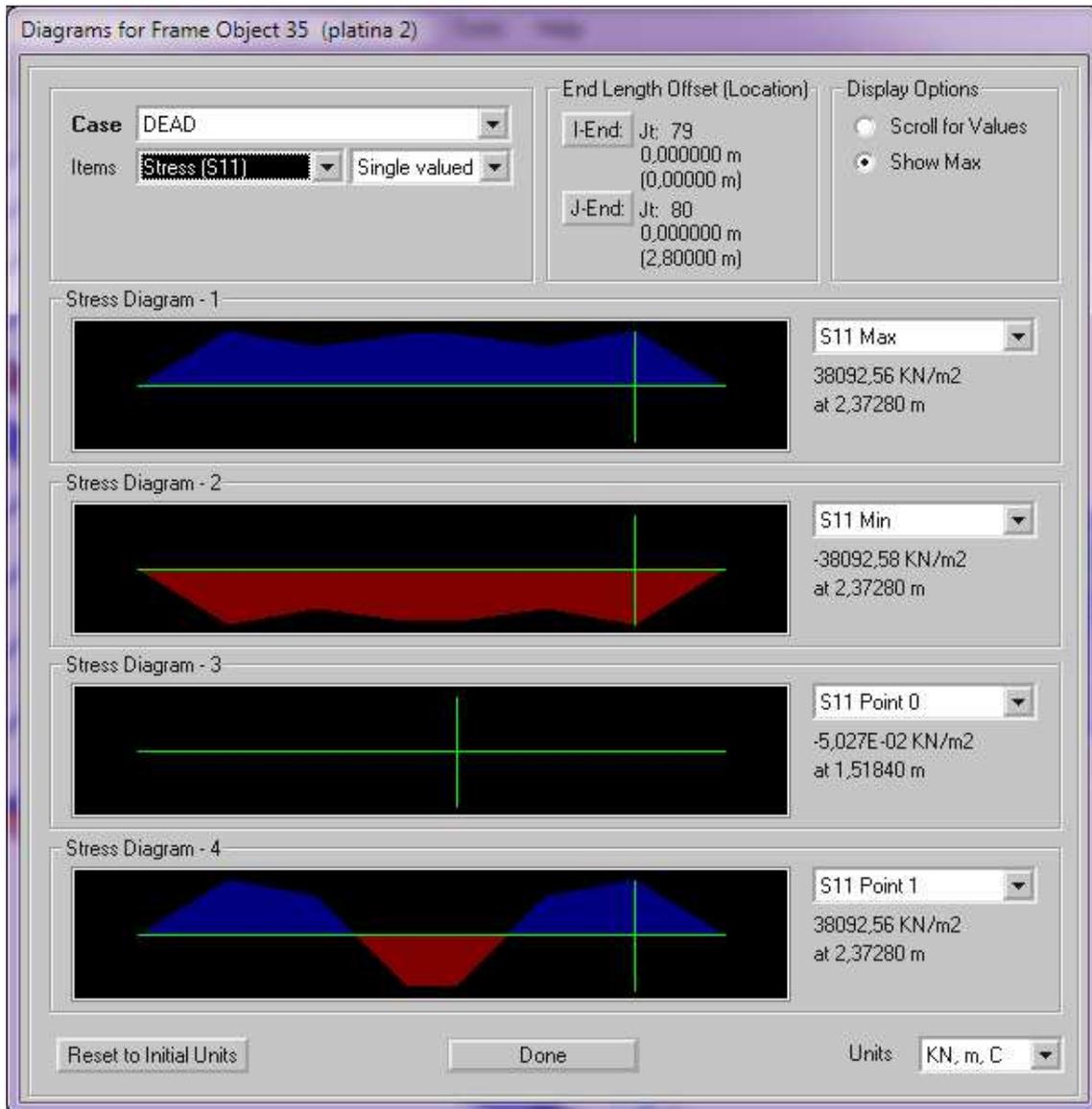


Figura 3.7 Diagrama de esfuerzos de una platina (Caso 1)

3.4.2.2.6. Índice de trabajo

$$I = \frac{f_b}{F_b} = \frac{38,1}{163,7} = 0,23$$

3.4.2.2.7. Comprobación de la deflexión

La deflexión máxima permitida para este caso según AISC 2005, es de:

$$d_{\max} \leq \frac{L}{240}$$

La simulación en SAP2000 dio como resultado una deflexión máxima como se muestra en la figura 3.8:



Figura 3.8 Comprobación de la deflexión de la platina (Caso 1)

$$1,6 \text{ mm} \leq \frac{2800}{240}$$

$$1,6 \text{ mm} \leq 11,7 \text{ mm.}$$

3.4.2.2.8. Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{f_b} = \frac{248}{38,1} = 6,5$$

3.4.2.3. Primer caso – viga longitudinal

La carga de operación no se calcula, debido a que es la misma del punto 3.3.2.2.1, razón por la cual se procede a realizar el siguiente paso.

3.4.2.3.1. Cortantes y momentos flectores máximos sobre las vigas longitudinales (UPN160)

Del programa SAP2000 se obtienen los diagramas de momentos flectores y cortantes de una de las vigas centrales que son las que soportan el mayor efecto y deformación, como se muestra en la Figura 3.9:

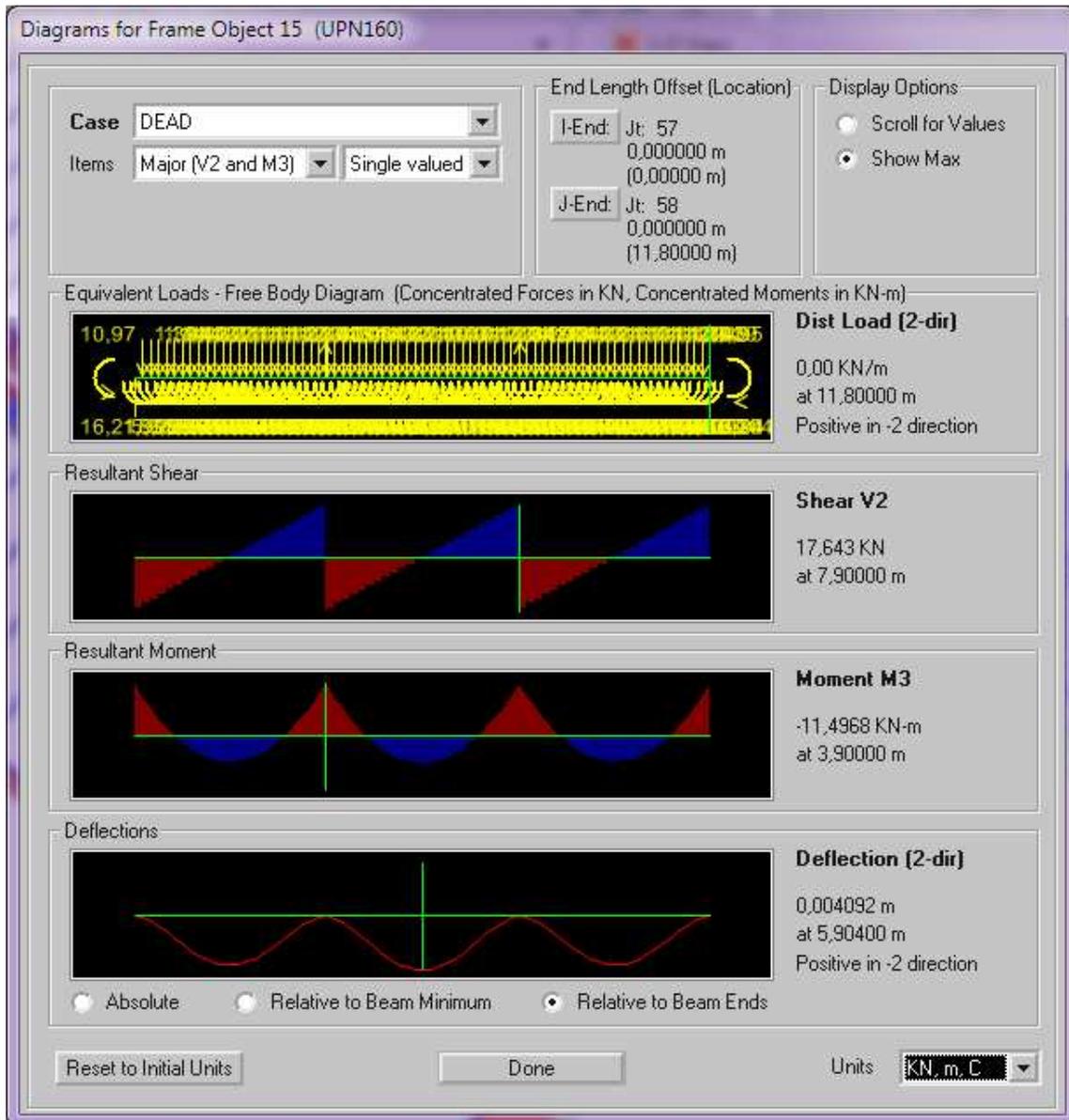


Figura 3.9 Cortantes y momentos flectores máximos sobre una viga (Caso 1)

De esta figura se puede obtener los valores máximos que son necesarios para el posterior cálculo de esfuerzos de la estructura y consecuentemente el factor de seguridad de la viga, estos valores son:

$$|V_{m\acute{a}x}| = 17,6 \text{ [kN]}$$

$$|M_{m\acute{a}x}| = 11,5 \text{ [kN - m]}$$

Una vez obtenidos estos valores, el paso siguiente es realizar el cálculo de esfuerzos y el respectivo factor de seguridad.

3.4.2.3.2. Consideración de un valor de esfuerzo permisible

$$F_b = 0,66 \cdot S_y$$

$$F_b = 0,66 \cdot 248 \text{ MPa}$$

$$F_b = 163,7 \text{ MPa}$$

3.4.2.3.3. Módulo de sección

Este valor se toma de las especificaciones del producto, es decir:

$$S_x = 1,156 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

3.4.2.3.4. Esfuerzo real

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F_b$$

$$f_b = \frac{M_{\text{máx}}}{S_x} = \frac{11,5 \text{ kN} \cdot \text{m}}{1,156 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 99,7 \text{ MPa}$$

Lo cual se comprueba en la figura 3.10:

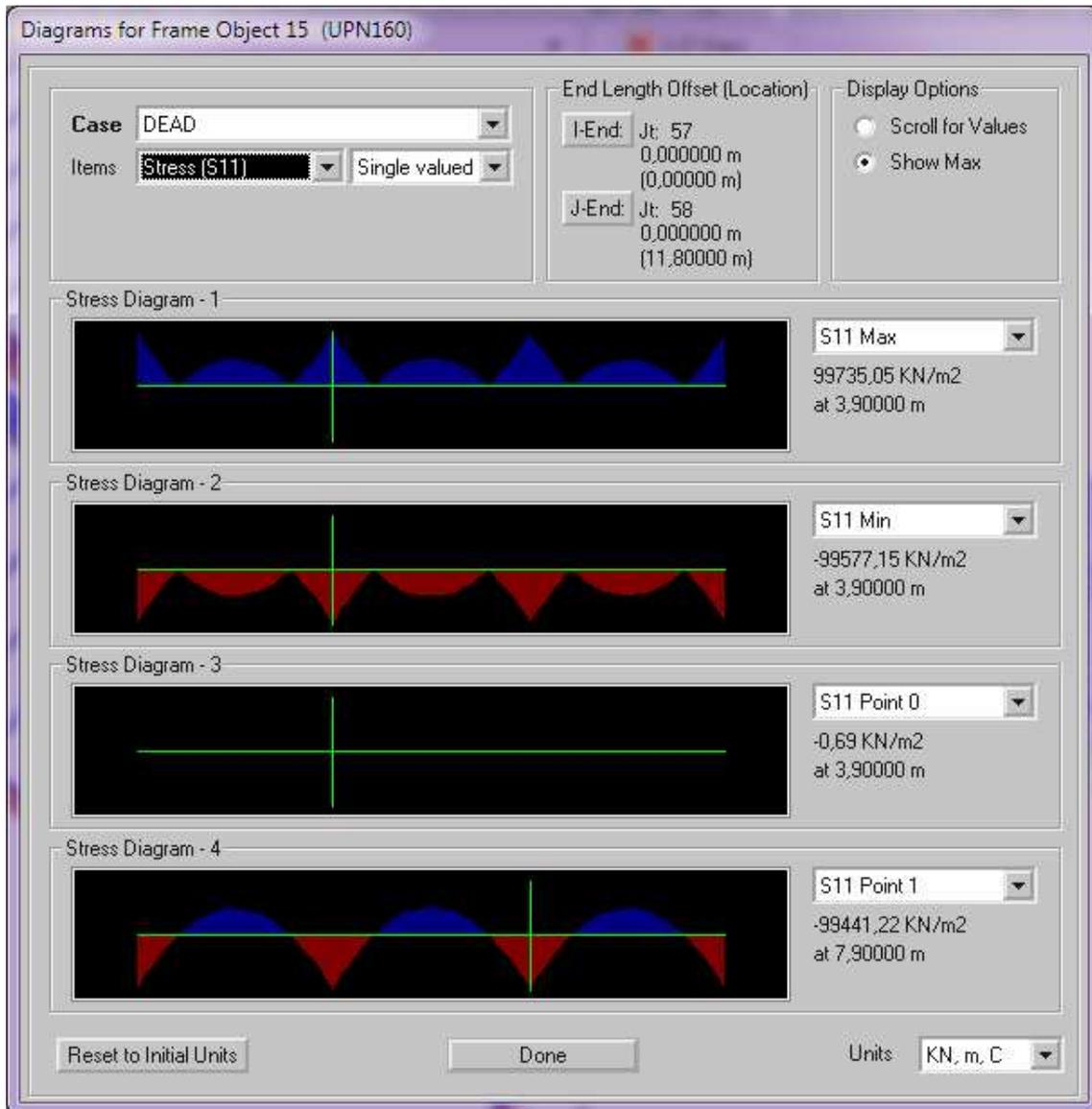


Figura 3.10 Diagrama de esfuerzos de una viga (Caso 1)

3.4.2.3.5. Índice de trabajo

$$I = \frac{f_b}{F_b} = \frac{99,7}{163,7} = 0,61$$

3.4.2.3.6. Comprobación de la deflexión

La deflexión máxima permitida para este caso según AISC 2005, es de:

$$d_{\max} \leq \frac{L}{240}$$

La simulación en SAP2000 dio como resultado una deflexión máxima como se muestra en la figura 3.11:

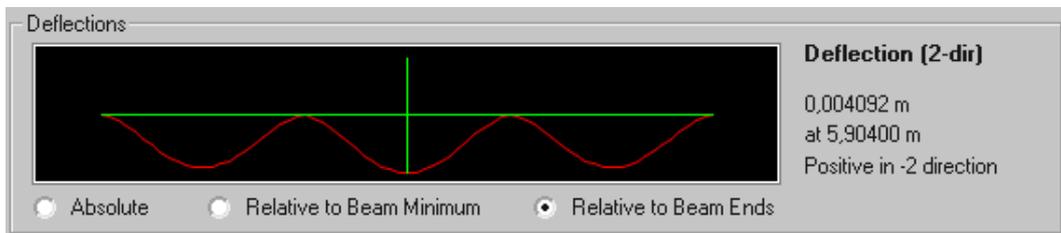


Figura 3.11 Comprobación de la deflexión de la viga (Caso 1)

$$4,1 \text{ mm} \leq \frac{3900}{240}$$

$$4,1 \text{ mm} \leq 16,3 \text{ mm.}$$

3.4.2.3.7. Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{f_b} = \frac{248}{99,7} = 2,48$$

3.4.2.4. Segundo caso - platina

3.4.2.4.1. Carga de operación

La separación como se mencionó anteriormente es de 328 mm entre platinas y la carga que soporta cada platina (ver figura 3.12) se calcula de la siguiente manera:

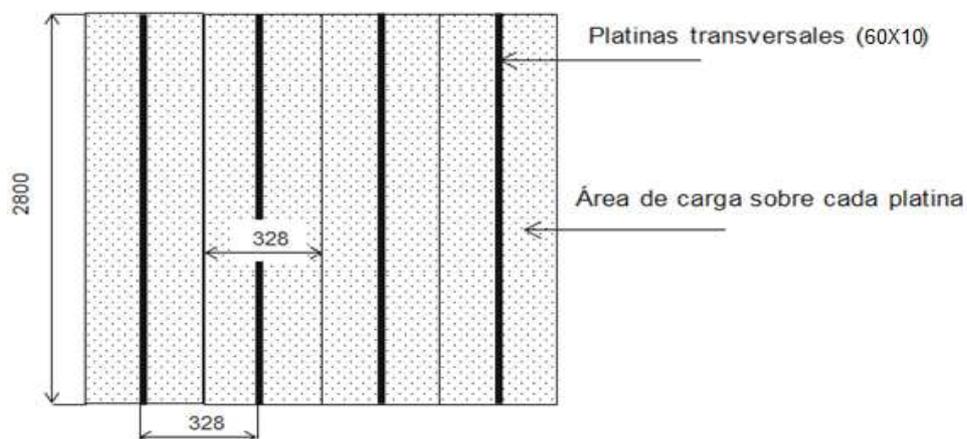


Figura 3.12 Representación de la ubicación de las platinas (Caso 2)

$$q \left(\frac{kN}{m} \right) = \frac{4,59}{2,8} = 3,28 \frac{kN}{m}$$

Por otro lado, el número de platinas cargadas se puede tomar del gráfico que se muestra a continuación y la carga total que soporta la estructura es:

$$Q_T = q \times l_{platina} \times N_{platinas}$$

$$Q_T = 3,28 \times 2,8 \times 11 = 101,6 \text{ kN}$$

La siguiente figura muestra como esta la distribución de la carga:

3.4.2.4.2. Cortantes y momentos flectores máximos sobre las platinas

$$|V_{m\acute{a}x}| = 2,47 \text{ kN}$$

$$|M_{m\acute{a}x}| = 0,48 \text{ kN} - m$$

Una vez obtenidos estos valores, el paso siguiente es realizar el cálculo de esfuerzos y el respectivo factor de seguridad.

3.4.2.4.3. Consideración de un valor de esfuerzo permisible

$$F_b = 163,7 \text{ MPa}$$

3.4.2.4.4. Módulo de sección

$$S_x = \frac{b \cdot d^2}{6} = \frac{0,01 \cdot 0,06^2}{6} = 6 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

3.4.2.4.5. Esfuerzo real

$$f_b = \frac{M_{m\acute{a}x}}{S_x} = \frac{0,48 \text{ kN} - m}{6 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 76,2 \text{ MPa}$$

3.4.2.4.6. Índice de trabajo

$$I = \frac{f_b}{F_b} = \frac{76,2}{163,7} = 0,47$$

3.4.2.4.7. Comprobación de la deflexión

$$d_{\text{máx}} \leq \frac{L}{240} \rightarrow 2,5 \text{ mm} \leq 11,7 \text{ mm.}$$

3.4.2.4.8. Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{f_b} = \frac{248}{76,2} = 3,25$$

3.4.2.5. Segundo caso – viga longitudinal

3.4.2.5.1. Cortantes y momentos flectores máximos sobre las vigas longitudinales (UPN160)

$$|V_{\text{máx}}| = 35,3 \text{ kN}$$

$$|M_{\text{máx}}| = 23 \text{ kN} - \text{m}$$

Una vez obtenidos estos valores, el paso siguiente es realizar el cálculo de esfuerzos y el respectivo factor de seguridad.

3.4.2.5.2. Consideración de un valor de esfuerzo permisible

$$F_b = 163,7 \text{ MPa}$$

3.4.2.5.3. Módulo de sección

Este valor se toma de las especificaciones del producto, es decir:

$$S_x = 1,156 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

3.4.2.5.4. Esfuerzo real

$$f_b = \frac{M}{S} \leq F_b$$

$$f_b = \frac{M_{\text{máx}}}{S_x} = \frac{23 \text{ kN} - \text{m}}{1,156 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 199,5 \text{ MPa}$$

3.4.2.5.5. Índice de trabajo

$$I = \frac{f_b}{F_b} = \frac{199,5}{163,7} = 1,22$$

3.4.2.5.6. Comprobación de la deflexión

$$d_{\text{máx}} \leq \frac{L}{240} \rightarrow 8,2 \text{ mm} \leq 16,3 \text{ mm.}$$

3.4.2.5.7. Factor de seguridad

$$n = \frac{S_y}{f_b} = \frac{248}{199,5} = 1,24$$

Tabla 3.3 Resumen de diseño

Item	Unidad	Caso 1		Caso 2	
		Platina	Viga	Platina	Viga
q	kN/m	1,64		3,28	
QT	kN	105,6		101,6	
Vmax	kN	1,21	17,6	2,47	35,3
Mmax	kN-m	0,23	11,5	0,48	23
Fb	MPa	163,7		163,7	
Sx	m ³	6x10 ⁻⁶	1,156x10 ⁻⁶	6x10 ⁻⁶	1,156x10 ⁻⁶
fb	MPa	38,1	99,7	76,2	199,5
I	1	0,23	0,61	0,47	1,22
dmax	m	1,6	4,1	2,5	8,2
n	1	6,5	2,4	3,25	1,24

CAPITULO 4

EVALUACIÓN Y MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE CORTE - METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL DESARROLLO DE PRUEBAS

4.1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo representa la síntesis de toda la investigación realizada sobre los procesos de corte por plasma y oxiacetilénico, y su objetivo principal es primeramente evaluar y mejorar el funcionamiento del sistema de corte como un paso precedente al desarrollo experimental de las pruebas de corte, para lo cual es necesario constatar el estado inicial del equipo seccionándolo en módulos, para un posterior análisis de cada uno de estos, este diagnóstico sirve como base para materializar las acciones correctivas, una vez ejecutadas las mismas, se asegura el correcto funcionamiento del sistema que es un paso fundamental para la obtención de cortes de la calidad requerida.

La calidad de corte no solo es dependiente de los parámetros que se obtendrán como resultado de este estudio, sino también del correcto funcionamiento del sistema de corte, para evitar vibraciones, desalineaciones factores que inciden en el incremento de las tolerancias geométricas de la pieza resultante.

La metodología experimental de pruebas de corte rigurosamente debe cumplir varias etapas, las cuales son estudiadas siguiendo un orden específico con el fin de abarcar todas las variables operativas de los procesos PAC y OFC, de la siguiente manera, selección del material para cada proceso, preparación de las probetas, selección correcta de consumibles y las pruebas propiamente dichas. Luego de la obtención de la probeta, se aplican criterios de aceptación y rechazo necesarias para la evaluación y calificación de las mismas, con lo que se obtiene una matriz cuantitativa-cualitativa de los procesos, de las que se

extraen los resultados que satisfacen los requerimientos industriales, estos resultados satisfactorios contienen los parámetros deseados.

4.2. EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE CORTE

4.2.1. EVALUACIÓN DE LA MÁQUINA CNC DE CORTE POR PLASMA Y OXIACETILÉNICO DE LA EMPRESA PROMEC S.C.C.

Para la evaluación de los equipos se ha procedido a realizar un estudio de la documentación de los mismos, que vienen a constituirse en manuales, en donde se halla la descripción del funcionamiento y mantenimiento de estos, por ello, son documentos base para verificar el funcionamiento de los equipos.



Figura 4.1 Partes que conforman el sistema de corte tipo pórtico; a) Control numérico computacional (CNC); b) Antorcha de plasma; c) Antorcha de oxiacetilénico; d) Pórtico; e) Generador de plasma; f) Bancadas; g) Mesa de corte.

Estos equipos duales son máquinas con excelente aceptación en la industria ya que con un solo equipo se abarcan todos los espesores posibles de corte. La descripción de las partes de la máquina se indicó en el capítulo II, ver figura 4.1 a continuación se señala los módulos en que se agruparon las mismas:

- Módulo de Control Numérico Computacional (CNC).
- Módulo de corte por arco de plasma.
- Módulo de corte oxiacetilénico.
- Módulo de bancadas y pórtico.

El sistema de Control Numérico Computacional, ya fue descrito en el apartado 2.1, razón por la cual no se realizará un análisis del mismo en los puntos siguientes.

4.2.2. MÓDULO DE CORTE POR ARCO DE PLASMA

4.2.2.1. Descripción de Funcionamiento

El proceso de corte por plasma convencional emplea aire comprimido como gas conductor de la electricidad para transferir la energía de una fuente eléctrica a través de una antorcha de corte al metal que se va a cortar.

El sistema básico de corte por arco de plasma consiste de una fuente de energía, un circuito de arranque del arco, gas para el proceso (aire) y una antorcha. Estos componentes del sistema suministran la energía eléctrica, la capacidad de ionización y el control de procesos necesarios para producir cortes productivos y de alta calidad en diferentes materiales.

La fuente de energía es una fuente de corriente continua (CC). El voltaje en circuito abierto por lo general está en el rango de 200 a 208 VCC. La corriente de salida (amperaje) de la fuente de energía determina la velocidad y la capacidad del espesor de corte del sistema. La principal función de la fuente de energía es suministrar la energía correcta para mantener el arco del plasma después de la ionización.

El circuito de arranque del arco es un circuito generador de alta frecuencia que produce un voltaje CA de 5000 a 10000 (V) a 2 (MHz) aproximadamente. Este voltaje se utiliza para crear un arco de alta intensidad dentro de la antorcha a fin de ionizar el gas, produciéndose de esta manera el plasma.

La antorcha sirve de soporte para los consumibles. Tanto la fuente de energía y el circuito de arranque del arco están conectados a la antorcha por medio de un conjunto de cables y mangueras, A través del mismo se suministra a la antorcha el flujo de gas correcto, la energía eléctrica y la alta frecuencia para que arranque y se mantenga el proceso.

Este módulo se divide en los siguientes sub-módulos:

- Sub-módulo generador de plasma.
- Sub-módulo de alimentación de aire comprimido
- Sub-módulo antorcha de corte por plasma

4.2.2.2. Estado del generador de plasma

El sistema de corte tipo pórtico está equipado con el generador de plasma mecanizado Powermax1650 de Hypertherm con interface CNC. Ver figura 4.2 Una especificación completa de este equipo se muestra en el anexo 2.

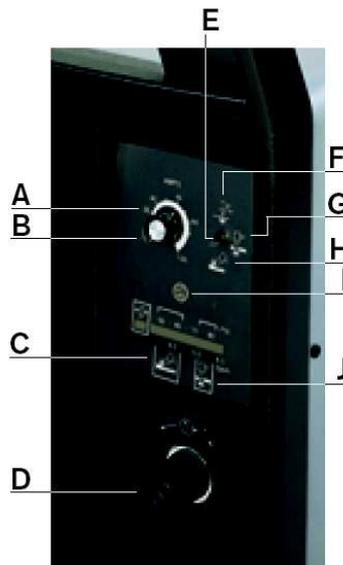


Figura 4.2 Generador de plasma Powermax 1650 – Hypertherm.

4.2.2.2.1. *Apreciación Visual*

- **Exterior.-** El equipo esta en perfecto estado exterior, la perilla de control de salida de corriente, el interruptor selector para el modo de cortar, la perilla para ajuste de presión, el interruptor de potencia, y todos los indicadores luminosos están en buen estado. Ver figura 4.3.

- A: Control de corriente de salida para corte – 30 a 100 amperios
- B: Prueba de gas/posición fijada
- C: Gama de la presión de aire, modo de ranuración
- D: Perilla para ajuste de presión
- E: Interruptor selector para el modo de cortar
- F: Modo de control para el arco piloto
- G: Modo de cortar normal
- H: Modo para ranurar
- I: Indicador de encendido
- J: Gama de presión de aire, modo de corte



Controles e indicadores

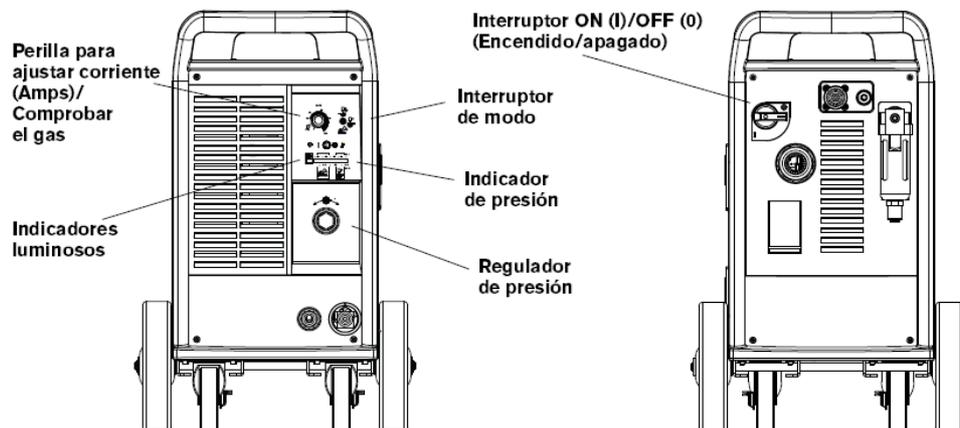


Figura 4.3 Controles e indicadores del equipo de plasma.

- **Interior.-** el equipo no presenta ningún elemento desconectado o en mal estado, se evidencia la presencia de polvo. Los circuitos concuerdan con el diagrama eléctrico descrito en el manual del operador.

4.2.2.2.2. Accesorios

El *Cordón de alimentación a la fuente* se encuentra en perfecto estado, sin daño, ni agrietamiento en su longitud, no presenta roturas o fallas en el conector de potencia ni en el conector para el equipo.

4.2.2.2.3. Controles

Los controles se encuentran en perfecto estado.

4.2.2.2.4. Características técnicas de generador de plasma

Tabla 4.1 Características técnicas del generador de plasma

Voltaje de circuito abierto nominal	300VCC
Salida nominal de corriente	30 A – 100 A, 16kW de salida
Tasa de voltaje de salida estándar de Hypertherm	160 VCC
Capacidad recomendada de corte	12 mm de espesor
Capacidad máxima de corte	19 mm de espesor
Tipo de gas	Aire comprimido
Caudal de aire comprimido que requiere el equipo es de a una presión de 90 psig.	260 l/min

4.2.2.2.5. Constatación de las partes

El equipo en sí registra todas las partes descritas en el manual del operador.

4.2.2.2.6. Diagnóstico

El generador de plasma se encuentra en perfecto estado de funcionamiento, cumple con los parámetros descritos en el manual del operador y se puede llevar a cabo todos los requerimientos corte.

4.2.2.3. Estado del sistema de alimentación de aire comprimido

Uno de los requisitos para crear un arco de plasma es el gas que se va a utilizar en el proceso, que en el presente estudio es el aire comprimido. El sistema de alimentación de aire comprimido para la Hypertherm Powermax 1650 consta de dos componentes, el primero es la generación del aire comprimido que se obtiene vía un compresor el cual se distribuye a toda la planta por medio de una red con distintas conexiones, lo que permite trabajar en distintos sitios con aire mediante las conexiones longitudinales y transversales de la tubería de aire comprimido, una de estas conexiones en la planta esta destinada para la Powermax 1650.

En sistemas de corte por plasma no solo basta asegurar la generación y producción de aire comprimido sino que es de vital importancia la calidad del aire ya que de esto depende la vida útil de los consumibles, es a partir de cumplir con este requisito que se deriva el segundo componente del sistema que es la unidad de mantenimiento FRL (Filtro, regulador, lubricador) instalada en el punto de utilización, la cual se encarga de suministrar aire a la antorcha libre de humedad e impurezas y regulado a la presión requerida, es decir en las condiciones necesarias de utilización.

4.2.2.3.1. Apreciación visual

El sistema con todos sus componentes están en perfecto estado exterior, desde el compresor, la tubería, los drenajes que tienen la función de evacuar el agua condensada se encuentran en perfectas condiciones de operatividad, la unidad de mantenimiento FRL esta funcionando eficientemente.

Un problema que se constató es la existencia de una fuga de aire en el acople que posee el generador de plasma para conectar la manguera de aire comprimido.

4.2.2.3.2. Accesorios

Manguera de aire. Se encuentra en perfecto estado, sin daño, ni agrietamiento a lo largo de toda su longitud, no presenta roturas.

4.2.2.3.3. Características técnicas del compresor y de la unidad de mantenimiento FRL



Figura 4.4 Compresor SCHULZ – SRP3030

Tabla 4.2 Características técnicas de compresor SCHULZ – SRP3030

Marca	SCHULZ	
Modelo	SRP3030	
Presión máx.	160 psig (11 bar)	
Caudal efectivo	$(2690\text{ l}/\text{min})$	
Motor eléctrico 3 \square	hp	30
	kW	22,4
	Hz	60
Voltaje	220/380	

La especificación completa del compresor se muestra en el anexo 3.



Figura 4.5 Unidad de mantenimiento FRL

Tabla 4.3 Características técnicas de la unidad de mantenimiento FRL

Marca	XCPC	
Modelo	XMAC4000-04	
Fluido	Aire	
Presión de prueba	1.5 MPa ($15^{kgf/cm^2}$)	
Presión máx. de trabajo	1.0 MPa ($10^{kgf/cm^2}$)	
Temperatura ambiente y del fluido	5-60 °C	
Grado de filtración	25 μ - 5 μ - 50 μ	
Lubricante recomendado	Aceite de turbina de clase 1 (ISO VG32)	
Material del vaso	Aluminio	
Rango de presión de regulación	0.05 - 0.85 MPa ($0.05 - 0.85^{kgf/cm^2}$)	
Tipo de válvula	Con drenaje	
Ensamblaje	Filtro	XMAF4000
	Regulador	XMAR4000
	Lubricador	XMAL4000
Caudal de aire (l/mim)	4000	
Conexión	1/2	

4.2.2.3.4. Constatación de las partes

El sistema presenta todos los elementos necesarios para garantizar la generación y calidad del aire comprimido.

4.2.2.3.5. Pruebas

- **Verificación de fugas de aire comprimido.** La prueba consiste en la búsqueda de fugas tanto en la manguera de aire como en los distintos acoples que posee el sistema los cuales los encontramos en la unidad FRL y en el generador de plasma.



Figura 4.6 Ubicación de la fuga de aire

Análisis de resultados. De la verificación de fugas existentes se encontró una en el acople del generador de plasma. Esto demuestra que la unidad FRL es fiable. Ver figura 4.6

4.2.2.3.6. Diagnóstico

De las pruebas y visualizaciones efectuadas según lo anotado anteriormente se puede decir que si bien es cierto, el sistema de alimentación de aire comprimido necesita rutinas de mantenimiento y presenta una fuga, se halla todavía en la capacidad de continuar asegurando la filtración del aire comprimido.

4.2.2.4. Estado de la antorcha de corte por plasma mecanizada T100M-2

Es importante mencionar que el movimiento de la antorcha respecto al eje Z depende del movimiento ascendente o descendente del tornillo de fuerza del sistema de levantamiento, Figura 4.7.



Figura 4.7 Sistema de levantamiento

La antorcha ya cumplió su vida útil, tiene 4 años de producción continua de corte.

4.2.2.4.1. *Apreciación visual.*

- **Exterior**, la antorcha se encuentra muy sucia presentando desgaste en sus partes sobretodo en la coraza. La antorcha no se encuentra perpendicular respecto a la pieza de trabajo por ende este factor incide en la calidad y geometría del corte. Ver Figura 4.8



Figura 4.8 Desalineación de la antorcha

4.2.2.4.2. Características técnicas de la antorcha por plasma

- Arranque neumático de arco piloto.
- Tecnología de electrodo Hylife (Larga Vida).
- Consumibles con boquilla protegida.

Antorcha mecanizada T100M-2

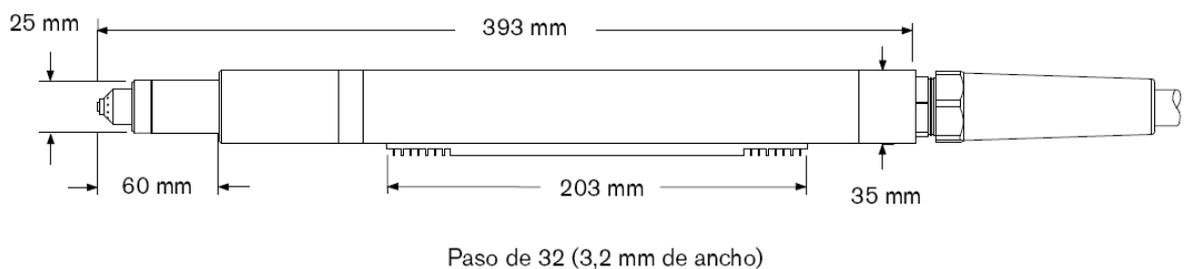


Figura 4.9 Antorcha mecanizada T100M-2

4.2.2.4.3. Constatación de las partes.

La antorcha no presenta el sensor de altura magnético con el que constaba desde la adquisición de la máquina.

4.2.2.4.4. Pruebas

- **Comprobación de la alineación de la antorcha.** Para realizar esta comprobación se procede, en la posición normal de trabajo de la antorcha, a verificar la alineación en los tres planos con la ayuda de un nivel, es decir, en el plano vertical; en el plano horizontal longitudinal y; en el plano horizontal transversal. Figura 4.8

Análisis de resultados. Se comprobó que existe una desalineación de la antorcha en los tres planos.

4.2.2.4.5. Diagnóstico

La antorcha en general esta deteriorada por el uso y la falta de mantenimiento, como se mencionó anteriormente se presentan los siguientes problemas: la antorcha presenta una desalineación general debido a posibles impactos fuertes que desalinearon sus componentes internos, además no presenta el sensor de altura que es indispensable para evitar cortes biselados. Es necesario un mantenimiento general y exhaustivo de la antorcha para que brinde las facilidades necesarias para obtener la calidad de corte requerida.

4.2.3. MÓDULO DE CORTE OXIACETILÉNICO

4.2.3.1. Descripción de funcionamiento

El proceso de corte oxiacetilénico se sirve de una antorcha provista de una boquilla. Las funciones de estas son producir las llamas de precalentamiento mediante la mezcla del acetileno y oxígeno en las proporciones correctas; y suministrar un chorro concentrado de oxígeno de alta pureza a la zona de reacción. El oxígeno oxida el metal caliente y también expulsa los productos de la reacción fundidos, eliminándolos del corte. La boquilla contiene varias salidas para llamas de precalentamiento y un conducto central para el oxígeno de corte.

El equipo consta de un sistema de regulación de oxígeno y acetileno, que provee al proceso el flujo y la presión requerida, la regulación es independiente

tanto para el oxígeno de corte como para el oxígeno de precalentamiento, así como para el acetileno.

La antorcha recibe las mangueras provenientes del sistema de regulación de gases, las mismas que conectan a la antorcha. El flujo de acetileno, oxígeno de corte y precalentamiento son regulados mediante válvulas anti-retorno, inmediatamente después de cada válvula se encuentra un arrestador de llama, colocado en ese lugar por seguridad.

Este módulo se divide en los siguientes sub-módulos:

- Sub-módulo sistema de regulación de gases.
- Sub-módulo antorcha de corte oxiacetilénico

4.2.3.2. Estado del sistema de regulación de gases

4.2.3.2.1. Apreciación visual

El equipo presenta daños en los reguladores de presión tanto en los tanques de oxígeno como en el tanque de acetileno, lo que dificulta la lectura y regulación de la presión que es un factor determinante en el proceso. Ver figura 4.10



Figura 4.10 Sistema de regulación de gases

4.2.3.2.2. *Accesorios*

El área de tanques para almacenamiento de gases tiene como accesorio un regulador de presión por cada tanque, es decir, dos reguladores de oxígeno y un regulador de acetileno.

4.2.3.2.3. *Características técnicas*

Los tanques de gases al ser diseñados para soportar presiones que sean satisfactorias para el proceso y para asegurar la seguridad del entorno, tienen los siguientes valores máximos: para el oxígeno de 2200 [psi] y para el acetileno de 220 [psi].

4.2.3.2.4. *Constatación de las partes*

El equipo en si registra todas las partes descritas en los manuales, no obstante los reductores de presión se hallan en mal estado, el generador de chispa se halla desgastado.

4.2.3.2.5. *Pruebas*

- **Comprobación de fugas de gas en tuberías.** La comprobación que se realizó fue visual y auditiva a lo largo de la tubería partiendo desde la salida de los reductores de presión hasta la entrada a la antorcha, El procedimiento a seguir se muestra a continuación:
 - Asegurarse de que todas las conexiones del equipo estén apretados en concordancia a las instrucciones del fabricante.
 - Asegúrese que las perillas de ajuste de presión en los reguladores estén completamente abiertas (girar anti-horariamente).
 - Cierre las válvulas tanto de acetileno como de oxígeno en la antorcha.
 - Abrir la válvula del cilindro de oxígeno
 - Girar la perilla del regulador de oxígeno en sentido horario hasta que un pequeño valor de presión se registre en el manómetro.
 - Cerrar la válvula del cilindro de oxígeno

- Seguir el mismo procedimiento para el acetileno.
- Use agua jabonosa para detectar las fugas. No usar una llama.

Análisis de resultados. No existen fugas en el sistema.

4.2.3.2.6. Diagnóstico

De las pruebas y la apreciación visual efectuadas según lo anotado anteriormente se puede decir que si bien es cierto el equipo necesita mantenimiento, se halla todavía en la capacidad de continuar brindando el servicio que hasta aquí ofrece.

Los reguladores de presión se encuentran deteriorados debido al mal uso y falta de mantenimiento tanto en el dial lo que impide tomar una lectura de presión adecuada, como en la válvula de regulación. Es necesario un recambio de reguladores para el correcto funcionamiento.

4.2.3.3. Estado de la antorcha de corte oxiacetilénico

4.2.3.3.1. Apreciación visual

La antorcha presenta un deterioro general, el inicio de la llama se ve afectado porque el generador de chispa está desgastado; falta una perilla para la regulación del flujo de acetileno; y presenta una desalineación general de la antorcha, que es un factor que interviene directamente en el proceso. Sin embargo, el deterioro en la antorcha no representa ningún limitante para la producción.

4.2.3.3.2. Accesorios

En la sección de la antorcha se cuenta con un accesorio principal que es la boquilla, además, posee un generador de chispa.

4.2.3.3.3. Pruebas

- **Comprobación de la alineación de la antorcha.** Para realizar esta comprobación se procede, en la posición normal de trabajo de la antorcha, a verificar la alineación en los tres planos con la ayuda de un

nivel, es decir, en el plano vertical; en el plano horizontal longitudinal y; en el plano horizontal transversal.

Análisis de resultados. Se comprobó que existe una desalineación de la antorcha en los tres planos.

4.2.3.3.4. Diagnóstico

La antorcha en general esta deteriorada por el uso y la falta de mantenimiento, como se mencionó anteriormente se presentan los siguientes problemas: el generador de chispa está desgastado; falta una perilla para la regulación del flujo de acetileno; y presenta una desalineación general de la antorcha. Es necesario un mantenimiento general y exhaustivo de la antorcha para que brinde las facilidades necesarias para obtener un corte de la calidad requerida.

4.2.4. MÓDULO DE BANCADA Y PÓRTICO

4.2.4.1. Descripción de funcionamiento

El pórtico consta de un servo-motor AC que controla un reductor. El engranaje de salida del reductor engrana con la cremallera de la bancada y gobierna el movimiento de la máquina a lo largo del eje (X). Ver figura 4.11



Figura 4.11 Partes de la bancada y el pórtico; a) Servo-motor AC; b) Reductor; c) Engrane de salida; d) Rodamientos; e) Bancada.

4.2.4.2. Estado de la bancada y pórtico

4.2.4.2.1. *Apreciación visual.*

El pórtico y las bancadas no presentan daños por desgaste ni por corrosión, al igual que el engranaje de salida y la cremallera, en estos últimos se presencia grasa solidificada y sin lubricación. Presenta buena apariencia en primera instancia y funcionalidad en su desplazamiento.

4.2.4.2.2. *Accesorios.*

Se registran switches limitadores de carrera los cuales limitan el recorrido en las coordenadas X (bancada) e Y (pórtico).

4.2.4.2.3. Características técnicas de la bancada y pórtico.

Tabla 4.4 Características técnicas de la bancada y pórtico

Longitud del pórtico	4 [m]
Longitud de la bancada	12 [m]

4.2.4.2.4. Constatación de las partes.

La bancada y el pórtico presentan todos los elementos descritos en los manuales.

4.2.4.2.5. Pruebas

- **Prueba de desplazamiento del pórtico sobre las bancada (eje X).** Se desplaza el pórtico por toda la longitud de la bancada desde un extremo al otro a la velocidad de desplazamiento máxima.

Análisis de resultados. El desplazamiento del pórtico sobre la bancada evidencia una vibración excesiva. La causa por la que el pórtico vibra al desplazarse, es que las bancadas no están paralelas.

- **Prueba de desplazamiento de las antorchas a través del pórtico (eje Y).**



Figura 4.12 Prueba de desplazamiento de la antorcha a través del pórtico

Con la ayuda del módulo CNC, se desplazan las antorchas en la dirección del eje Y hasta alcanzar la posición extrema, sin embargo en cuestión de segundos las antorchas empiezan a vibrar.

Análisis de resultados. A partir de esta anomalía se concluye que la vibración es atribuida al deterioro de los rodamientos. Ver figura 4.12

4.2.4.2.6. Diagnóstico.

Se encontró que la causa por la que el pórtico vibra al desplazarse, es que las bancadas no están paralelas. Se realizaron mediciones en diferentes puntos para comprobar el paralelismo que existe entre los dos rieles y se comprobó que no están paralelas, existe un desfase considerable, como acción correctiva se va a alinear los dos rieles cuidando su paralelismo con la ayuda de una guía.

Las antorchas presentan vibraciones, efecto que es debido a los rodamientos que ya están dañados, lo cual no satisface la condición de que el movimiento por el pórtico y sea uniforme. Por lo tanto se necesita un desmontaje y remplazó de los rodamientos capaces de solucionar los problemas descritos, esta es una opción muy fuerte a considerar.

Los engranajes de salida junto con las cremalleras no presentan desgaste en sus dientes, lo que si se constata es la grasa solidificada al interior de los dientes de la cremallera, por lo tanto se requiere entonces una limpieza de este mecanismo.

Los switches limitadores de carrera se encuentran funcionando correctamente.

4.2.5. ACCIONES CORRECTIVAS

Con el fin de cumplir los objetivos planteados, una vez determinado el estado de cada módulo el siguiente trabajo es proponer mejoras a los mismos.

En términos generales, los equipos prestan servicios para los cuales fueron adquiridos, toda la información recopilada en el punto anterior ha servido para proponer las ideas y acciones que a continuación se mencionan.

Cuando toda la información necesaria sobre las deficiencias del equipo se ha reunido, se establecen o se ponen las opciones más idóneas para el propósito de corrección, además se ha contribuido con instrucciones de mantenimiento que se presenta a continuación.

4.2.5.1. INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO.

En lo que se refiere al mantenimiento de la máquina se han tomado conceptos básicos de los manuales así como también nuestra contribución basada en los conocimientos que tenemos de los dos procesos, esquematizándola para su fácil comprensión y manejo. De igual forma se presenta a continuación las instrucciones de mantenimiento por cada equipo estudiado.

4.2.5.1.1. Módulo de corte por arco de plasma

Tabla 4.5 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Generador de plasma

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Corte por arco de plasma	Actividad: Inspección y corrección
Sub-módulo: Generador de plasma	Tiempo: 2 horas
INSTRUCCIONES	
<ol style="list-style-type: none"> 1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Poner en posición el interruptor de potencia a OFF. 3) Desconectar la potencia primaria de entrada. 4) Quitar los tornillos que sujetan la tapa del generador de plasma al chasis de la máquina. 5) Limpiar la máquina cada 3-4 meses con una corriente de aire de baja presión seco. 6) Asegurarse de limpiar las tarjetas de circuito impreso y disipadores térmicos. 7) Inspeccionar el enchufe del cordón de alimentación primaria; corregir e indicar anomalías. 8) Inspeccionar el cordón de alimentación primaria con frecuencia; corregir e indicar anomalías. 9) anomalías. 10) Inspeccionar que la pinza de cable de trabajo este bien sujeta a la mesa de trabajo; corregir e indicar anomalías. 11) Conectar al equipo a la línea de alimentación. 12) Encender el equipo. 13) Verificar funcionamiento de los controles e indicadores luminosos del equipo, registrar e indicar anomalías. 	

Tabla 4.6 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Alimentación de aire comprimido

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Corte por arco de plasma	Actividad: Inspección y corrección
Sub-módulo: Alimentación de aire comprimido	Tiempo: 2 horas
INSTRUCCIONES	
<ol style="list-style-type: none"> 1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Poner en posición el interruptor de potencia a OFF. 3) Desconectar la potencia primaria de entrada. 4) Cerrar la válvula de entrada de aire comprimido ubicada antes de la unidad FRL, indicar anomalías. 5) Inspeccionar conexiones de la manguera de aire a la unidad FRL y al generador de plasma; corregir e indicar anomalías. 6) Inspeccionar la manguera de aire comprimido; corregir e indicar normalidades. 7) Verificar funcionalidad el drenaje de condensado de la unidad FRL; indicar anomalías. 8) Inspeccionar el manómetro del regulador de presión; corregir e indicar anomalías. 9) Encender el generador de plasma. 10) Verificar si el indicador luminoso de presión de gas esta iluminado en verde, registrar e indicar anomalías. 	

Tabla 4.7 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Antorcha de corte por plasma

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Corte por arco de plasma	Actividad: Inspección y corrección
Sub-módulo: Antorcha de corte por plasma	Tiempo: 2 horas
INSTRUCCIONES	
1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Poner en posición el interruptor de potencia a OFF. 3) Desconectar la potencia primaria de entrada. 4) Quitar los consumibles de la antorcha; indicar anomalías. 5) Inspeccionar junta tórica de la antorcha, corregir e indicar anomalías. 6) Inspeccionar el cuerpo de la antorcha; corregir e indicar normalidades. 7) Limpiar la antorcha. 8) Inspeccionar el cable de la antorcha; corregir e indicar anomalías. 9) Inspeccionar los conectores de los cables y manguera de la antorcha; corregir e indicar anomalías. 10) Montar la antorcha en su soporte; corregir e indicar anomalías. 11) Verificar que la antorcha este perpendicular a la pieza a trabajar ; ajustar si es necesario 12) Conectar los cables y mangueras de la antorcha a la fuente de energía.	
Para los consumibles	
13) Inspeccionar los consumibles asociados con el arco de plasma. 14) Inspeccionar la boquilla, el desgaste del orificio del arco de plasma; reemplazar si es necesario e indicar anomalías. 15) Inspeccionar el electrodo; reemplazar cuando el agujero en la superficie de emisión tenga 0,8mm o más de profundidad. 16) Ensamblar adecuadamente los consumible a la antorcha.	

4.2.5.1.2. Módulo de corte oxiacetilénico

Tabla 4.8 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Sistema de regulación de gases

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Corte oxiacetilénico	Actividad: Inspección y Corrección
Sub-módulo: Sistema de regulación de gases	Tiempo: 2 horas
INSTRUCCIONES	
1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Seleccionar el regulador que se desea inspeccionar, el procedimiento es para cada regulador. 3) Girar la válvula del regulador rotando la perilla en sentido anti-horario, hasta que este completamente abierta. 4) Cerrar la válvula del cilindro de gas. 5) Cerrar la válvula de gas de la antorcha. 6) Inspeccionar el manómetro por varios minutos. Una caída de presión indica una fuga en la admisión, ajuste la conexión y vuelva a chequear 7) Inspeccionar el manómetro por varios minutos. Un incremento en la presión indica una fuga en la válvula del regulador. 8) Limpiar el regulador únicamente con agua jabonosa y luego secar con telas suaves. 9) Realizar el mismo procedimiento para los otros reguladores.	

Tabla 4.9 Instrucciones de mantenimiento, sub-módulo Antorcha de corte oxiacetilénico

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Corte oxiacetilénico	Actividad: Inspección y Corrección
Sub-módulo: Antorcha de corte oxiacetilénico	Tiempo: 3 horas
INSTRUCCIONES	
1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Cerrar las válvulas de los cilindros. 3) Girar las perillas de los reguladores hasta que este abierta completamente. 4) Abrir las valvulas de gas de la antorcha. 5) Desmontar la antorcha. 6) Inspeccionar los rodamientos de guia. Indicar anormalidades y corregir. 7) Realizar el montaje de la antorcha. 8) Engrasar tornillo sin fin de movimiento vertical. 9) Alinear la antorcha en los tres planos. 10) Realimentar con el suministro de gas.	

4.2.5.1.3. Módulo bancada y pórtico

Tabla 4.10 Instrucciones de mantenimiento, Bancada y pórtico

INSTRUCCIONES DE MANTENIMIENTO	
Módulo: Bancada y pórtico	Actividad: Inspección y corrección
Sub-módulo: Bancada y pórtico	Tiempo: 2 horas
INSTRUCCIONES	
1) Servicios realizados por el personal del área de mantenimiento. 2) Poner en posición el interruptor de potencia a OFF. 3) Desconectar la potencia primaria de entrada. 4) Inpeccionar funcionalidad de los servomotores; indicar anormalidades 5) Inspeccionar las cremalleras y engranajes de salida , indicar anormalidades. 6) Inspeccionar la lubricación de las partes; lubricar si es necesario. 7) Inspeccionar paralelismo entre las dos bancadas; corregir e indicar anormalidades. 8) Inspeccionar los rodamientos que guian el pórtico sobre la bancada; indicar anormalidades reemplazar si es necesario	
Movimiento de la antorcha	
9) Verificar movilidad de las antorchas por el pórtico; corregir e indicar normalidades. 10) Verificar sujeción de las antorchas al pórtico; corregir si es necesario. 11) Inspeccionar los rodamientos guia, reemplazar si es necesario e indicar anormalidades. 12) Realizar una prueba de limites de carrera en la dirección Y; indicar anormalidades. 13) Inpeccionar la lubricacion de dispositivo de levantamiento; lubricar si es necesario. 14) Realizar una prueba de limites de carrera en la direccion Z.	

4.2.5.2. ACCIONES CORRECTIVAS DEL EQUIPO

Una vez realizada la evaluación del sistema de corte, y tomando en consideración los diagnósticos obtenidos, se procede a realizar los ajustes necesarios.

4.2.5.2.1. Módulo de corte por plasma

- **Generador de plasma.** Se realiza una limpieza de los componentes interiores de generador de plasma con la finalidad de eliminar polvo en los circuitos eléctricos. Para esta tarea se empleó un limpiador de contactos y aire a presión. Ver Figura 4.13



Figura 4.13 Limpieza del generador de plasma

- **Sistema de alimentación de aire comprimido.** Haciendo referencia al diagnóstico del punto 4.2.2.3.6, se realizó el ajuste del acople eliminado por completo la fuga de aire.
- **Antorcha de plasma.** Se prosiguió a corregir la desalineación de la antorcha.



Figura 4.14 Desalineación de la antorcha corregida

Tras la alineación de la antorcha no se obtuvieron los resultados esperados, por esta razón, adquirir una nueva antorcha es decisivo, sin embargo, la empresa no está en la capacidad de realizar esta compra, además se propuso la instalación de un sensor de altura porque estos dos factores son claves para tener una calidad de corte, pero no se obtuvieron ninguna de las dos peticiones. Ver figura 4.14

Con estas aclaraciones se van a realizar de este modo las pruebas de corte, cabe resaltar que no se van a tener una calidad de corte considerable ya que el posicionamiento de la altura de la antorcha incide en la perpendicularidad de corte y la generación de escoria y además contando con las malas condiciones de la antorcha los costos operativos serán mucho mayores debido a que la vida de los consumibles se acorta.

4.2.5.2.2. Módulo de corte oxiacetilénico

- **Sistema de regulación de gases.** Las reparaciones de las partes mencionadas en el punto 4.2.3.2.6, deben ser realizadas de manera inminente, es decir, cambio de manómetros nuevos que replacé a los defectuosos.



Figura 4.15 Manómetros antes y después de las acciones correctivas

El cambio de los manómetros proporcionaría una buena lectura de las presiones las cuales son determinantes para obtener la calidad requerida de corte. Ver figura 4.15

- **Antorcha de corte oxiacetilénico.** Dado que el módulo de corte oxiacetilénico cumple con los requerimientos que este tiene para la realización de trabajos externos como internos, el adquirir una nueva antorcha no sería una medida adecuada a tomar, razón por la cual lo más conveniente es realizar mejoras a la ya existente.



Figura 4.16 Acciones correctivas y puesta en marcha de la antorcha de corte oxiacetilénico

Las mejoras realizadas en la antorcha son las mismas que se mencionan en el punto 4.2.3.3.4, para la antorcha de plasma. Ver figura 4.16

4.2.5.2.3. Módulo de bancada y pórtico

Se procedió a alinear las dos bancadas cuidando su paralelismo con la ayuda de una guía con se observa en la siguiente figura, además estas deben estar siempre lubricadas y engrasadas para obtener un desplazamiento suave y sin vibraciones del pórtico. Ver figura 4.17.



Figura 4.17 Acciones correctivas en la bancada; a) Elevación del pórtico; b) Ubicación de la guía de alineación; c) comprobación de desalineación; d) Lubricación y engrasado de las bancadas

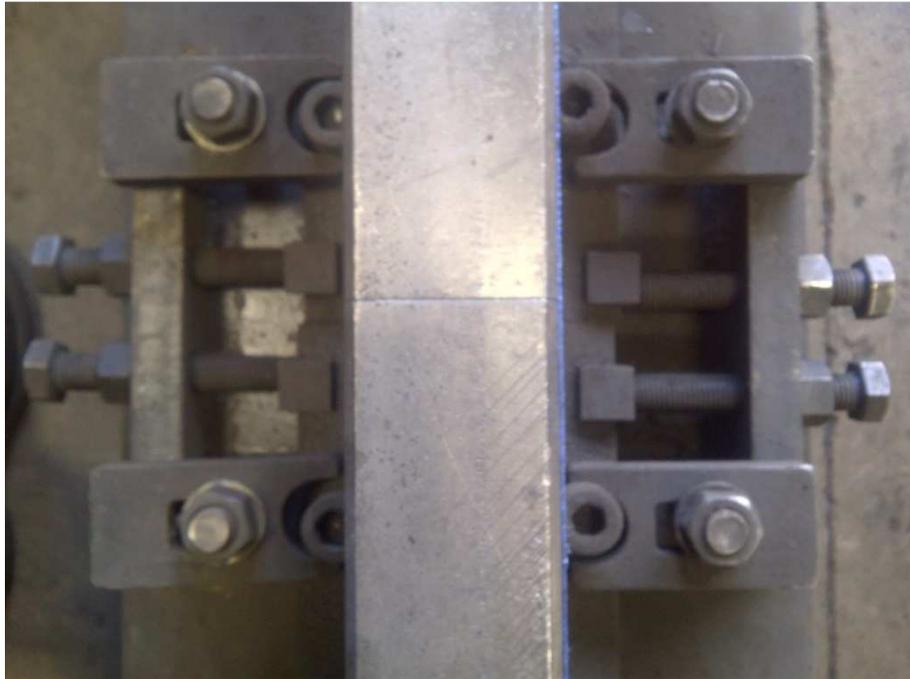


Figura 4.18 Alineación correcta de la bancada

De igual forma identificados los desperfectos y hechas las evaluaciones mencionadas en el punto 4.2.4.2.6, se realizan las siguientes modificaciones en el pórtico.



Figura 4.19 Limpieza y lubricación del pórtico



Figura 4.20 Acciones correctivas sobre las antorchas; a) Limpieza del dispositivo de levantamiento; b) Desmontaje del dispositivo de levantamiento; c) Colocación de rodamientos nuevos; d) Rodamientos defectuosos.

4.3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL DEL DESARROLLO DE PRUEBAS PARA LOS PROCESOS PAC Y OFC

El procedimiento a seguir en el desarrollo de la metodología experimental incluye diferentes fases de trabajo, conforme a las técnicas reportadas en la literatura, así como los conocimientos adquiridos, tomando en cuenta los objetivos del presente estudio y consecuentemente la obtención de resultados favorables. Las etapas realizadas se muestran a continuación en la figura

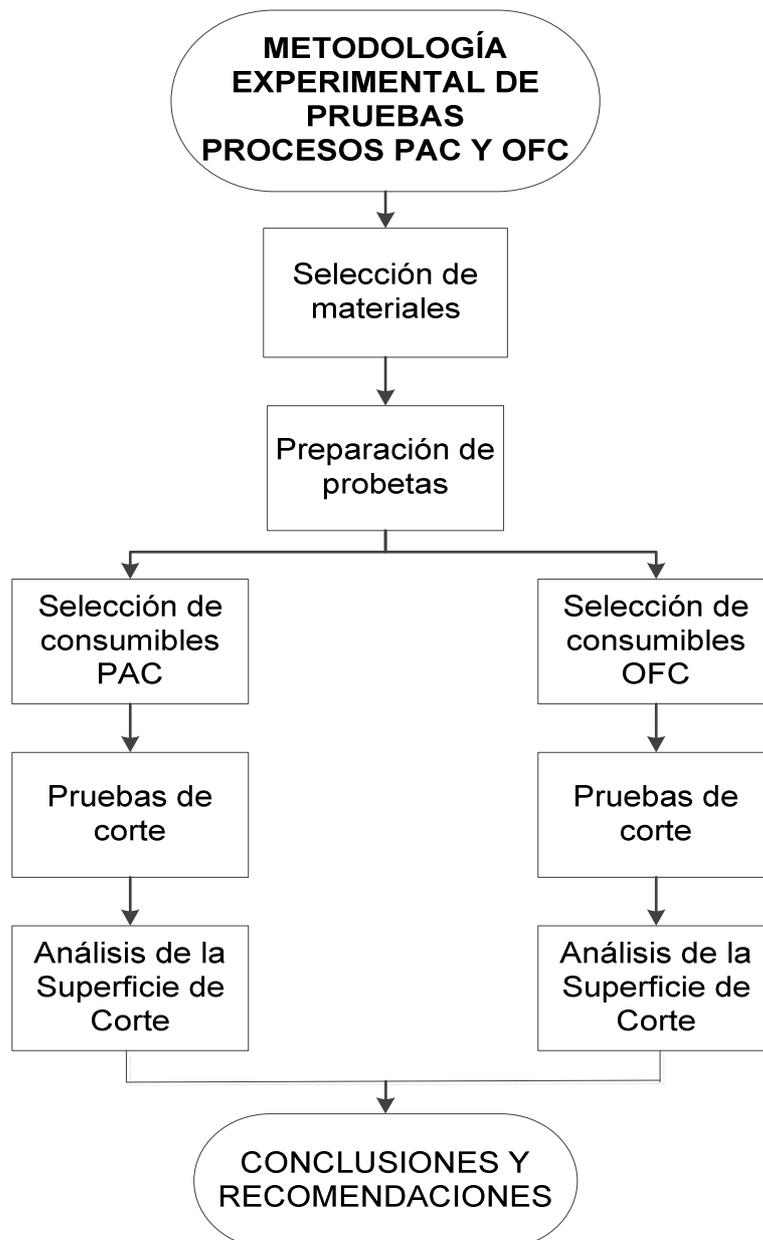


Figura 4.21 Metodología de pruebas para el proceso PAC y OFC.

La figura 4.21 muestra las diferentes fases de trabajo de la metodología experimental. Inicialmente se procede con la selección del material que servirá para la preparación de las probetas; esta última consiste en realizar las mediciones necesarias para asegurar las características dimensionales que debe tener cada probeta, a continuación se realiza la selección de los consumibles de acuerdo al proceso de corte. Una vez agotadas todas las demás etapas del procedimiento se realizan las pruebas de corte registrando los parámetros utilizados. Finalmente se prosigue con la evaluación y calificación de los cortes, para posteriormente analizar su superficie que servirá para establecer y definir cuales son los parámetros de corte que me aseguran la calidad de los mismos para tal material y espesor a cortar.

4.3.1. SELECCIÓN DE MATERIALES

La empresa PROMEC S.C.C para su producción utiliza dos tipos de materiales básicamente, el Acero al Carbono ASTM A36 y el Acero Inoxidable AISI 304. La elección de cada uno de ellos depende de las aplicaciones que posteriormente tendrán los distintos prefabricados.

Los aceros utilizados para el presente proyecto presentan ciertas propiedades que se describen a continuación.

4.3.1.1. Acero ASTM A-36⁹²

El acero ASTM A-36 es un acero de bajo contenido de carbono; el material es el resultado de la composición de elementos químicos; siendo el más importante el hierro y el de menos presencia el carbón, el cual alcanza porcentajes entre el 0,2% y el 0,3% de carbono, lo que facilita el proceso de moldeo del acero.

Una ventaja muy importante del material es que tiene un comportamiento lineal y elástico hasta la fluencia, lo que hace que sea predecible en las estructuras, y por tanto el más usado en la industria.

⁹² ZURITA E.(2012), "Análisis comparativo de la soldabilidad de planchas de acero A-36 soldadas", Pág. 27

4.3.1.1.1. Composición química

Tabla 4.11 Composición química del acero ASTM A-36.

Acero ASTM		Porcentaje						
		C	Fe	Cu	Mn	S	P	Si
A-36	Máx.	0.26	99	0.20	0.8-1.2	0.05	0.4	0.4

4.3.1.1.2. Propiedades mecánicas

Tabla 4.12 Propiedades Mecánicas del acero ASTM A-36.

Acero ASTM	Propiedades Mecánicas				
	Resistencia a la fluencia	Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	% Elongación mínimo	Punto de fusión
A-36	250 - 280 Mpa	400 - 550 Mpa	29000 ksi	20%	1538 °C

4.3.1.1.3. Aplicación

El acero es muy utilizado en construcción de estructuras metálicas, puentes, torres de energía, torres de comunicación y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas, herrajes eléctricos y señalización; por la variedad que presenta y sobre todo por la disponibilidad en el mercado.

4.3.1.2. Acero Inoxidable AISI 304⁹³

Forma parte de la familia de los aceros inoxidables austeníticos, constituido por una aleación de Níquel y Cromo en mayor proporción con un contenido bajo de carbono (0.03% máximo), donde la precipitación de carburos intergranulares es baja, siendo la "L" la denominación en inglés de "Low Carbon" tiene una excelente resistencia a la corrosión a una amplia variedad de medios corrosivos, incluyendo productos de petróleo y gases de combustión, tiene alta ductilidad pero es poco maquinable, es esencialmente no magnético llega a ser levemente magnético cuando ha sido trabajado en frío. El contenido bajo de

⁹³ ALMEIDA Steeve, VILLENA Cecilia, (2009), "Soldadura Fuerte en Acero Inoxidable Austenítico", Pág. 17-18

carbono favorece a la poca precipitación de carburos en la zona afectada por el calor durante la soldadura, su disponibilidad en el mercado es muy grande.

4.3.1.2.1. Composición química

Tabla 4.13 Composición química del acero AISI 304

Grado		Porcentaje						
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
304	Máx.	0.03	2	1	0.045	0.03	18-20.1	8-12

4.3.1.2.2. Propiedades mecánicas

Tabla 4.14 Propiedades Mecánicas del AISI 304

Grado	Propiedades Mecánicas			
	Resistencia a la fluencia	Resistencia a la rotura	Módulo de elasticidad	Elongación a la rotura
304	215 Mpa	505 Mpa	193 – 200 Gpa	70% (en 50 mm)

4.3.1.2.3. Aplicación

Su área de aplicación es muy amplia como en tanques de almacenamiento, pausterización de leche, almacenamiento y fermentación de cervezas, equipos químicos, intercambiadores de calor, equipo de refrigeración, evaporadores, equipo quirúrgico y utensilios, etc.

4.3.2. PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Una vez identificados y seleccionados los materiales se preparan las probetas para los ensayos a los que serán sometidas. El número de muestras necesarias para las pruebas se obtiene de planchas de material proporcionado por la empresa.

4.3.2.1. Tamaño de las probetas

Las dimensiones de las probetas para ensayos de corte térmico de metales por los procesos PAC y OFC no poseen especificaciones, se eligen las siguientes dimensiones que tendrá la probeta para los diferentes espesores siendo una elección de nuestra autoría y que se detallan en la figura 4.22.

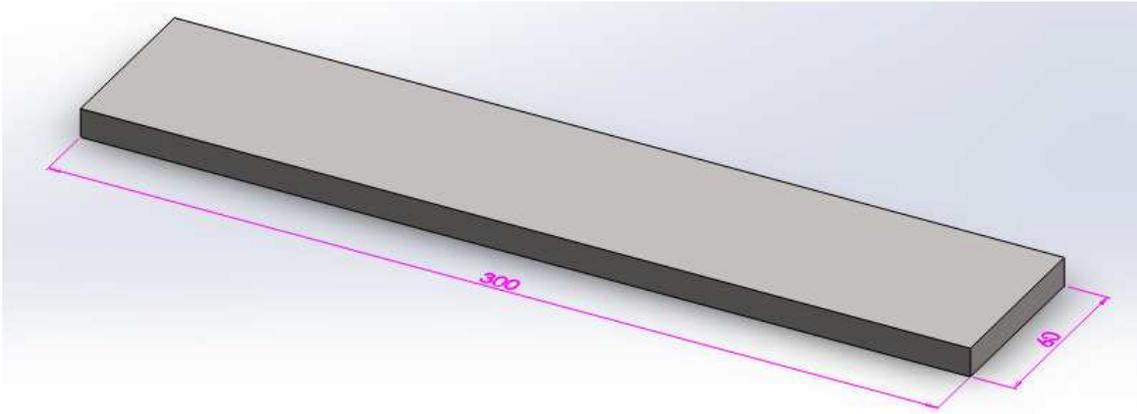
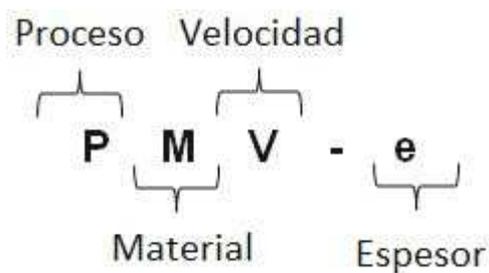


Figura 4.22 Dimensiones de probeta seleccionada para realizar las pruebas.

4.3.2.2. Codificación de las probetas

Para efectuar las pruebas de corte, facilitar el manejo e identificación de las muestras para los diferentes ensayos, se tendrá la siguiente codificación dependiendo del proceso de corte, material, velocidad y espesor.



Donde:

- P = Proceso de Corte: O=OFC, P=PAC.
- M = Material: C=Acero ASTM A36, I= Acero Inoxidable AISI 304.
- V = Velocidad de Corte (mm/min)
- e = Espesor (mm)

4.3.3. CONSUMIBLES PARA EL PROCESO PAC

La calidad de los cortes está directamente relacionada con la selección correcta de los consumibles y del estado de uso, es necesario comenzar todo trabajo con un juego de consumibles nuevo.

4.3.3.1. Selección de consumibles

Para escoger los consumibles adecuados es necesario analizar las condiciones de trabajo y luego determinar la correspondiente configuración que más se adapte a estas condiciones.

Este análisis es relativamente simple, si el operador se habitúa a considerar los siguientes factores:

1. Tipo de material.
2. Espesor de la sección a cortar.
3. Amperajes de corte.

Después de considerar cuidadosamente los factores antes indicados y asegurarse de consultar el manual del operador el cual define cuales consumibles son apropiados para cada tipo de corte, el operador no debe tener dificultad en elegir los consumibles.

En sistemas de corte por plasma los diferentes tipos de consumibles que se tienen van a depender de:

- De la continua renovación de sistemas anteriores con nuevas tecnologías de consumibles patentadas por cada uno de los diferentes fabricantes de sistemas de corte por plasma.
- Del tipo de proceso manual o mecanizado y
- De la tarea a ejecutar si son trabajos de corte o ranurado.

Constantemente se elaboran diseños que cumplan a cabalidad la compleja tarea de formar, constreñir y centrar el arco de plasma para producir un rendimiento de corte superior, visión y objetivo de cada fabricante.

Para nuestro caso específico citaremos los tipos de consumibles del sistema de plasma mecanizado Powermax1650 de HYPER THERM para la antorcha T100M-2.

Existen 4 tipos de consumibles:

- Consumibles de corte con arrastre.
- Consumibles mecanizados.
- Consumibles de ranurado.
- Consumibles FineCut.

4.3.3.1.1. Consumibles de corte con arrastre

Para el corte diario, hace que sea sencillo seguir una línea o plantilla. El escudo frontal de la boquilla también prolonga la duración de la misma para lograr menores costos operativos.

4.3.3.1.2. Consumibles Mecanizados

Se muestran en la figura 4.15 y se clasifican en dos tipos:

- **Consumibles protegidos.** Se emplean para cortes cotidianos, se les denomina protegidos porque la boquilla posee un protector que extiende su vida útil consiguiendo costos de operación bajos.
- **Consumibles sin protección.** Los consumibles sin protección están extendidos para mejorar el acceso a lugares difíciles de alcanzar, con visibilidad de arco excelente cuando se necesita un despeje adicional durante cortes de bisel.

4.3.3.1.3. Consumibles de ranurado

El ranurado por plasma puede reemplazar el esmerilado o el ranurado por arco con electrodo de carbón en muchas aplicaciones de extracción de metales. El ranurado por plasma produce menos ruido y humos que el ranurado por arco con electrodo de carbón, y evita los riesgos de los problemas metalúrgicos relacionados con la contaminación del carbón.

4.3.3.1.4. Consumibles FineCut

Son una adición innovadora a la línea de antorchas de corte por plasma de Hypertherm, trayendo consigo incrementos significativos en la calidad de corte al proporcionar una sangría más angosta, virtualmente sin zona afectada por el calor, reduciendo la escoria. Ver tabla 4.15

Tabla 4.15 Tipos de consumibles Powermax1650 Hypertherm⁹⁴

Tipo de consumible	Tipo de antorcha	Amperaje	Boquilla	Escudo frontal/ deflector	Capuchón de retención	Electrodo	Anillo distribuidor
Corte con arrastre	Manual	40	120932	120929	120928	120926	120925
		60	120931				
		80	120927				
		100	220011	220065	220048	220037	220051
Mecanizado	Mecánica	40	120932	120930	220061 (óhmica)	120926	120925
		60	120931				
		80	120927				
		100	220011	220047	220048 ó 220206 (óhmica)	220037	220051
Sin protección	Mecánica	40	220006	120979	220061 (óhmica)	120926	120925
		60	220007				
		80	120980				
FineCut	Manual	30-50	220329	220325	120928 ó 220061 (óhmica)	120926	220327
	Mecánica	30-50	220329	120979	220061 (óhmica)	120926	120925
Ranurado	Manual/mecánica	60-80	220059	120977	120928	120926	120925
		100	220063	120977	220048	220037	220051

En la tabla anterior se enmarca el tipo de consumible que utiliza la empresa de acuerdo a las necesidades de calidad, productividad y reducción de costos y que serán los usados en el presente estudio.

4.3.3.2. Componentes de una antorcha de plasma mecanizada⁹⁵

Para la mayoría de los sistemas de corte con plasma mecanizado, hay cinco componentes diferentes que constituyen los consumibles de la antorcha, como se muestra en la figura 4.23:

⁹⁴ http://www.hypertherm.com/es/Products/Mechanized_Plasma/Systems/Air_Plasma/powermax1650.jsp

⁹⁵ <http://www.thefabricator.com/article/Array/el-corte-con-plasma-exitoso-depende-de-los-consumibles>

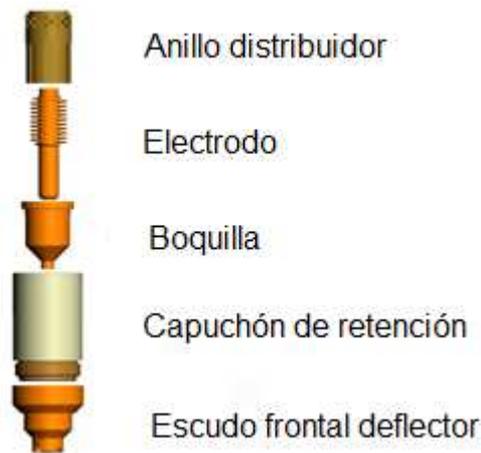


Figura 4.23 Componentes de la antorcha mecanizada T100M-2

4.3.3.2.1. *Escudo frontal deflector*

Con el proceso de corte con plasma se tiende a tener una gran cantidad de chispas y metal fundido, el propósito del escudo frontal deflector es evitar que eso llegue a los consumibles internos, protegiéndolos. En algunos casos, la protección es de arrastre, lo cual significa que permite al operador poner la antorcha directamente sobre el metal sin necesidad de un separador adicional.

4.3.3.2.2. *Capuchón de retención*

Su función básicamente es cubrir y mantener junta la pila de consumibles.

4.3.3.2.3. *Boquilla*

La boquilla hace dos cosas en una. Primero, concentra el arco de plasma, mientras más grande sea el orificio, menos definido o más ancho es el mismo. Las boquillas con un orificio ancho se usan en aplicaciones de acanalado, mientras que algunas tienen orificios muy pequeños que estrechan y enfocan el arco. Éstas últimas se usan para corte detallado de características finas. Segundo, la boquilla ayuda a canalizar el flujo de gas, lo cual también ayuda a dar forma y estrechar el arco.

4.3.3.2.4. *Electrodo*

El electrodo trae la polaridad DC⁻ desde la fuente de energía. Es una pieza delgada hecha de cobre que contiene un inserto plateado de hafnio, metal con un punto de fusión alto el cual sostiene el arco, estos materiales son excelentes conductores de electricidad. La electricidad viene de la máquina hacia la antorcha y entra al bloque del ánodo, con el cual el electrodo está en contacto, y luego enfoca esa carga en el extremo del electrodo a través del inserto de hafnio el cual luego hace arco hacia la placa. La boquilla toma ese arco y lo enfoca en una forma que corta metal.

La boquilla tiende a ponerse muy caliente debido a que está justo en medio del gas súper calentado. Por lo que la parte trasera del electrodo tiene un sistema de enfriamiento por aletas concéntricas que ayuda a transferir el calor del electrodo.

4.3.3.2.5. *Anillo distribuidor*

Canaliza el gas en un par de direcciones diferentes conforme éste llega de la máquina hacia la antorcha. Primero, el gas va hacia adelante en forma de espiral alrededor del electrodo, alrededor del arco, atraviesa la boquilla y sale a través de escudo frontal deflector.

4.3.3.3. Montaje correcto de los consumibles de la antorcha

El montaje debe hacerse cuidadosamente, para asegurarse de que los consumibles se alineen y encajen bien juntos. De este modo se garantiza un buen contacto eléctrico y un flujo adecuado de gas por la antorcha.

La figura 4.24 muestra la secuencia a seguir para el montaje de los consumibles.



Figura 4.24 Montaje correcto de los consumibles

4.3.3.4. Tipo de consumible seleccionado

Tomando en cuenta los aspectos mostrados anteriormente la selección de los consumibles adecuada se realiza de la siguiente manera:

1. De acuerdo a la tabla 4.15, la configuración de consumibles para la antorcha T100M-2 empleados para las pruebas será mecanizado protegidos. La elección se debe a la protección patentada de la boquilla lo cual prolonga la duración de los consumibles y reduce el costo operativo.
2. Una vez determinado el material y el espesor que se va cortar se hace uso de la tabla 4.16.

Tabla 4.16 Valores de amperaje de corte en función del espesor para el proceso PAC

Material	Espesor		Amperaje de corte (amps)
	(inches)	(mm)	
Acero al carbono	10 GA	3	40
	1/4	6	60
	1/2	12	100
	3/4	19	100
	1	25	100
	1 1/4	32	100
Acero inoxidable	14 GA	2	40
	1/4	6	60
	1/2	12	100
	3/4	19	100
	1	25	100
	1 1/4	32	100
Aluminio	1/8	3	40
	1/4	6	60
	1/2	12	100
	3/4	19	100
	1	25	100

Dependiendo del rango en que se encuentra el espesor especificado, se selecciona el amperaje de corte ajustándolo en la perilla de control de salida de corriente del generador de plasma, para posteriormente elegir los consumibles que están diseñados para ese rango de amperaje como se muestra en la figura 4.25.

Configuraciones de consumibles T100M-2

Protegidos

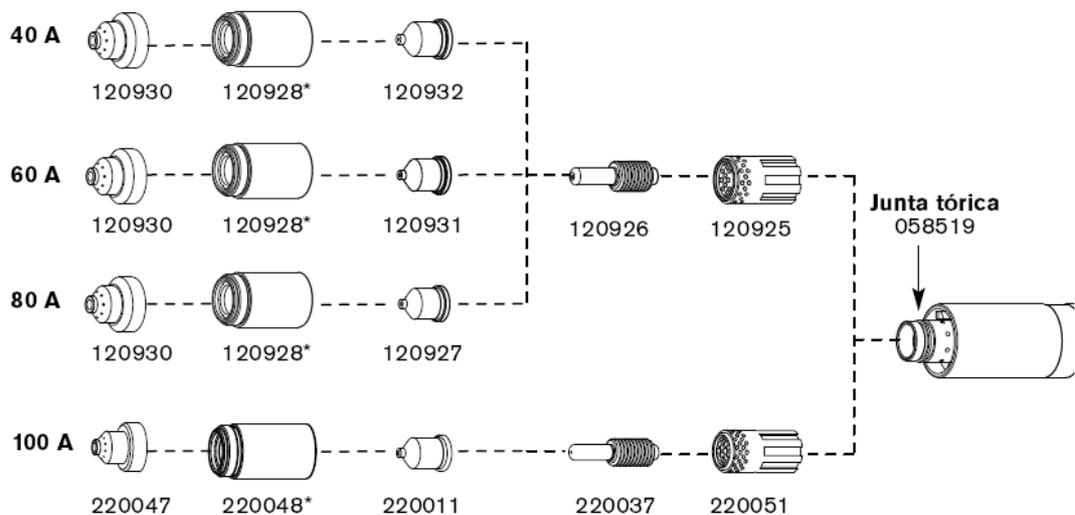


Figura 4.25 Configuración de consumibles T100M-2 protegidos

Por ejemplo, si el material es acero al carbono de 6 mm de espesor el amperaje a fijar en el generador de plasma es 60 A con sus respectivos consumibles de 60 A.

Existe una relación directamente proporcional entre estas tres variables, si se tienen diferentes espesores se fijan distintos amperajes y se deben usar sus correspondientes consumibles.

Es particularmente importante el hacer funcionar a los consumibles al amperaje correcto. La mejor calidad de corte y vida útil de los consumibles generalmente se consigue cuando el amperaje esta correctamente fijado a la capacidad de la boquilla. Si el amperaje es demasiado bajo, el corte será malo debido a que se impide tener un enfoque correcto del arco de plasma creando un surco ancho, y si es muy alto, la vida útil de la boquilla será menor porque se distorsiona el orificio de su punta.

4.3.4. VIDA ÚTIL DEL CONSUMIBLE⁹⁶

La utilización de consumibles genuinos de Hypertherm asegura el rendimiento óptimo del sistema de corte de plasma. El uso de consumibles desgastados al máximo, no solo arruina un pedazo bueno de metal, sino que causan fallas muy caras en la antorcha y tiempo muerto innecesario. El hacer funcionar las piezas hasta que fallen es un error que puede evitarse fácilmente. Hay varias señales de consumibles desgastados que el operador con experiencia puede a menudo, por medio del sonido, o del color del arco, o cambios sutiles en la altura de antorcha darse cuenta del desgaste de las piezas. Ver figura 4.26

⁹⁶http://www.centricut.com/ArticlesSpanish/2Troubleshooting_PAC_systems_Parts_Life_ProblemsSpa.doc/TroubleshootingPACsystemsPartsLifeProblemsSPAN_0406.pdf



Figura 4.26 Deterioro de los consumibles PAC

El electrodo se desgasta lentamente por el calor del arco y por el chorro de alta velocidad de gas de plasma. Durante el desgaste normal se forma un hoyo deprimido en el extremo de la pieza el cual lentamente alcanza una profundidad entre 1 a 3 mm. Cuando el hoyo se vuelve demasiado profundo, el arco se junta al sostén de cobre y lo derrite. El electrodo falla cuando no puede iniciar o sostener el arco.

La boquilla enfoca el chorro de plasma. El hueco en la boquilla debería ser perfectamente redondo y concéntrico. Ambos, el diámetro y la longitud del hueco son críticos; cualquier daño al orificio afectará la forma del arco y por tanto, la calidad de la pieza cortada. El arco de plasma pasa a través de la boquilla sin hacer contacto al material de cobre, porque las paredes de la boquilla están protegidas por una capa difusora de gas que se mueve circularmente. Si el arco hace contacto con la boquilla, derretirá parte de su material. El desgaste normal de la boquilla es un leve chaflán o agrandamiento del hueco en el filo delantero del orificio. Algún daño ocurre en el frente de la pieza durante cada encendido del arco, lo cual causa decoloración alrededor del orificio. Pueden acumularse depósitos de óxido de hafnio en la superficie interior causando trastorno en el flujo de gas. La boquilla falla cuando ya no puede producir un arco recto y un corte perpendicular y limpio.

La vida útil normal de las piezas para los sistemas modernos de aire es de 1 a 2 horas de tiempo de arco y varios cientos de perforaciones.

4.3.4.1. Averías comunes

El primer paso para resolver el problema de la vida útil de los consumibles es examinar las piezas completamente y determinar cual pieza falló. Usualmente las partes proporcionan indicaciones visibles de la razón de su destrucción. Hay tres casos posibles:

4.3.4.1.1. Caso 1: Electrodo malo/boquillas mala

Si la inspección de las piezas revela que el electrodo y la boquilla están muy desgastados, es probable que el electrodo causo daño a la boquilla. Como el electrodo está antes de la boquilla, causará daño a la misma cuando material derretido sale estallando de extremo de la pieza y se deposita en el interior de la boquilla. A la larga, todas las piezas fracasan de esta manera.

- Si el electrodo tiene marcas pequeñas como viruela en todo el extremos de la pieza con daño correspondiente al interior de la boquilla, esto implica flujo bajo de gas. El flujo bajo de gas permite arcos sin control entre la boquilla y el electrodo. Verifique el flujo de gas a la antorcha. Una manera de hacer esto es de sentir el flujo del gas en la salida de la antorcha con solo el gas de plasma encendido. Usted deberá sentir un flujo circular del gas el cual tiene, en realidad, una fuerza de succión.
- Si el electrodo tiene una capa gruesa de residuo negro, verifique que no haya contaminación de gas. Una manera rápida de verificar es la de la prueba de la toalla de papel. Sostenga una toalla de papel limpia debajo de la antorcha con el gas fluyendo a través del sistema. No debería haber ninguna señal de humedad o contaminación.

4.3.4.1.2. Caso 2: Electrodo bueno/boquilla mala

Si el electrodo aparece virtualmente nuevo y la boquilla está muy averiada, la causa más probable de la falla es arco doble de la boquilla. Esto ocurre si el arco hace contacto con la boquilla y carcome el material de cobre del orificio.

- Daño al interior de la boquilla tal como una ranura o una forma de hueco indica baja presión en la cámara de plasma. Esto permite que el arco se

adhiera a la boquilla. Verifique que no haya escapes en las líneas de gas, presurizando las líneas y usando agua jabonosa en todos los acoples.

- Daño al interior de la boquilla indica a menudo un problema con la distancia entre la antorcha y la pieza de trabajo. Primero verifique la altura de perforación; debería ser dos veces la altura de corte para evitar salpicaduras del metal. El perforar desde poca altura es la causa número uno de la destrucción prematura de la boquilla. Verifique la operación apropiada del control de la altura de la antorcha. Si la antorcha perfora cuando se la empuja contra la placa, o raspa la placa durante el corte, la boquilla será destruida instantáneamente.

4.3.4.1.3. Caso 3: Electrodo malo/boquilla buena:

Si la boquilla esta en buena condición pero el electrodo tiene un hoyo concéntrico profundo, el flujo del gas puede estar demasiado alto. Si el gas plasma gira demasiado intensamente, el elemento se carcome con velocidad. Esto causa un patrón de desgaste profundo rápido.

4.3.5. CONSUMIBLES PARA EL PROCESO OFC

Las boquillas deben cumplir con las siguientes condiciones: operación de corte a alta velocidad, una operación de corte estable y segura, y un consumo de gas eficiente. El oxígeno de precalentamiento y el gas se mezclan en la cámara mezcladora en la boquilla.

Una boquilla de alta velocidad utiliza un inserto de acero inoxidable en el conducto del oxígeno de corte, garantizando una prolongada vida útil.

En operaciones de corte son particularmente vulnerables a explosiones y otros accidentes no deseados, cualquier llama pequeña o retroceso de llama deben ser evitados.

4.3.5.1. Selección de boquillas

Las boquillas deben asegurar que la llama de precalentamiento y oxígeno de corte sean bien definidas para asegurar la calidad. Además deben ayudar a prevenir daños causados por retrocesos de llamas en la antorcha. Las boquillas están diseñadas particularmente para cada tipo de gas, lográndose la mayor eficiencia y presión de corte.

Hay cuatro decisiones necesarias para seleccionar la boquilla adecuada:

- Tipo de gas a ser usado con el oxígeno.
- Tipo de asiento donde va a ser colocada la boquilla (marca y modelo de la antorcha).
- Espesor del material a ser cortado.
- Tipo de aplicación (automatizada o manual).

A continuación se describe cada una de las anteriores.

4.3.5.1.1. Tipos de gas

Hay cinco tipos de gases que se pueden usar en las operaciones oxicom bustibles. Las boquillas están diseñadas con orificios de diferentes tamaños y formas para que la mezcla de oxígeno/gas combustionen.

El acetileno es el más versátil y alcanza la mayor temperatura de todos los gases, ya que es fácil de usar para todos los propósitos. El tiempo de precalentamiento es relativamente pequeño debido a que la llama alcanza temperaturas entre 3100 y 3200°C. Este gas también es el más costoso y no es el más eficiente para calentar áreas extensas. Además, en el mercado existen gases como: MAPP (metal acetileno propileno), propileno, propano y gas natural.

4.3.5.1.2. Tipo de asiento

Una vez que el gas ha sido seleccionado, es necesario seleccionar el modelo correcto de boquilla. Conociendo la marca y modelo de la antorcha con la que se cuenta, la boquilla se selecciona rápidamente. Hay que asegurarse del gas

que se utiliza ya que la mayoría de equipo se asume que utilizan acetileno. Este paso es muy importante por consideraciones de seguridad. Si este paso es omitido puede resultar en daños en el equipo o una fuga de gas.

4.3.5.1.3. Espesor del metal

El espesor del metal que va a ser cortado es de suma importancia debido a que el agujero central de la boquilla de corte está diseñada apropiadamente para una cantidad de oxígeno y un valor de presión para cierto rango de espesores. Los agujeros de precalentamiento están también dimensionados para manejar la cantidad apropiada de la mezcla de gases para calentar un espesor dado de metal adecuadamente.

4.3.5.1.4. Tipo de aplicación

Las boquillas están diseñadas específicamente para las aplicaciones en las cuales van a ser utilizadas. Puede tratarse de un proceso manual o automatizado, en el primer caso las boquillas se conocen como de baja velocidad ya que son utilizadas en procesos manuales, sin embargo, para procesos automatizados, las boquillas son diseñadas para ser empleadas a elevadas velocidades y para altas presiones de corte, factores que permiten cortes rápidos, limpios y más precisos.

4.3.5.2. Tipo de boquilla seleccionada

Tomando en cuenta los aspectos mostrados anteriormente la selección de la boquilla adecuada se realiza de la siguiente manera:

1. Como ya están determinados los gases del proceso como oxígeno y acetileno, el campo de selección se reduce a boquillas para acetileno.
2. El equipo utiliza una antorcha de la marca Koike, por lo tanto, las boquillas deben ser de esta misma marca que tiene un asiento especial como se muestra a continuación.



Figura 4.27 Boquilla de corte OFC

3. Conociendo la marca de la boquilla, el paso siguiente consiste en determinar si el proceso es manual o automatizado, para el presente estudio se utiliza un equipo automatizado, la marca de la boquilla define un código para baja, media y alta velocidad, por lo tanto, la selección para un proceso automatizado es una boquilla de alta velocidad diseñada específicamente para tal uso. Ver figura 4.27
4. Una vez determinado el tipo de proceso y conociendo previamente el espesor que se va a cortar se hace uso de la tabla que se muestra a continuación, dependiendo del rango en que se encuentra el espesor especificado, se selecciona el número de boquilla diseñada para ese rango.

Tabla 4.17 Tabla para seleccionar la boquilla correcta⁹⁷

102D7 • Boquilla Divergente Alta Velocidad



Pulgadas

Espesor Placa	No Boquilla	Velocidad Corte in/min	Oxígeno Corte	Oxígeno Pre calentamiento*	Gas PSIG	Ancho Sangría
1/8	00	31.5	100	20	2.8	0.03
1/4	0	29	100	30	2.8	0.04
3/8	0	27	100	30	2.8	0.05
1/2	1	25	100	40	2.8	0.05
3/4	2	22	100	45	2.8	0.06
1	2	20	100	45	2.8	0.07
1 1/2	3	18	100	45	2.8	0.08
2	4	16	100	45	2.8	0.10
2 1/2	5	14	100	55	3.6	0.11
3	5	12.5	100	55	3.6	0.11
4	6	10	100	55	4.3	0.13
5	6	9	100	55	4.3	0.14
6	7	7	100	65	4.3	0.14
8	7	5.5	100	65	4.3	0.18
10	8	4	100	65	5.7	0.20
12	8	3	100	65	5.7	0.24

Métrico

**Preheat oxygen pressure for 3 hose torch only*

Espesor Placa	No Boquilla	Presión kg/cm ²		Consumo NI/hr			Velocidad Corte mm/min
		Oxígeno	Gas Combustible	Oxígeno Corte	Oxígeno Pre calent	Gas Combustible	
5	00	7.0	0.2	750	520	470	750
5 - 10	0	7.0	0.2	1100	520	470	750 - 680
10 - 15	1	7.0	0.2	2500	600	550	680 - 600
15 - 30	2	7.0	0.2	3800	600	550	600 - 500
30 - 40	3	7.0	0.2	5400	600	550	500 - 450
40 - 50	4	7.0	0.2	7300	750	680	450 - 400
50 - 100	5	7.0	0.25	10000	860	780	400 - 260
100 - 150	6	7.0	0.3	14000	950	860	260 - 180
150 - 250	7	7.0	0.3	22000	1330	1210	180 - 100
250 - 300	8	7.0	0.4	35000	1600	1450	100 - 70

4.3.5.3. Vida útil de la boquilla

Al igual que para el proceso PAC, es necesario que se utilicen las boquillas de la misma marca de la antorcha (Koike) que presentan el rendimiento óptimo, costo operativo mínimo y calidad de corte correcta.

Sin embargo, en comparación con el proceso PAC, la vida útil de las boquillas para OFC es mucho mayor, de las observaciones in situ se puede decir que la

⁹⁷ http://www.koike.com/PDF/GasCuttingTip_Spanish.pdf

vida útil de las boquillas esta entre 20 a 25 horas. La figura 4.28 muestra cuando las boquillas deben ser remplazadas.

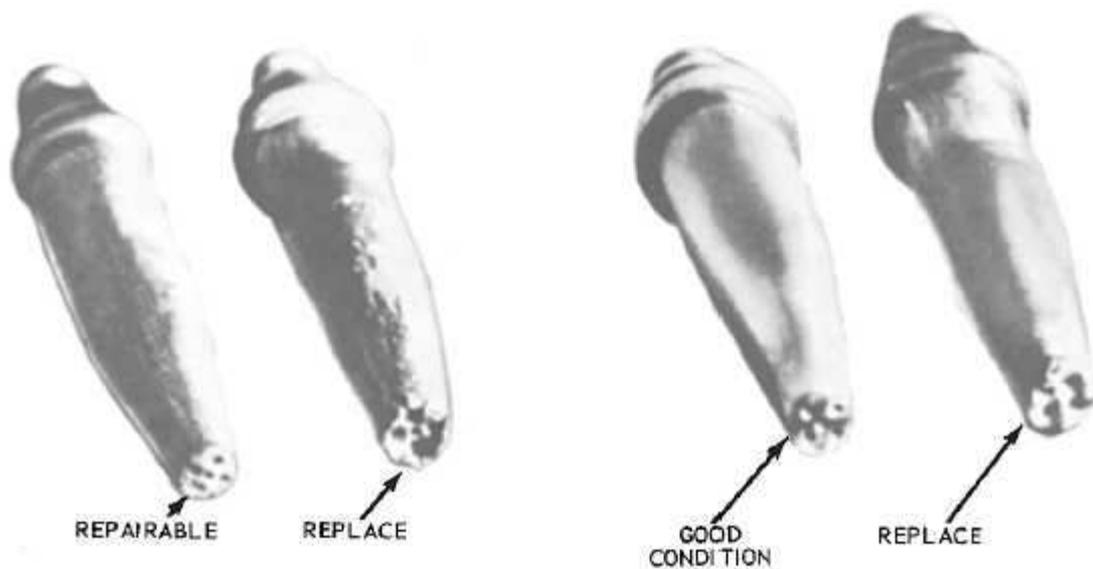


Figura 4.28 Deterioro de las boquillas OFC⁹⁸

4.3.6. PRUEBAS DE CORTE TÉRMICO DE METALES

Para encontrar los parámetros de corte se utilizará el método de prueba y error, como se muestra en la figura 4.29. La configuración para realizar las pruebas se realizó tomando como base datos encontrados en la literatura, propiamente dicha del manual del operador del generador de plasma con respecto al PAC y en lo que concierne al proceso OFC de las tablas de corte proporcionadas por el fabricante de consumibles, en donde en ambos casos encontramos recomendaciones de velocidades de corte dependiendo del espesor y del tipo de consumible a emplear.

⁹⁸ http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14250_ch5.pdf



Figura 4.29 Forma de ensayo de probetas

4.3.6.1. Aspectos fundamentales de la práctica del corte.

4.3.6.1.1. Corte por arco de plasma

En la presente descripción de la práctica no se indica la secuencia de los pasos a seguir para cortar, sino que se dará mayor énfasis en aquellos puntos básicos para obtener un corte exitoso.

Es de suma importancia considerar en la práctica de cortes por plasma los siguientes puntos:

- Verificar que la superficie de corte no presente impurezas ni óxidos con el fin de evitar la generación de escoria.
- Asegurarse de que se usen los consumibles apropiados y que no estén desgastados.
- Colocar la antorcha perpendicular con la pieza a cortar.
- Se debe cuidar que la distancia de la antorcha a la pieza de trabajo sea la apropiada.

- Durante el proceso de corte es muy importante ajustar la velocidad según sea necesario con el propósito de evitar la formación de escoria.

4.3.6.1.2. Corte oxiacetilénico

Al igual que para el proceso de corte por plasma hay pasos básicos que se deben seguir a fin de obtener cortes de calidad, pudiendo mencionarse los siguientes:

- La correcta regulación de la llama de precalentamiento es fundamental ya que de esta manera se obtiene la temperatura máxima e idónea para mantener el corte y lograr bordes adecuados sin derretimientos excesivos. La forma correcta de regulación de la llama se menciona en el punto 2.2.3.5.1
- La composición del material es un factor determinante en la calidad final del corte, si los elementos aleantes son excesivos el corte tendrá más complicaciones.
- La boquilla debe estar libre de óxidos y escorias para obtener un corte adecuado.

4.3.6.2. Parámetros de evaluación y calificación

Básicamente se trata de relacionar los parámetros de entrada del proceso, su forma de interacción y la incidencia de estos en los parámetros de salida. En definitiva si sabemos cuales son las variables a controlar hecho que es posible a través de la comprensión del fenómeno, entonces podemos predecir los resultados.

La inspección visual como herramienta de evaluación de la calidad de los cortes es de gran importancia en la obtención de resultados satisfactorios desde el punto de vista productivo y de calidad en los proyectos de construcción. Se requiera una técnica afinada, como conocimientos sólidos del proceso, que deben ser conocidos y correctamente aplicados.

Utilizada en forma correcta, la inspección visual tiene elevadas posibilidades de detectar y corregir inconvenientes oportunamente, mejorando el proceso.

Para evaluar las probetas se procederá a inspeccionarlas, identificando los parámetros de salida ya que representan el nivel de defectos presentes en el corte, descartando las probetas defectuosas, para luego de un procesamiento de datos obtener la información necesaria de los parámetros de entrada que intervinieron en dicho resultado, para proseguir con la toma de decisiones respecto a la regulación de los mismos para la corrección de dichos defectos y así obtener las condiciones satisfactorias para un corte de calidad.

4.3.6.2.1. Criterio de aceptación

La calidad de corte se evalúa luego de realizar los cortes térmicos mediante la inspección visual de las probetas ensayadas, tomando en cuenta su apariencia superficial, la presencia de defectos, escoria adherida, rapidez, etc.

Todos los cortes deben ser inspeccionados visualmente y serán aceptables si los criterios de la Tabla 4.18 son satisfechos.

Tabla 4.18 Criterio de aceptación de la inspección visual

Criterio de aceptación	OFC	PAC
Excesivo ángulo de bisel El ángulo de bisel será menor o igual a 8°.		X
Formación de escoria Aunque siempre se producirá alguna cantidad de escoria, se permite únicamente la producción de escoria de fácil remoción.	X	X
Buena apariencia de la superficie de corte Debe observarse una superficie sin asperezas dando como resultado un corte liso.	X	X
Fusión del borde superior Un derretimiento leve es normal del proceso.	X	

Nota: Una "X" indica aplicabilidad para el tipo de proceso de corte

4.3.6.3. Proceso de evaluación y calificación de probetas

La figura 4.30 muestra los pasos a seguir en la calificación de las pruebas de corte que se realizaron con los dos procesos.

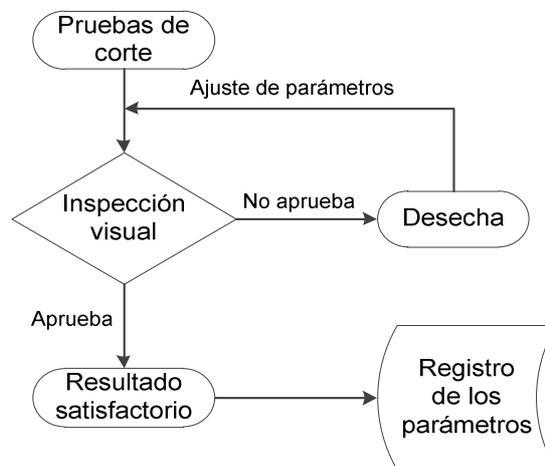


Figura 4.30 Proceso seguido en la evaluación y calificación de los cortes térmicos

Luego de efectuados los cortes térmicos para los distintos espesores evaluamos los resultados obtenidos basándonos en los criterios de inspección visual, de esta manera seleccionamos la probeta que cumplirá a cabalidad con todas las características de un corte de calidad. Este resultado final contendrá los parámetros óptimos de corte que definirán procedimientos de operación y técnicas seguras para conseguir calidades de corte requeridas en los diferentes espesores ensayados cumpliendo con el objetivo de este proyecto.

4.3.6.4. Metodología experimental de pruebas

La metodología que se utilizó para lograr obtener los parámetros requeridos de corte fue la siguiente, primero se realizó un corte con los parámetros manejados hasta ese momento por la empresa, tomando en cuenta como se seleccionaban las distintas variables operativas, la elección y utilización de los consumibles, requerimientos mínimos de mantenimiento de la máquina. Todo esto, ayuda para acondicionar la máquina, y principalmente observar los diferentes defectos, estudiar sus causas y su subsecuente solución.

4.3.6.5. Registro de pruebas de corte

En el registro de prueba anotamos y evaluamos todos los aspectos a tomar en cuenta en una prueba de corte que van desde el: material, equipo, perfil del corte, parámetros, y su respectiva evaluación de los defectos que se pueden presentar. Toda la información de las pruebas de detalla en el anexo 4.

4.3.6.6. Matriz cuantitativa-cualitativa del proceso experimental

Finalmente después de aplicar criterios adecuados de solución de defectos obtenemos los mejores y más eficientes resultados que se muestran resaltadas en las matrices siguientes.

Por medio de estas matrices se evalúan todos los aspectos involucrados con el objetivo de obtener el mejor corte en cada caso con los parámetros adecuados. Las matrices están evaluadas por el tipo de material, espesor y entre procesos de corte. Se muestran en las tablas 4.19, 4.20 y 4.21

Tabla 4.19 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso PAC, para acero ASTM A-36

Probeta	Parámetros de entrada			Parámetros de salida			Observaciones
	Velocidad corte [mm/min]	Altura de la antorcha [mm]	Amperaje [A]	Escoria	Ángulo de bisel [°]	Apariencia superficial	
PC1820-2,5	1820	5	33	SI	16	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC1740-2,5	1740	5	32	SI	15	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC1600-2,5	1600	3	23	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC1450-4	1450	6	36	SI	30	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC1320-4	1320	5	34	SI	16	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC1210-4	1210	3	24	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC1250-6	1250	3	32	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC1136-6	1136	2	38	SI	23	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC940-8	940	6	35	SI	12	LISA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC860-8	860	3	36	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC750-8	750	2	35	SI	20	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PC630-10	630	3	34	NO	7	LISA	Corte correcto.
PC655-12	655	4	51	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC480-15	480	3	55	NO	6	LISA	Corte correcto.
PC320-20	320	4	53	NO	7	LISA	Corte correcto.

Tabla 4.20 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso PAC, para acero inoxidable AISI 304

Probeta	Parámetros de entrada			Parámetros de salida			Observaciones
	Velocidad corte [mm/min]	Altura de la antorcha [mm]	Amperaje [A]	Escoria	Ángulo de bisel [°]	Apariencia superficial	
PI2030-2	2030	7	33	SI	19	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI1670-2	1670	6	32	SI	15	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI900-2	900	3	22	NO	6	LISA	Corte correcto.
PI980-4	980	6	36	SI	15	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI850-4	850	5	34	SI	16	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI700-4	700	3	24	NO	7	LISA	Corte correcto.
PI875-6	875	3	38	NO	6	LISA	Corte correcto.
PI680-6	680	1,5	40	SI	20	ÁSPERA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI670-6	670	2	40	SI	20	LISA	Consumibles desgastados, antorcha mal alineada, amperaje incorrecto.
PI650-8	650	3	35	NO	6	LISA	Corte correcto.
PI335-10	335	3	33	NO	6	LISA	Corte correcto.
PI300-12	300	3	34	NO	6	LISA	Corte correcto.

Tabla 4.21 Matriz cuantitativa-cualitativa proceso OFC, para acero ASTM A-36

Probeta	Parámetros de entrada			Parámetros de salida			Observaciones
	Velocidad corte [mm/min]	Presión oxígeno [psi]	Presión acetileno [psi]	Escoria	Borde superior	Apariencia superficial	
OC346-6	346	70	12	SI	REDONDEADA	ÁSPERA	Corte excesivamente áspero
OC360-6	360	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC371-6	371	85	10	SI	REDONDEADA	ÁSPERA	Borde muy redondeado
OC351-10	351	85	10	SI	SOBRESALIENTE	ÁSPERA	Excesiva presencia de escoria
OC300-10	300	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC250-15	250	85	10	SI	SOBRESALIENTE	ÁSPERA	Borde redondeado y sobresaliente
OC276-15	276	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC228-20	228	65	12	NO	NO	ÁSPERA	Irregularidades en el borde inferior
OC250-20	250	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC202-25	202	65	12	NO	NO	ÁSPERA	Irregularidades superficiales
OC210-25	210	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC180-30	180	65	12	SI	REDONDEADA	ÁSPERA	Borde redondeado y sobresaliente
OC190-30	190	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC160-40	160	65	10	NO	NO	ÁSPERA	Superficie rugosa
OC175-40	175	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC165-45	165	85	10	NO	REDONDEADA	LISA	Borde superior ligeramente redondeado
OC160-45	160	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC135-65	135	85	10	SI	REDONDEADA	ÁSPERA	Borde superior ligeramente redondeado
OC140-65	140	100	10	NO	NO	LISA	Corte correcto
OC120-80	120	120	13	NO	NO	LISA	Corte correcto

Una vez obtenidas las matrices de evaluación, se procede a seleccionar los parámetros de trabajo definitivos para los dos procesos y se muestran en las tablas 4.22, 4.23 y 4.24

Tabla 4.22 Parámetros de trabajo, proceso PAC, Acero ASTM A-36

Espesor [mm]	Parámetros de entrada				
	Velocidad corte [mm/min]	Altura de la antorcha [mm]	Tipo de Consumible	Amperaje de corte [A] - Perilla de la máquina	Presión de corte [psi]
2,5	1600	3	40	40	≥90
4	1210	3	40	40	≥90
6	1250	3	60	60	≥90
8	860	3	60	60	≥90
10	630	3	60	60	≥90
12	655	4	100	100	≥90
15	480	3	100	100	≥90
20	320	4	100	100	≥90

Tabla 4.23 Parámetros de trabajo, proceso PAC, Acero inoxidable AISI 304

Espesor [mm]	Parámetros de entrada				
	Velocidad corte [mm/min]	Altura de la antorcha [mm]	Tipo Consumible	Amperaje de corte [A] - Perilla de la máquina	Presión de corte [psi]
2	900	3	40	40	≥90
4	700	3	40	40	≥90
6	875	3	60	60	≥90
8	650	3	60	60	≥90
10	335	3	60	60	≥90
12	300	3	100	100	≥90

Tabla 4.24 Parámetros de trabajo, proceso OFC

Espesor [mm]	Parámetros de entrada				
	Velocidad [mm/min]	Presión de oxígeno de corte [psi]	Presión de oxígeno de precalentamiento [psi]	Presión de acetileno [psi]	Número de boquilla
6	360	100	100	10	1
10	300	100	100	10	2
15	275	100	100	10	2
20	250	100	100	10	2
25	210	100	100	10	3
30	190	100	100	10	3
40	175	100	100	10	4
45	160	100	100	10	4
65	140	100	100	10	5
80	120	120	110	13	5

4.4. ANALISIS DE RESULTADOS

4.4.1. CORTE POR PLASMA

4.4.1.1. Defectos

Los problemas que se presentaron en la calidad de corte tanto para el acero ASTM A-36 y el acero inoxidable AISI 304 básicamente fueron dos, formación de escoria y excesivo ángulo de bisel, ahora, estos dos defectos son interdependientes, es decir existe una dependencia reciproca entre ambos, encontramos que la mayoría de las probetas ensayadas presentaron la formación de escoria de alta velocidad y adjunto a este problema viene de la mano el ángulo de corte positivo, y esto es razonablemente lógico porque la causa de la aparición de estos dos defectos es la excesiva velocidad de corte en el proceso, a continuación se detallan los factores que intervinieron para la formación de defectos en las probetas ensayadas:

- Cortando muy rápidamente o muy lentamente puede causar problemas de calidad de corte. Si la velocidad es muy lenta las piezas cortadas van a desarrollar escoria de baja velocidad, esto se evidencia en las

probetas PC1136-6, PC750-8 con lo que respecta al acero ASTM A-36 y al acero AISI 304 son las probetas PI680-6 y PI670-6; y su característica es una acumulación burbujeante de escoria a lo largo del borde inferior de fácil remoción. Velocidades bajas también causaron mayores anchos de corte y excesiva escoria superior, solo por poner un ejemplo, la probeta PC750-8 tiene un ancho de corte de 2,5 mm en contraste con la PC860-8 que es quien enmarca las características y parámetros de un buen corte que tiene un ancho de corte de 2 mm sin presencia de escoria.

En cambio si la velocidad es demasiado rápida, el arco se retrasa, causando un borde con un ángulo positivo de corte, un bajo ancho de corte y una pequeña acumulación de escoria a lo largo del borde inferior de la pieza cortada que es difícil de quitar como se presencia en las mayorías de las probetas tanto para los dos materiales ensayados las cuales son: PC1820-2,5, PC1450-4, PC1136-6, PC940-8, PI2030-2 y la PI980-4.

La velocidad correcta produzco cortes sin escoria; el ángulo de bisel se enmarco dentro del criterio de aceptación establecido en la Tabla 4.18, además el resultado fue una superficie de corte lisa, ejemplos todas las probetas resaltadas en la Tabla 4.19 y Tabla 4.20.

- No se tiene un control de la distancia entre la pieza y la antorcha.- La distancia de separación de la antorcha – pieza de trabajo es alta en todas las probetas que tienen el defecto de escoria de alta velocidad junto con un ángulo positivo de corte, no se tiene un buen control de este parámetro debido a que la antorcha no posee un controlador de altura, contamos con esta limitante para obtener cortes de buena calidad. Este parámetro es crítico en la calidad de corte y la vida útil de las piezas.

Pequeñas variaciones en la distancia de la antorcha afectaron la perpendicularidad de la superficie, esto se comprueba en los datos de las hojas de registro anexo 4.1, en donde todas las probetas que presentan buena calidad de corte su altura fue de 3 mm con un ángulo de bisel aceptable en cambio las probetas con excesivo ángulo de bisel su distancia de la antorcha fue de 8 mm.

Un error muy común es utilizar una baja separación la cual lleva consigo un ángulo de bisel negativo junto con la escoria de baja velocidad defecto típico de las probetas PC1136-6, PC750-8, PI680-6 y PI670-6. Cortando a una altura de 3 mm aseguramos un corte de calidad protegiendo además de los daños que se pueden presentar en la antorcha.

- El uso de parámetros de trabajo incorrectos. La selección correcta de los consumibles no es una práctica que se maneja en la empresa, y esto podemos constatar en las hojas de registros de pruebas anexo 4.1, se utiliza el consumible de 60 A para cortar todo tipo de espesor, cuando la selección de consumibles depende del espesor a cortar, el manual del operador define cuales consumibles son apropiados para los distintos espesores y a que amperaje deben trabajar.

Es esta la razón por la que en las probetas de hasta 4 mm como PC1450-4, se tiene el problema de escoria de alta velocidad y ángulo de corte positivo. Se emplearon consumibles de 60 A a un amperaje de 60 A DC, cuando el manual nos recomienda el consumible de 40 A para espesores que van desde los 2 mm hasta los 5 mm con un amperaje de 40 A DC. Aparecieron estos defectos porque como se utilizó un amperaje mayor, se tiene una carga energética más alta por ende tengo que aumentar la velocidad de corte fuera de lo razonable, sino, ocurre el problema que se puede fundir el borde superior de la pieza. Este no es el único problema de utilizar un amperaje mayor, también esto incide en la reducción de la vida útil de los consumibles afectando al costo operativo del proceso.

- El uso de consumibles hasta que se destruyen.- Se evidenció que parte de los defectos presentes en las probetas tanto para los dos materiales ensayados fue que se usan los consumibles desgastados al máximo para cortar, hasta que fallan. Esta manera de manejar los consumibles no es para nada adecuada, no solamente arruinan la calidad de corte, sino que provocan fallas muy caras a la antorcha.

- Descuido en el mantenimiento rutinario de la antorcha.- Primeramente el tener ángulos de corte positivos como la probeta PC940-8 y negativos como la PC750-8 es debido también a la desalineación de la antorcha respecto a la pieza de trabajo, no solo de la velocidad de corte o de la distancia de separación de la antorcha.

Esto también lo podemos comprobar porque en las probetas que enmarcan características de calidad no tuvieron excesivo bisel debido a que cuando se realizaron sus pruebas ya se había corregido de ante mano la desalineación de la antorcha.

4.4.1.2. Velocidad de corte

A continuación se analizarán las siguientes gráficas en lo referente a la velocidad de corte tanto para el acero ASTM A-36 y el AISI 304.

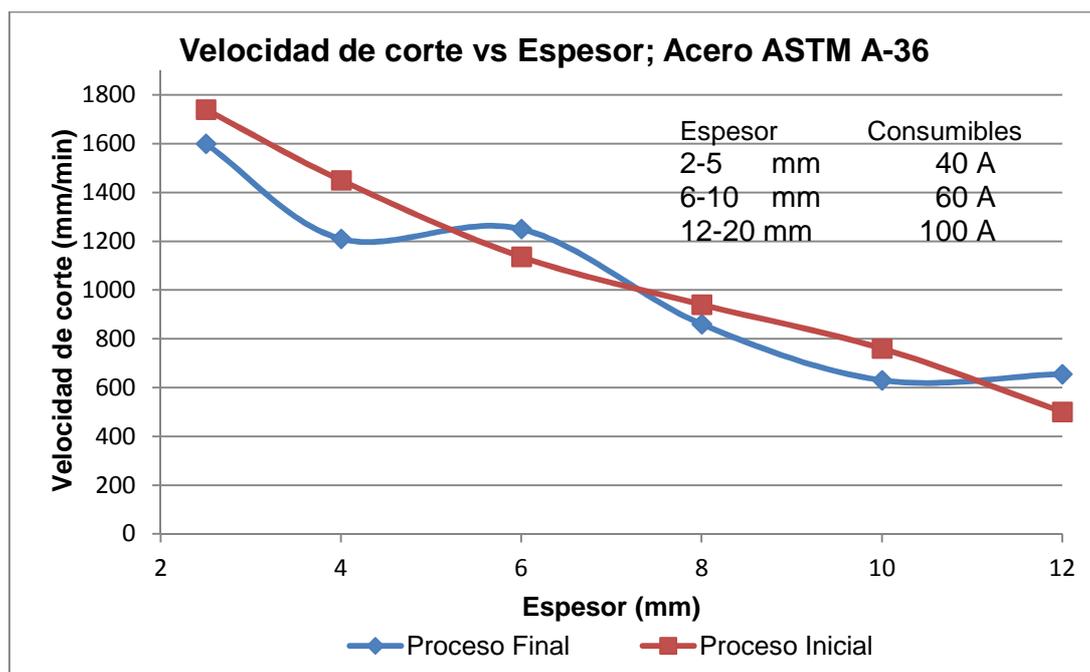


Figura 4.31 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado.

La curva “proceso inicial” describe una tendencia aproximadamente lineal lo cual es una anomalía del proceso debido a que se uso el mismo tipo de consumible (60 A) para cortar todos los espesores. Esta curva hace contraste con la del proceso final ya que esta representa el empleo correcto de los

consumibles de acuerdo con el espesor, evidenciándose en los diferentes cambios de pendiente.

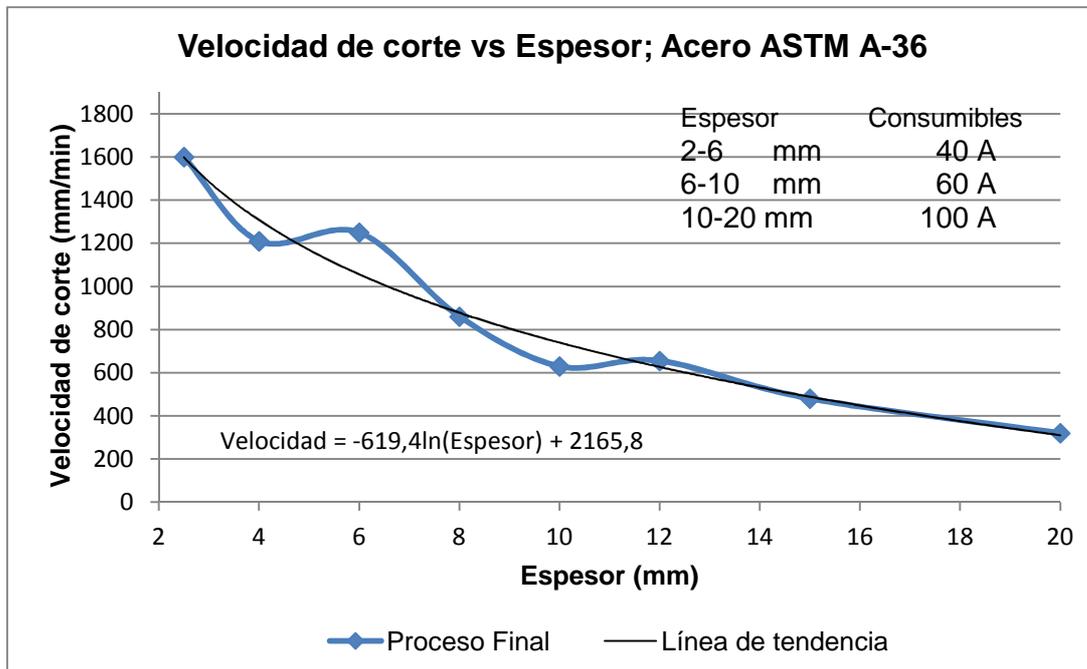


Figura 4.32 Gráfico Velocidad de corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo.

La figura 4.32 muestra una particularidad, en los límites de rango de cada consumible (4mm, 10 mm) existe un cambio de pendiente de la curva, lo que provoca que la misma no sea totalmente coincidente con la línea de tendencia. Así, las velocidades de corte correspondientes a estos puntos extremos se presentan en la gráfica como puntos de inflexión.

La ecuación mostrada en la gráfica es una aproximación a los valores definitivos de velocidad.

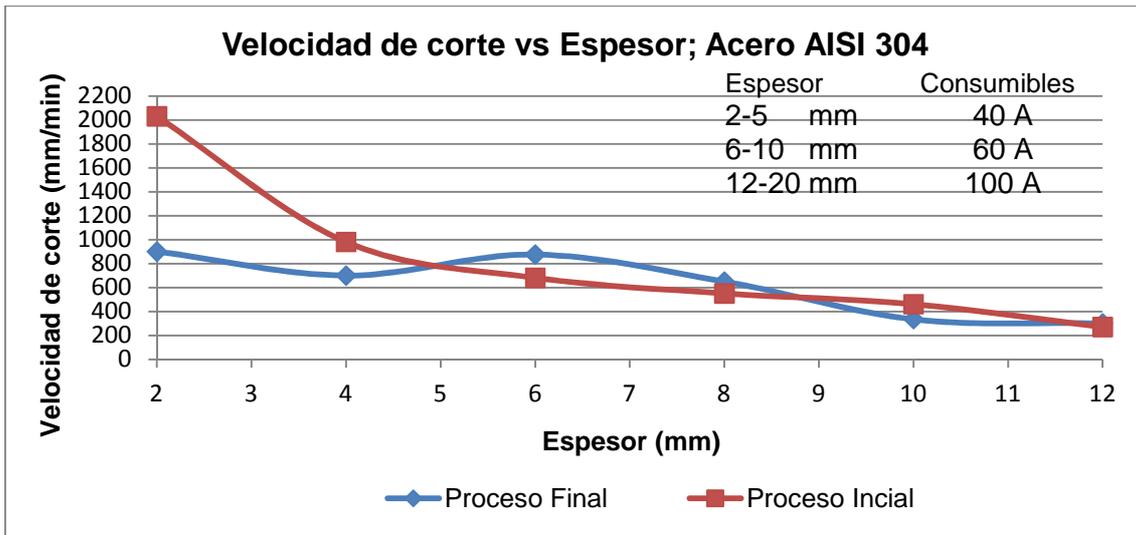


Figura 4.33 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado.

La curva “proceso inicial” describe una tendencia decreciente en la figura 4.33. Esta curva hace contraste con la del proceso final ya que esta representa el empleo correcto de los consumibles de acuerdo con el espesor, evidenciándose en los diferentes cambios de pendiente.

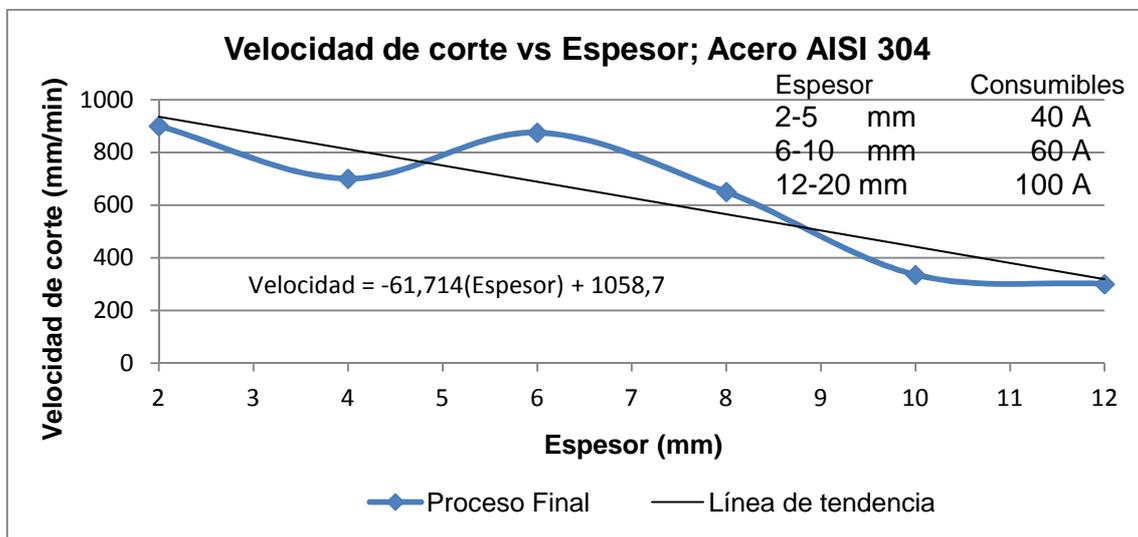


Figura 4.34 Gráfico Velocidad de corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo

Los cambios de pendiente son más acentuados en esta figura en comparación con la misma curva para el acero ASTM A-36, presentando una similitud en su forma, pero desplazada ligeramente hacia abajo en el eje de las velocidades,

es decir que para cortar acero inoxidable se utilizan velocidades menores que para cortar acero al carbono.

Si bien es cierto la figura muestra la ecuación de la línea de tendencia de la curva esta no es aplicable si se desea a partir de la misma aproximarse a las velocidades del proceso.

4.4.2. CORTE OXIACETILÉNICO

4.4.2.1. Defectos

Mayormente se presentan dos defectos, formación de escoria en la parte inferior de la superficie y fusión del borde superior, en el primer caso, la formación de escoria puede ser resultado de los siguientes factores: velocidad de corte demasiado baja, llama de precalentamiento demasiado fuerte, elevada presión de oxígeno de corte. Comparando las probetas OC250-15 y OC276-15, claramente se observa que la velocidad de la primera es demasiado baja, por tanto, se forma escoria.

Por otro lado, comparando de nuevo las mismas probetas se puede notar que en la primera el borde superior es sobresaliente, defecto que es causado por una llama de precalentamiento muy fuerte (la forma correcta de regulación de la llama se presenta en el punto 2.2.3.5.1) o se debe a que la boquilla está demasiado lejos de la superficie, asunto que se comprueba revisando la hoja de registro de estas probetas, efectivamente la distancia placa-boquilla es de 7 mm, mientras que la distancia correcta está entre 5-6mm, estos parámetros se mencionan en el punto 2.2.3.3.4.

La formación de un borde sobresaliente es un defecto común en el proceso de corte oxiacetilénico, principalmente se produce por una llama de precalentamiento demasiado fuerte, además, si la llama es excesivamente fuerte se presenta escoria en el borde inferior. Estos dos defectos se forman simultáneamente por una mala regulación de la llama de precalentamiento, esto se evidencia en la probeta OC351-10.

La formación de escoria generalmente es resultado de una velocidad de corte baja, sin embargo, comparando las probetas OC351-10 y OC300-10 claramente se observa que la velocidad de la primera es elevada y presenta escoria y como se mencionó en el inciso anterior esta formación de escoria fue resultado de una llama de precalentamiento excesiva.

Otro defecto importante es la presencia de un borde redondeado como se presenta en las probetas de 6mm, OC346-6 y OC371-6, en la primera, además del borde redondeado la formación de escoria es evidente y en la segunda existe escoria pero en una cantidad reducida. Tomando en cuenta la hoja de registro de estas probetas se puede observar que la distancia placa-boquilla es demasiado pequeña (4 y 5 mm respectivamente). Entonces el redondeo del borde fue causado porque la boquilla estuvo demasiado cerca de la superficie, teniendo presente la formación de escoria de la primera probeta mencionada, se puede saber que la velocidad es demasiado baja y es por tal razón que las probetas subsiguientes fueron ensayadas a una velocidad mayor. Así, la probeta OC360-6 se realizó correctamente con una distancia placa-boquilla (6mm), a una velocidad correcta, con una regulación adecuada y con la boquilla adecuada.

Además de las causas de redondeo mencionadas en el punto anterior, existe una que no es regulable sino más bien es un factor que se puede seleccionar, en las probetas OC346-6 y OC371-6 se utiliza la boquilla número 2 que es utilizable para un rango de espesores de 10 a 20 mm, sin embargo la probeta ensayada es de 6mm. La boquilla correcta para este caso es la número 1, cuyo rango de espesores es entre 5 y 10 mm, la probeta OC360-6 fue realizada con la boquilla respectiva, dando como resultado un corte satisfactorio.

La probeta OC228-20 presenta irregularidades ubicadas en la parte inferior a manera de socavamientos a pesar de una superficie relativamente aceptable. Este fenómeno se produce cuando la boquilla se ha manchado por la escoria y el haz de oxígeno pierde su forma paralela o puede ser que la boquilla haya estado dañada.

Para los espesores mayores no se presentó una notable presencia de defectos, salvo la presencia de ligeros redondeos en el borde superior, el factor determinante es la correcta selección de la boquilla.

Para realizar la probeta OC120-80 fue necesario modificar los parámetros relacionados con las presiones de oxígeno y acetileno de la siguiente manera: presión de oxígeno de corte 120 psi, presión de oxígeno de precalentamiento 110 psi y presión de acetileno 13 psi. Estas regulaciones son necesarias debido a que el espesor tratado lo requiere. Para cortar un espesor mayor, en este caso 80 mm se requiere cantidades mayores de gases para que se produzca la reacción química.

4.4.2.2. Velocidad de corte

A continuación se analizarán las siguientes gráficas en lo referente a la velocidad de corte para el acero ASTM A-36.

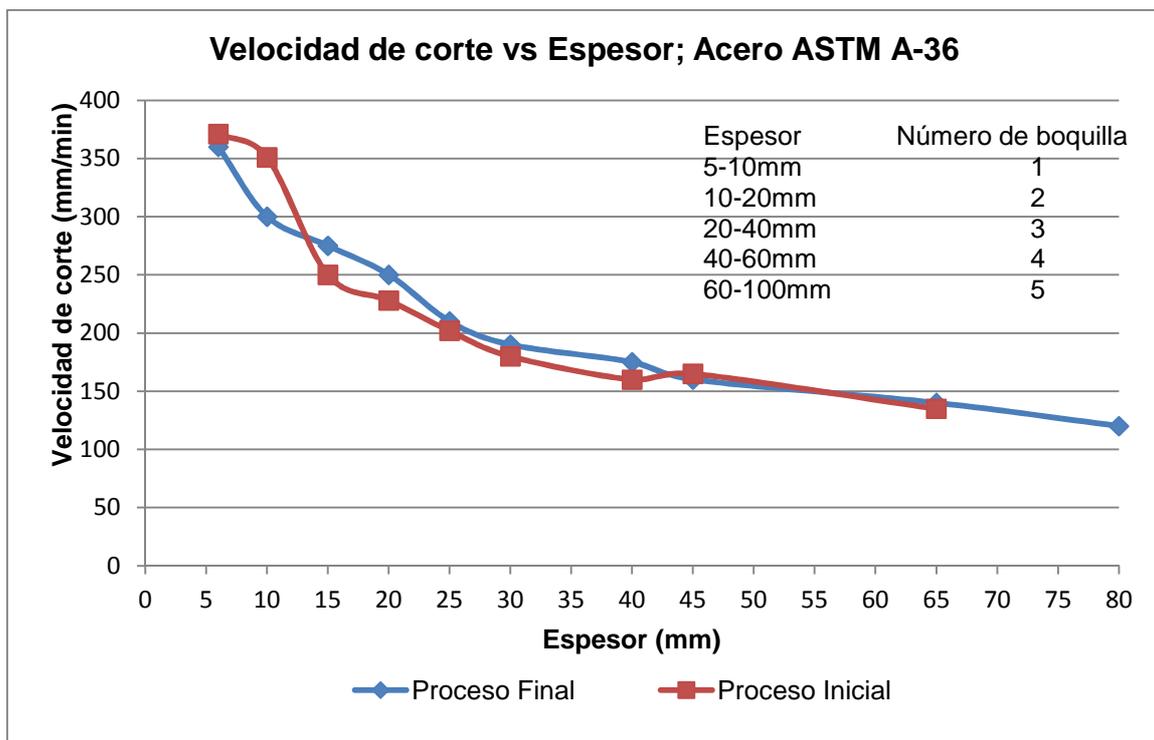


Figura 4.35 Gráfico comparativo de la Velocidad de corte vs. Espesor antes y después del estudio realizado

En la curva “proceso inicial” se evidencia un equivocado uso de las boquillas, ya que la misma no presenta una tendencia notable. Se nota que en el rango de 5 a 10 mm la velocidad utilizada en el proceso inicial es mayor a la velocidad definitiva aplicada, cabe notar que este fenómeno es resultado del uso de una boquilla incorrecta y en este caso una boquilla para un espesor mayor.

Antes de realizar el presente estudio el uso normal de boquillas era de la siguiente manera, la boquilla número 2 para espesores entre 6 y 30 mm, y la boquilla 3 para espesores superiores a 30 mm. Siendo la selección correcta la que se muestra en la gráfica siguiente.

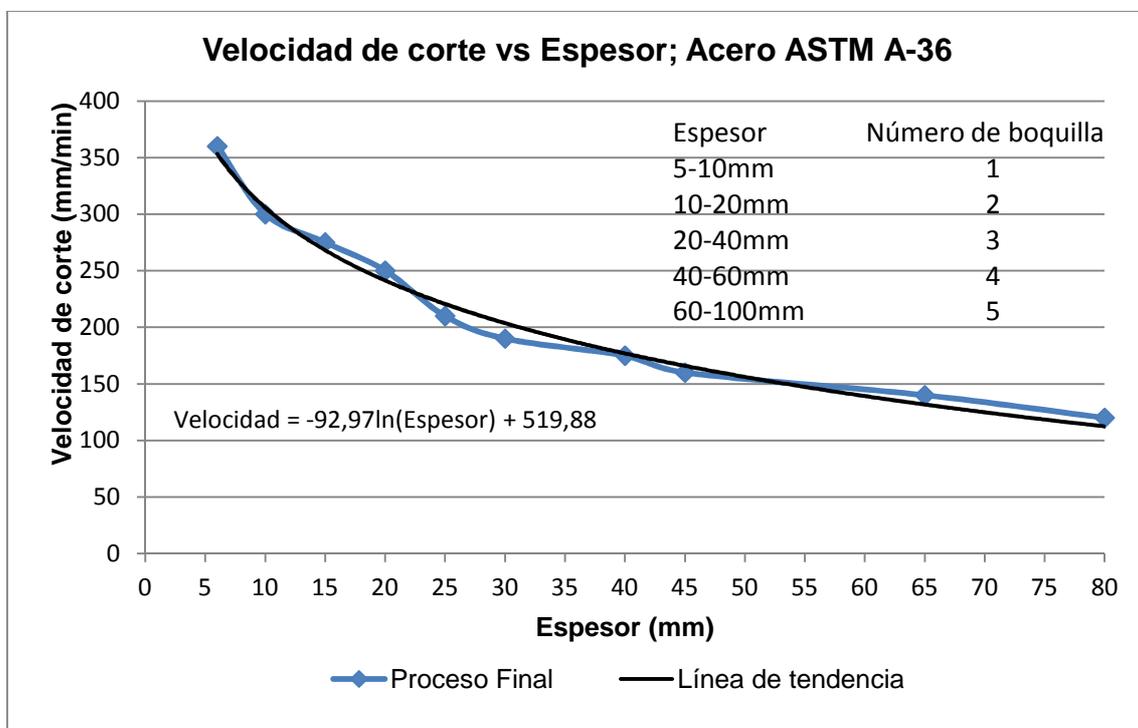


Figura 4.36 Gráfico Velocidad de Corte vs. Espesor. Usando las velocidades resultantes del estudio, cumpliéndose el objetivo

La figura 4.36 muestra una particularidad, en los límites de rango de cada boquilla (10 mm, 20 mm, 40 mm, 60mm) existe un cambio de pendiente de la curva, lo que provoca que la misma no sea totalmente coincidente con la línea de tendencia. Así, las velocidades de corte correspondientes a estos puntos extremos se presentan en la gráfica como puntos de inflexión, este efecto es

más notorio en el proceso de corte por plasma ya que el número de variables a controlar es mayor.

La ecuación mostrada en la gráfica es una aproximación a los valores definitivos de velocidad.

4.4.3. COMPARACIÓN DE PROCESOS

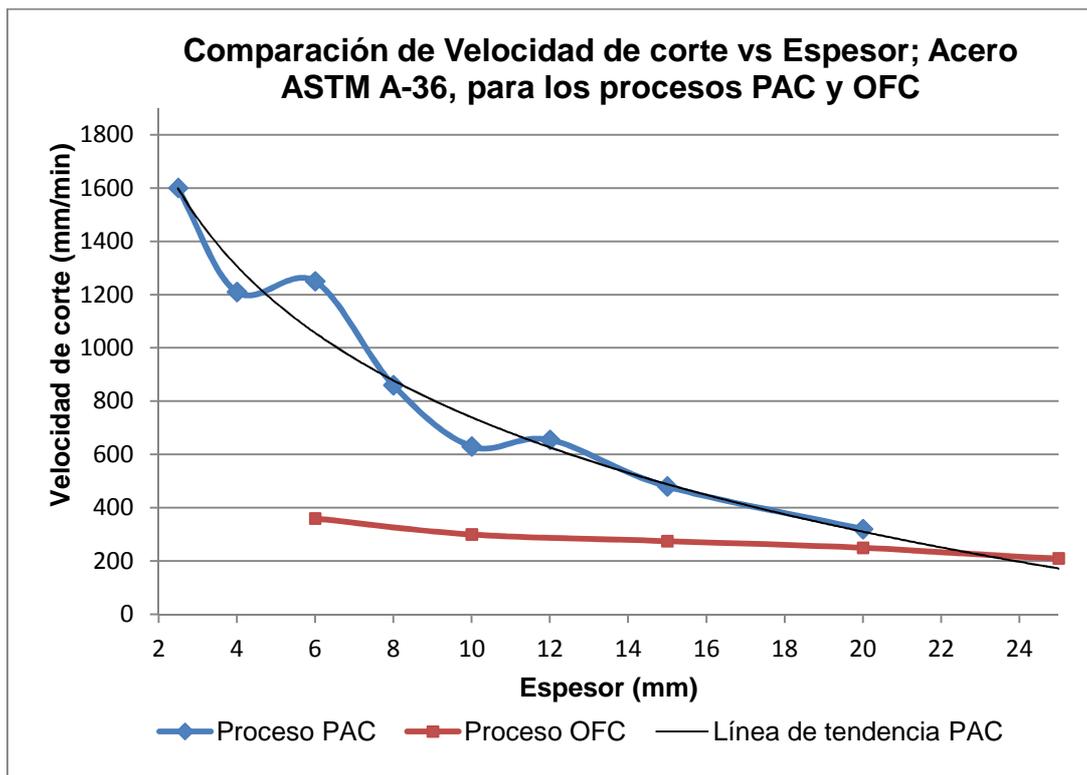


Figura 4.37 Comparación de Velocidad vs Espesor; Acero ASTM A-36, para los proceso PAC y OFC

A partir de la figura 4.24, puede afirmarse que las velocidades en el corte por plasma comparadas con las del proceso OFC son mayores, así para espesores menores la diferencia de velocidades es grande la misma que va disminuyendo a medida que el espesor de corte aumenta, hasta aproximadamente un espesor de 24 mm donde las velocidades aparentemente serán iguales. Esta observación será tomada en cuenta en el análisis de costos en términos de productividad.

A continuación se muestra una comparación entre los dos procesos estudiados en términos de calidad, productividad, costos operativos.

Tabla 4.25 Comparación de procesos OFC y PAC

	OFC	PAC
Calidad de corte	<p>Buena perpendicularidad.</p> <p>Niveles de escoria aceptables.</p> <p>No es eficaz en acero inoxidable y aluminio.</p>	<p>Buena perpendicularidad.</p> <p>Virtualmente sin escoria.</p> <p>Cortes complejos de buena calidad en una amplia gama de materiales.</p>
Productividad	<p>Velocidades de corte bajas.</p> <p>El tiempo de calentamiento aumenta los tiempos de perforación.</p>	<p>Velocidades de corte rápidas.</p> <p>Tiempos de corte rápidos.</p>
Costo operativo	<p>La mala productividad y la necesidad de rehacer el trabajo hacen que los costos por pieza sean superiores que los de plasma.</p>	<p>La buena productividad y la excelente calidad de corte hacen que los costos por pieza sean menores.</p>

CAPITULO 5

ANÁLISIS DE COSTOS Y SEGURIDAD INDUSTRIAL

5.1. INTRODUCCIÓN

Los factores determinantes en un proceso productivo son los costos de producción, la calidad y la productividad, siendo interdependientes entre ellos, una mejora o una disminución en uno de estos conllevará a un cambio en los otros dos por lo que es necesario indagar por el parámetro que tendrá el mayor peso en el cálculo, de esta manera se tiene que un parámetro que influye en forma crítica en el número de piezas producidas en menor tiempo (productividad), la calidad del corte y por ende en los costos de producción es la velocidad de corte, por lo que es menester contar con este parámetro previamente.

De esta manera, en este capítulo se estudiará el costo total de producción por metro de material cortado para cada espesor estipulado en este proyecto de titulación haciendo una diferenciación entre el proceso de corte por arco de plasma y el proceso de corte oxiacetilénico, para el primero se especifica cortes en acero inoxidable AISI 304 de 2mm a 12mm de espesor y cortes en acero ASTM A-36 de 2mm a 20mm de espesor; y para el proceso oxiacetilénico cortes en acero ASTM A-36 de 6mm a 80mm de espesor.

A continuación se presenta el modelo matemático para determinar los costos de producción de los procesos de corte térmico mencionados.

5.2. MODELO MATEMÁTICO PARA DETERMINAR EL COSTO DE CORTE PARA LOS PROCESOS PAC Y OFC⁹⁹

Los modelos de cálculo se han derivado de los modelos generales de cálculo utilizados en los procesos de fabricación. Para el cálculo se toman en cuenta tres categorías que componen el costo total de producción, estas son: el costo de depreciación del equipo, el costo de mano de obra y el costo de operación, siendo este último donde se verá la diferencia entre los dos procesos.

La ecuación para el costo total de producción es:

$$C_{Total} = C_D + C_{MO} + C_{OP} \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Donde:

C_{Total} : Costo de corte por hora [\$/h]

C_D : Costo de depreciación de la inversión [\$/h]

C_{MO} : Costo de mano de obra [\$/h]

C_{OP} : Costo de operación [\$/h]

5.2.1. COSTO DE DEPRECIACIÓN DE LA INVERSIÓN

Es la pérdida de valor de un bien o activo (maquinaria, edificio, equipos, etc.), que sufren debido a su uso, desgaste u otros factores. En la medida en que avance el tiempo de servicio, decrece el valor contable de dichos activos.

- Vida útil es la duración probable de un bien o activo; se estima con base en la experiencia e informes de expertos o fabricantes.
- Costo inicial es el valor del bien o activo en la fecha de la compra.

⁹⁹ http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/ESAFORM_09/data/pdf/paper259tumcd.pdf

- El costo final o valor residual es el que tendría el bien al finalizar su vida útil y correspondería al monto que se obtendría con la venta del activo como tal, en partes o convertido en chatarra.¹⁰⁰

$$C_D = \frac{\text{Costo inicial} - \text{Costo final}}{\text{Tiempo de vida útil}} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

5.2.2. COSTO DE MANO DE OBRA

Es asociado con la puesta en marcha de la máquina, incluyendo el tiempo de colocación y preparación del material en bruto a cortar, terminación de las piezas, transporte de los residuos y atención a la máquina mientras esta trabajando.

Para proponer un valor a este costo es necesario conocer el costo horario de un operador, según el INEN este valor asciende a 258,7 [\$/mes], por lo tanto el costo horario es de:

$$C_{MO} = 1,62 \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.3})$$

Este es el valor de mano de obra correspondiente a la renta primaria por hora, según el grupo de ocupación para oficiales, operarios y artesanos a Mayo de 2012.

5.2.3. COSTO DE OPERACIÓN

En general los factores que componen los costos de operación son:

- Consumibles, que constituyen la mayor parte de los costos operativos de una máquina de plasma. La vida útil de los consumibles influye enormemente en este aspecto, dado que si los consumibles duran más, se conseguirá unos costes operativos más bajos.
- El consumo eléctrico, que es un gasto considerable en el caso del corte por plasma, pero que no es considerado en el corte oxiacetilénico.

¹⁰⁰ ZAMBRANO A, (2007), "Matemáticas financieras", Editorial alfa y omega, Tercera edición,

- El gas, que es el costo asociado con el consumo de oxígeno y acetileno para el proceso oxiacetilénico, y el consumo de aire comprimido en el proceso de corte por plasma.

Cabe hacer una diferenciación entre costos de operación para el proceso de corte por arco de plasma y para el proceso de corte oxiacetilénico, para el primero se toma en cuenta lo siguiente:

- Consumibles, que están compuestos por el electrodo, boquilla, anillo distribuidor, capuchón de retención y escudo frontal deflector.
- Consumo eléctrico, que toma en cuenta el voltaje y amperaje promedio en la línea cuando se esta cortando. Como dato el voltaje promedio es de 208V y el amperaje esta en el rango de 30 a 60 A.
- Consumo de aire comprimido, que entra al equipo a una presión de alrededor de 100 psi y un flujo de 260 l/min (15.6 m³/h).

Para el caso de corte oxiacetilénico los factores que se deben ser tomados en cuenta son los siguientes:

- Boquillas que tienen una vida útil entre 20 y 25 horas.
- Consumo de oxígeno y acetileno que son proporcionados por el fabricante de boquillas.

5.2.3.1. Costo de operación para el proceso PAC

El cálculo del costo de operación es específico para cada proceso, en este caso comprende costos de consumibles, costo de energía eléctrica, costo de consumo de aire comprimido, de la siguiente manera:

$$C_{OPP} = C_C + C_E + C_A \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

5.2.3.1.1. Costo de consumibles (Anexo 6)

$$C_C = C_{Boq} + C_{Elec} + C_{Anillo} + C_{Cap} + C_{Esc} \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.5})$$

$$C_C = \frac{u_{Boq}}{t_{Boq}} + \frac{u_{Elec}}{t_{Elec}} + \frac{u_{Anillo}}{t_{Anillo}} + \frac{u_{Cap}}{t_{Cap}} + \frac{u_{Esc}}{t_{Esc}} \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.6})$$

5.2.3.1.2. Costo de energía eléctrica

$$C_E = u_E \cdot E \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

$$E = 0,001 \cdot V \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [kW]} \quad (\text{Ec. 5.8})$$

5.2.3.1.3. Costo de aire comprimido

$$C_A = P \cdot u_E \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.9})$$

5.2.3.1.4. Nomenclatura de costos PAC

C_{OPP} : Costo de operación para el proceso de corte por arco de plasma [\$/h]

C_C : Costo de consumibles por hora. [\$/h]

C_E : Costo de energía eléctrica por hora. [\$/h]

C_A : Costo de aire comprimido por hora. [\$/h]

C_{Boq} : Costo de la boquilla por hora. [\$/h]

C_{Elec} : Costo del electrodo por hora. [\$/h]

C_{Anillo} : Costo del anillo distribuidor por hora. [\$/h]

C_{Esc} : Costo del escudo frontal deflector por hora. [\$/h]

C_{Cap} : Costo del capuchón de retención por hora. [\$/h]

u_{Boq} : Costo unitario de la boquilla. [\$]

u_{Elec} : Costo unitario del electrodo. [\$]

u_{Anillo} : Costo unitario del anillo distribuidor. [\$]

u_{Esc} : Costo unitario del escudo frontal deflector. [\$]

u_{Cap} : Costo unitario del capuchón de retención. [\$]

u_E : Costo unitario de energía eléctrica. [$\$/kW - h$]

t_{Boq} : Tiempo de vida útil de la boquilla. [h]

t_{Elec} : Tiempo de vida útil del electrodo. [h]

t_{Anillo} : Tiempo de vida útil del anillo distribuidor. [h]

t_{Esc} : Tiempo de vida útil del escudo frontal deflector. [h]

t_{Cap} : Tiempo de vida útil del capuchón. [h]

E : Consumo de potencia eléctrica. [kW]

P : Potencia del compresor. [kW]

V : Voltaje promedio de línea durante el proceso. [V]

I : Intensidad de corriente durante el proceso. [A]

$\cos \varphi$: Factor de potencia. [1]

5.2.3.2. Costo de operación para el proceso OFC

En el proceso de corte oxiacetilénico las variables que se utilizan son diferentes al anterior, los factores que se toman en cuenta son el costo de boquillas y costo de gases, quedando el modelo matemático de la siguiente manera:

$$C_{OPO} = C_B + C_G \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.10})$$

5.2.3.2.1. Costo de boquillas (Anexo 6)

$$C_B = \frac{u_B}{t_B} \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.11})$$

5.2.3.2.2. Costo de gases

$$C_G = C_{OC} + C_{OP} + C_{Ac} \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.12})$$

$$C_{OC} = u_O \cdot O_C \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

$$C_{OP} = u_O \cdot O_P \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

$$C_{Ac} = u_{Ac} \cdot \rho_{Ac} \cdot AC \text{ [$/h]} \quad (\text{Ec. 5.15})$$

5.2.3.2.3. Nomenclatura de costos OFC

C_{OP0} : Costo de operación para el proceso de corte oxiacetilénico [\$/h]

C_B : Costo de boquillas por hora. [\$/h]

C_G : Costo de gases por hora. [\$/h]

C_{OC} : Costo del consumo de oxígeno de corte por hora. [\$/h]

C_{OP} : Costo del consumo de oxígeno de precalentamiento por hora. [\$/h]

C_{Ac} : Costo del consumo de acetileno por hora. [\$/h]

u_B : Costo unitario de la boquilla. [\$]

u_O : Costo unitario del oxígeno. [\$/m³]

u_{Ac} : Costo unitario del acetileno. [\$/kg]

ρ_{Ac} : Densidad del Acetileno (1.013 bar y 15 °C [59 °F]): 1.11 [kg/m³]

t_B : Tiempo de vida útil de la boquilla. [h]

O_C : Consumo de oxígeno de corte. [m³/h]

O_P : Consumo de oxígeno de precalentamiento. [m³/h]

AC : Consumo de acetileno. [m³/h]

5.2.4. COSTO DE CORTE POR METRO

El costo de corte por metro para los dos procesos se establece como:

$$C^* [$/m] = \frac{C_{Total} [$/h]}{V [m/h]} \quad (Ec. 5.16)$$

Donde:

C^* : Costo de corte por metro. [\$/m]

V : Velocidad de corte. [m/h]

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo para cada proceso.

5.3. APLICACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO DE COSTOS

El cálculo de costos debe ser realizado, como se mencionó anteriormente, para cada espesor, cada material y cada proceso. Para la aplicación del modelo se muestra a continuación todos los valores necesarios para su efecto.

5.3.1. PARÁMETROS DE ENTRADA

Las siguientes tablas muestran valores relacionados estrictamente con el cálculo de costos, estos han sido tomados de fuentes confiables como la propia empresa, el INEC, etc.

5.3.1.1. Proceso PAC

Tabla 5.1 Costo de depreciación y mano de obra

Costos de depreciación	
Inversión [\$]	100000
Valor final [\$]	10000
Tiempo de vida útil [h]	9600
Costo de mano de obra	
Costo unitario [\$/h]	1,62

El valor de la inversión es el costo correspondiente a la adquisición de máquina proporcionado por el departamento de compras de PROMEC S.C.C. El valor final se lo considera como un 10% de la inversión. El tiempo de vida útil se asume cinco años.

Tabla 5.2 Costo de consumibles¹⁰¹

Costo de Consumibles [\$]			
	40 A	60A	100A
Costo de boquilla	6,6	7,82	7,84
Costo de electrodo	10,79	10,79	11,42
Costo de anillo distribuidor	20,48	20,48	25,6
Costo de escudo frontal deflector	15,95	15,95	17,89
Costo de capuchón de retención	38,4	38,4	44,86

Tabla 5.3 Tiempos de vida útil de los consumibles

Tiempo de vida útil	40 A	60A	100A
Boquilla [h]	1	1	1
Electrodo [h]	1	1	1
Anillo distribuidor [h]	160	160	160
Escudo frontal deflector [h]	160	160	160
Capuchón de retención [h]	160	160	160

Tabla 5.4 Costo de energía eléctrica y de aire comprimido

Costo de energía eléctrica	
Voltaje [VCA] Trifásico	208
Factor de potencia	0,94
Costo [kW-h]	0,08
Costo de aire comprimido	
Potencia del compresor [kW]	22,4

¹⁰¹ Colimpo S.A; Proforma N° 493, ver Anexo 5.1

Tabla 5.5 Velocidades de corte para cada espesor y material

Velocidad de corte					
Acero ASTM A-36			Acero inoxidable AISI 304		
Espesor [mm]	Velocidad [m/h]	Amperaje [A]	Espesor [mm]	Velocidad [m/h]	Amperaje [A]
2,5	96	23	2	54	22
4	72,6	24	4	42	23
6	75	32	6	52,5	38
8	51,6	36	8	39	35
10	37,8	34	10	20,1	33
12	39,3	51	12	18	51
15	28,8	55	-	-	-
20	19,2	53	-	-	-

5.3.1.2. Proceso OFC

Tabla 5.6 Costo de depreciación y mano de obra OFC

Costo de depreciación	
Inversión [\$]	100000
Valor final [\$]	10000
Tiempo vida útil [h]	9600
Costo de mano de obra	
Costo unitario [\$ /h]	1,62

El valor de la inversión es el costo correspondiente a la adquisición de máquina proporcionado por el departamento de compras de PROMEC S.C.C. El valor final se lo considera como un 10% de la inversión. El tiempo de vida útil se asume cinco años.

Tabla 5.7 Costo de boquillas y flujos respectivos¹⁰²

Costo de operación					
Costo de Boquillas			Flujo [m ³ /h]		
No	Costo unitario [\$/unidad]	Tiempo Vida [h]	Oxígeno de corte	Oxígeno precalentamiento	Acetileno
1	32,88	20	1,25	0,52	0,47
2	32,88	20	2,23	0,6	0,55
3	32,88	20	3,48	0,6	0,55
4	32,88	20	5,44	0,6	0,55
5	36,74	20	7,84	0,75	0,68

¹⁰² Ver anexo 5.2

Tabla 5.8 Costo de gases¹⁰³

Costo de gases	
Oxígeno [\$/m ³]	7,27
Acetileno [\$/kg]	29,4

Tabla 5.9 Velocidades de corte para cada espesor

Velocidad de corte	
Espesor [mm]	Velocidad [m/h]
6	21,6
10	18
15	16,56
20	15
25	12,6
30	11,4
40	10,5
45	9,6
65	8,4
80	7,2

5.3.2. CÁLCULO DE COSTOS

Se toma como ejemplo de cálculo el proceso de corte oxiacetilénico, el corte se realizó para un espesor de 6mm en acero ASTM A-36.

5.3.2.1. Costo total

$$C_{Total} = C_D + C_{MO} + C_{OP} \text{ [$/h]}$$

5.3.2.2. Costo de depreciación

$$C_D = \frac{\text{Costo inicial} - \text{Costo final}}{\text{Tiempo de vida útil}}$$

$$C_D = \frac{100000 - 10000}{9600} = 9,38 \text{ [$/h]}$$

¹⁰³ AGA S.A; ver Anexo 5.3

5.3.2.3. Costo de mano de obra

$$C_{MO} = 1,62 \text{ [$/h]}$$

5.3.2.4. Costo de operación

$$C_{OPO} = C_B + C_G \text{ [$/h]}$$

5.3.2.4.1. Costo de boquillas

Para el espesor especificado de 6 mm, se utiliza la boquilla número 1, cuyo costo se obtiene del punto anterior.

$$C_B = \frac{u_B}{t_B} \text{ [$/h]}$$

$$C_B = \frac{32,88}{20} = 1,64 \text{ [$/h]}$$

5.3.2.4.2. Costo de gases

$$C_G = C_{OC} + C_{OP} + C_{Ac} \text{ [$/h]}$$

$$C_{OC} = u_O \cdot O_C = 7,27 \cdot 1,25 = 9,09 \text{ [$/h]}$$

$$C_{OP} = u_O \cdot O_P = 7,27 \cdot 0,52 = 3,78 \text{ [$/h]}$$

$$C_{Ac} = u_{Ac} \cdot \rho_{Ac} \cdot AC = 29,4 \cdot 1,11 \cdot 0,47 = 15,34 \text{ [$/h]}$$

$$C_G = 28,21 \text{ [$/h]}$$

$$C_{OPO} = 29,85 \text{ [$/h]}$$

$$C_{Total} = 40,84 \text{ [$/h]}$$

5.3.2.5. Costo de corte por metro

$$C^* = \frac{C_{Total}}{v} \text{ [$/m]}$$

$$C^* = \frac{40,84}{21,6} = 1,89 \text{ [$/m]}$$

**Tabla 5.10 Resumen de costos para un espesor de 6 mm, material acero ASTM A-36
utilizando el proceso OFC**

COSTO DE CORTE POR METRO - CORTE OXIACETILÉNICO			
Material	Acero al Carbono		
Espesor [mm]	6		
Velocidad [m/h]	21,6		
COSTO DE DEPRECIACION			
Costo Inicial			100000
Costo final			10000
Tiempo de vida util			9600
COSTO DE DEPRECIACIÓN		\$ 9,38	
COSTO DE MANO DE OBRA			
COSTO DE MANO DE OBRA		\$ 1,62	
COSTOS DE OPERACIÓN - CORTE OXIACETILÉNICO			
COSTO DE BOQUILLA			
Item	⌘	£	Costo
Costo de Boquilla	32,88	20	1,644
COSTO DE CONSUMIBLES		\$ 1,64	
COSTO DE GASES			
Item	⌘	£	Costo
Oxígeno de corte	7,27	1,25	9,09
Oxígeno de precalentamiento	7,27	0,52	3,78
Acetileno	29,4	0,47	15,34
COSTO DE GASES		\$ 28,21	
COSTO DE OPERACIÓN		\$ 29,85	
COSTO TOTAL		\$ 40,84	
Velocidad de corte			21,6
COSTO DE CORTE POR METRO		\$ 1,89	

Tabla 5.11 Resumen de costos para un espesor de 2,5 mm, material acero ASTM A-36 utilizando el proceso PAC

COSTO DE CORTE POR METRO - CORTE POR PLASMA			
Material	Acero al Carbono		
Espesor [mm]	2,5		
Velocidad [mm/min]	96		
COSTO DE DEPRECIACION			
Costo Inicial	100000		
Costo final	10000		
Tiempo de vida util	9600		
COSTO DE DEPRECIACIÓN	\$ 9,38		
COSTO DE MANO DE OBRA			
COSTO DE MANO DE OBRA	\$ 1,62		
COSTOS DE OPERACIÓN - CORTE POR PLASMA			
COSTO DE CONSUMIBLES			
Item	z	f	Costo
Costo de Boquilla	6,6	1	6,60
Costo de electrodo	10,79	1	10,79
Costo de anillo	20,48	160	0,13
Costo de escudo	15,95	160	0,10
Costo de capuchón	38,4	160	0,24
COSTO DE CONSUMIBLES	\$ 17,86		
COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA			
Voltaje	V		208
Intensidad	A		23
Factor de potencia	$\cos\phi$		0,94
POTENCIA ELECTRICA kW	4,50		
Costo del kWh	0,08		
COSTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	\$ 0,36		
COSTO DE AIRE COMPRIMIDO			
Item	z	P	Costo
Aire comprimido	0,08	22,4	1,792
COSTO DE AIRE COMPRIMIDO	\$ 1,79		
COSTO DE OPERACIÓN	\$ 20,01		
COSTO TOTAL	\$ 31,00		
Velocidad de corte	96		
COSTO DE CORTE POR METRO	\$ 0,32		

Tabla 5.12 Costo por metro según espesor y material. Proceso PAC

Corte por plasma		
	Costo / metro	
Espesor [mm]	Acero ASTM A-36	Acero AISI 304
2	\$ 0,32	\$ 0,57
4	\$ 0,43	\$ 0,74
6	\$ 0,43	\$ 0,62
8	\$ 0,63	\$ 0,83
10	\$ 0,86	\$ 1,61
12	\$ 0,85	\$ 1,86
15	\$ 1,16	-
20	\$ 1,74	-

Tabla 5.13 Costo por metro según espesor y material. Proceso OFC

CORTE OXIACETILENICO	
Espesor [mm]	Costo / metro
6	\$ 1,89
10	\$ 2,27
15	\$ 3,10
20	\$ 3,41
25	\$ 4,78
30	\$ 5,29
40	\$ 7,10
45	\$ 7,76
65	\$ 11,60
80	\$ 13,54

El cálculo individual para cada espesor tanto para el proceso PAC como OFC se muestra en el anexo 6.

5.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizados los cálculos se obtienen los siguientes gráficos comparativos: Costo de corte por metro vs. Espesor de material y Costo de corte vs. Metros cortados, con los cuales se puede cotejar conveniencias de procesos para un material específico.

5.4.1. COSTO DE CORTE POR METRO vs. ESPESOR

5.4.1.1. Acero ASTM A-36

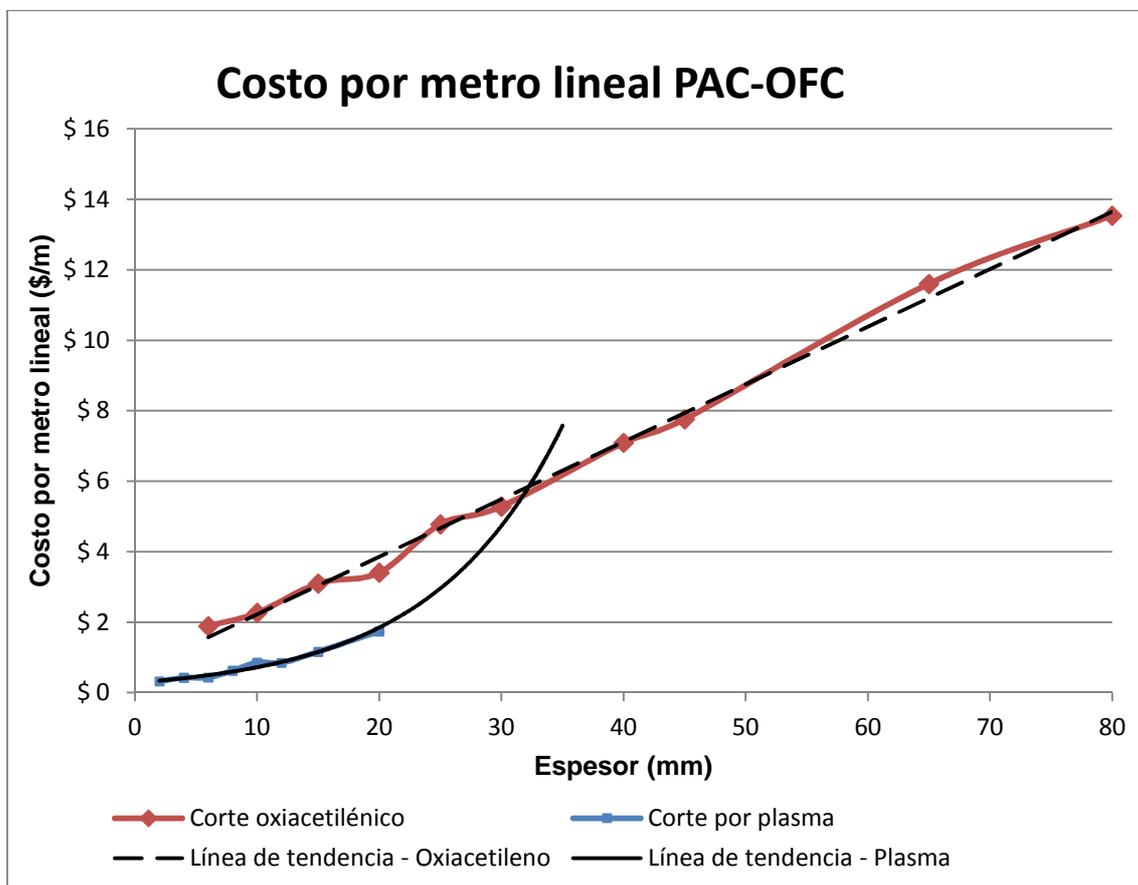


Figura 5.1 Gráfico comparativo del costo de corte por metro lineal por los procesos PAC y OFC, para acero ASTM A-36.

En la figura 5.1 puede observarse que mientras el espesor del material se incrementa el costo por metro es mayor, sin embargo, es notorio que para el proceso PAC a partir de un espesor de 25 mm el costo se incrementa de una manera acelerada, mientras que para el proceso OFC el costo tiene un

incremento aproximadamente lineal. Así haciendo referencia a la figura 4.24 se observa que aproximadamente en el espesor de 24 mm las velocidades de los dos procesos pueden tomar valores similares, esto nos induce a decir que los costos operativos se asemejarían, pero como en el proceso PAC los costos no solo depende de la velocidad sino también en alto grado de la vida útil de los consumibles, este punto de equilibrio se traslada aproximadamente a los 30 mm en donde los costos se igualan, una observación adicional es que justo en donde las velocidades se igualan los costos en el PAC empiezan a incrementarse de aceleradamente, superando ampliamente a los costos del OFC.

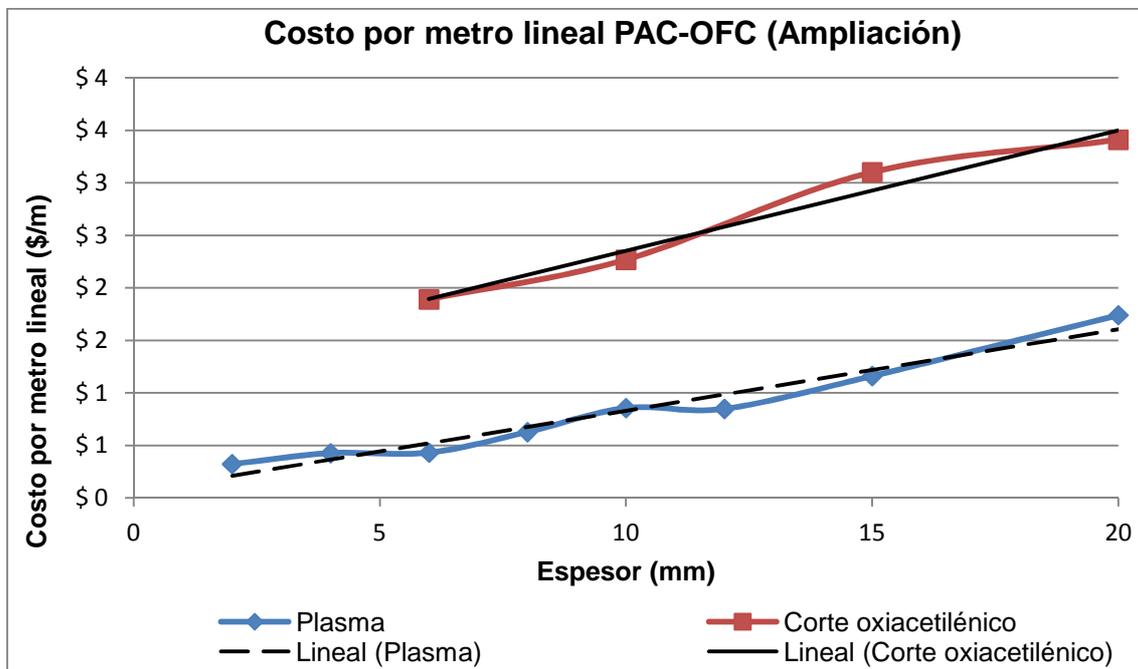


Figura 5.2 Gráfico comparativo del costo de corte por metro lineal por los procesos PAC y OFC, para acero ASTM A-36. (Ampliación)

La figura 5.2 muestra que para el corte de acero ASTM A-36 en el rango de espesores 2 a 20 mm el costo por metro de corte por plasma es en promedio la mitad del costo del corte oxiacetilénico,

5.4.1.2. Acero Inoxidable AISI A-304 y Acero ASTM -36

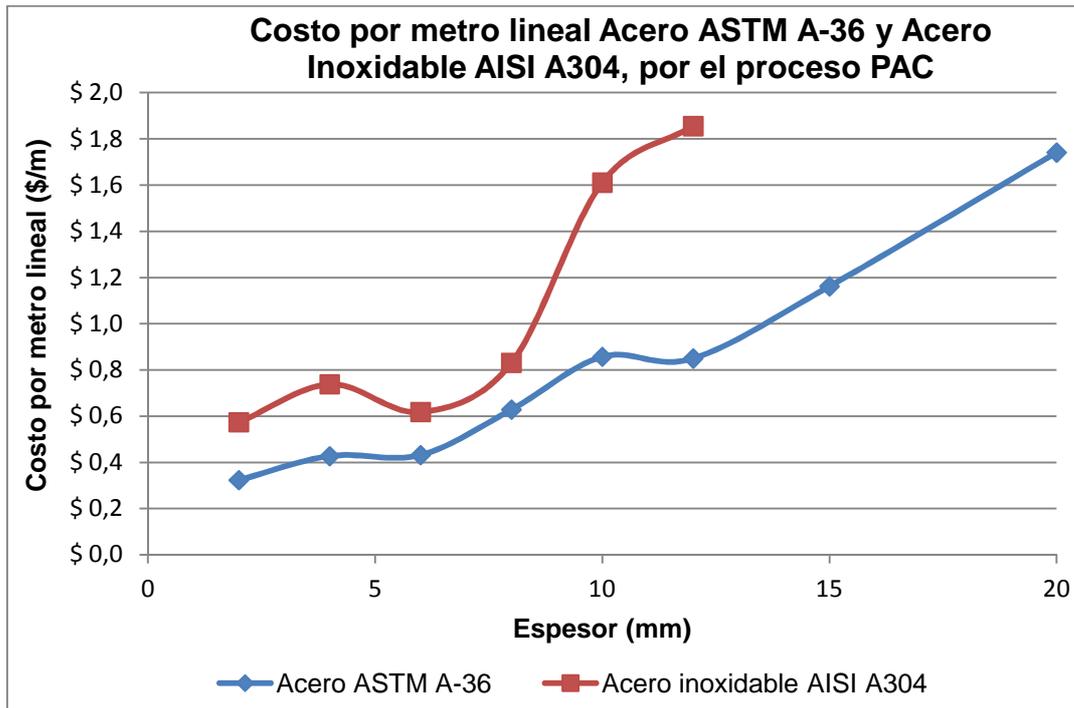


Figura 5.3 Gráfico comparativo del costo por metro lineal para el acero ASTM A-36 y acero inoxidable AISI 304

Debido a que el acero inoxidable no puede ser cortado por el proceso OFC estándar, en la figura 5.3 se compara el costo por metro del acero ASTM A-36 y el acero inoxidable AISI 304 utilizando el proceso PAC, dando como resultado que el costo de corte por metro lineal de acero al carbono es menor en comparación con el acero inoxidable.

5.4.1.3. Costo de corte vs. Metros cortados

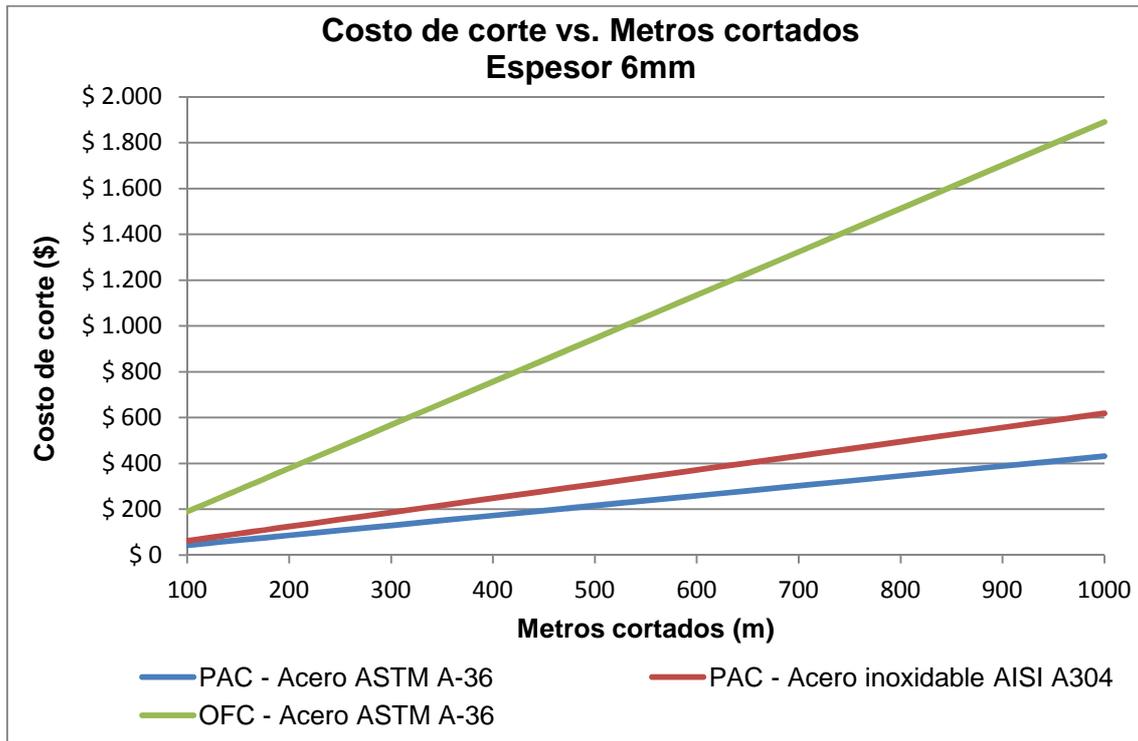


Figura 5.4 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 6mm.

En esta figura 5.4 se observa que para un espesor de 6 mm el corte más económico se realiza a través del proceso por plasma que es 4,4 veces menos costoso que el corte oxiacetilénico. Por otro lado, refiriéndose al proceso PAC se observa que cortar acero inoxidable de 6 mm es 1,5 veces más costoso que cortar acero ASTM A-36 del mismo espesor.

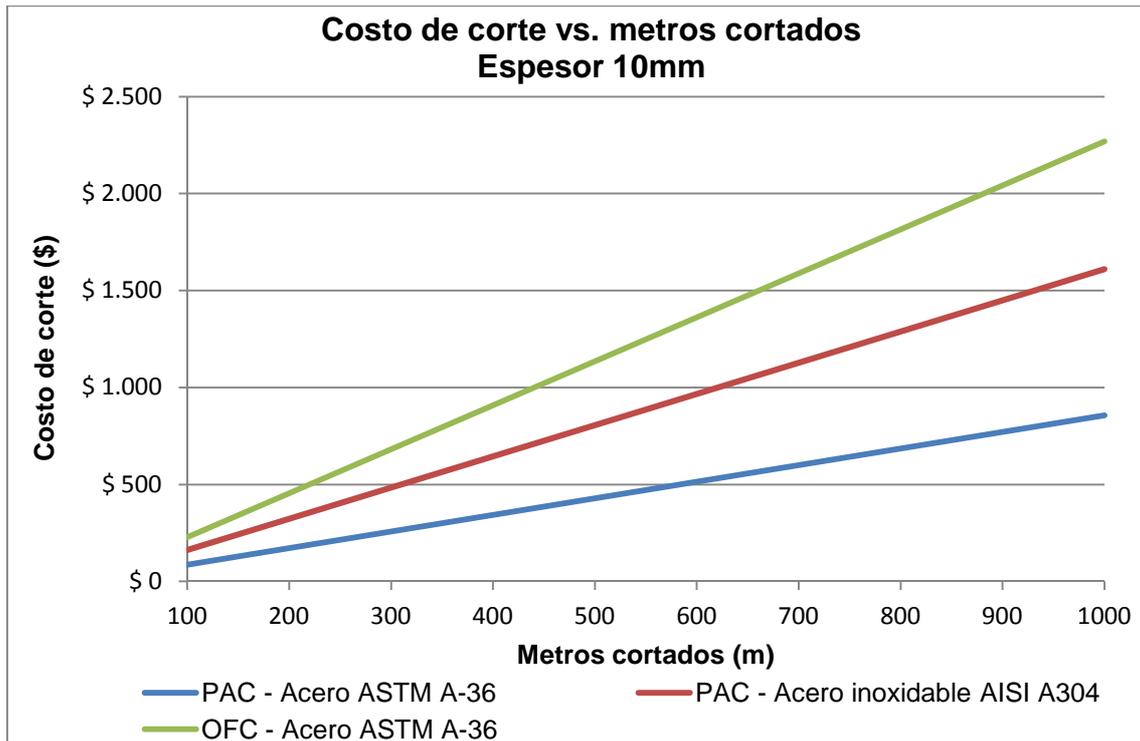


Figura 5.5 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 10mm.

En esta figura 5.5 se observa que para un espesor de 10 mm el corte más económico se realiza a través del proceso por plasma que es 2,6 veces menos costoso que el corte oxiacetilénico. Por otro lado, refiriéndose al proceso PAC se observa que cortar acero inoxidable de 10 mm es 1,9 veces más costoso que cortar acero ASTM A-36 del mismo espesor.

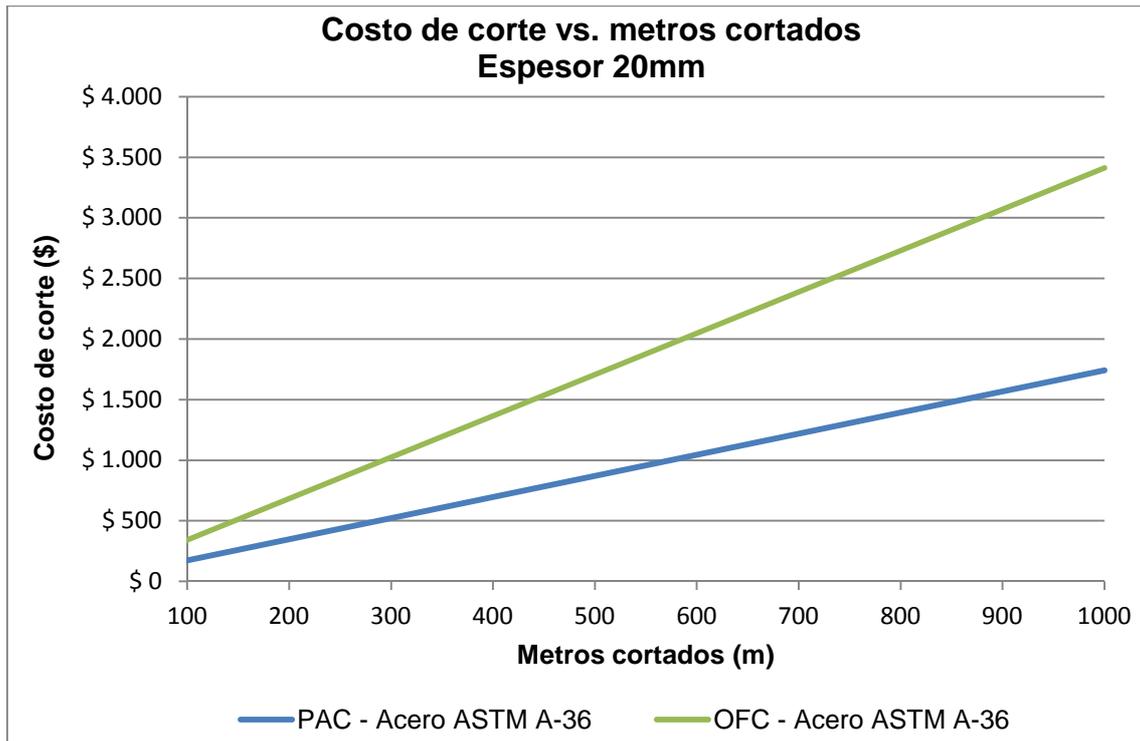


Figura 5.6 Costo de corte vs. Metros cortados para un espesor de 20mm.

En esta figura 5.6 se observa que para un espesor de 20 mm el corte oxiacetilénico es definitivamente más costoso que el corte por plasma, aproximadamente se duplica el precio para un mismo material.

Comparando las figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se corroboran los resultados obtenidos, así, la diferencia de costos de producción entre los procesos PAC y OFC va decreciendo hasta que estos virtualmente se igualan en el espesor 30 mm.

5.5. SEGURIDAD INDUSTRIAL

5.5.1. INTRODUCCION

Los peligros relacionados con el corte constituyen una combinación de riesgos contra la salud y la seguridad. Por su propia naturaleza, el corte produce humos y ruido, emite radiación, hace uso de gases y puede provocar quemaduras, incendios y explosiones. La mejor forma de prevenir los accidentes es eliminar los riesgos o controlarlos desde su origen. Esto ha generado la implementación del uso de ropa de seguridad y de gran variedad de dispositivos de protección personal.

Por estas razones se describen los siguientes aspectos generales para precautelar la vida y la seguridad de las personas así como la utilización segura de los equipos.

A continuación se describirá los principales aspectos de la seguridad industrial para la práctica del corte térmico PAC y OFC, sin embargo como los dos procesos representan en varios aspectos los mismos riesgos, solo en casos exclusivos se hará una diferenciación.

5.5.2. RIESGOS Y EVALUACIÓN DE RIESGOS

Los gases en estado comprimido son en la actualidad prácticamente indispensables para llevar a cabo la mayoría de los procesos de soldadura y corte. Por su gran capacidad inflamable, el gas más utilizado es el acetileno que, combinado con el oxígeno, es la base corte oxiacetilénico. El uso de aire comprimido por medio de compresores presenta riesgo de explosión para el caso de corte por plasma.¹⁰⁴

¹⁰⁴ http://hysel.com.ar/capacitacion_dn/Herramientas/Oxicorte.pdf

5.5.2.1. Riesgos¹⁰⁵

Los riesgos en el corte pueden ser agrupados en las siguientes categorías:

- Riesgo de fuego y explosiones.
- Riesgo a la salud.
- Otros riesgos específicos a la operación, como pérdida de estabilidad de la estructura de la máquina.

5.5.2.1.1. *Riesgo de fuego y explosiones*

Los peligros de fuego y explosiones en el corte son causados principalmente por problemas en el sistema de suministro de gases, las altas temperaturas utilizadas ó la escoria a alta temperatura producida en el proceso. Estos riesgos incluyen:

- Fuego y explosiones resultantes de liberación del gas combustible o del oxígeno a la atmósfera debido a mangueras dañadas; fugas en acoplamientos, conexiones de mangueras o en el equipamiento del sistema de suministro de gases; puede ser producido por la apertura brusca o inadvertida de las válvulas en la línea de suministro de gases.
- Fuego y explosiones en el sistema de suministro de gases causado por:
 - Retroceso de la llama producida por no haber purgado la línea de gas antes de operar, o por un retorno del gas en la línea de oxígeno o viceversa
 - Descomposición o detonación del acetileno en ausencia de oxígeno causada por un retroceso de llama o sobrecalentamiento del cilindro de gas.
 - Alta presión de oxígeno (sin gas combustible) lo cual promueve la combustión de materiales como aceite, grasa, compuestos orgánicos, aluminio y sus aleaciones, y elastómeros usados en asientos y sellos de válvulas.
- Explosiones producto de sobre-presurización del sistema de suministro de gases.

¹⁰⁵ <http://www.labour.gov.hk/eng/public/os/B/welding2.pdf>

- Fuego surgido de residuos inflamables o combustibles en la pieza de trabajo.
- Fuego surgido de la ignición de materiales inflamables o combustibles en los alrededores de la llama, superficies calientes de la pieza de trabajo, ó escoria caliente producto del proceso.

5.5.2.1.2. *Riesgo a la salud*

Son principalmente causados por la radiación y gases tóxicos, o gases emitidos durante el proceso. Los problemas a la salud resultantes incluyen:

- Daños oculares, tales como:
 - Quemaduras y molestias en los ojos debido a la intensidad de la luz y calor emitido en la operación.
 - Cataratas causadas por la radiación del metal fundido, provocando una incapacidad para ver las cosas claramente.
 - Ulceraciones en la cornea y conjuntivitis debido a la expulsión de partículas como escorias y chispas del corte.
- Irritación y enrojecimiento de la piel provocada por la sobre-exposición a la radiación.
- Enfermedad debido a la inhalación de gases tóxicos formados durante el proceso, como:
 - Enfermedades producto de gases tóxicos de metales como: plomo, cadmio, berilio.
 - Irritaciones bronquiales y pulmonares debido a gases tóxicos como: óxidos de nitrógeno, fluoruros.
- Quemaduras con la llama, escoria caliente, o superficies calientes de la pieza de trabajo.
- Fuerte fiebre por la prolongada operación con la llama, especialmente en espacios confinados.
- Daños personales provocados por el transporte de cilindros o pieza grandes.

5.5.2.1.3. *Riesgo de choque eléctrico*

En el caso del proceso PAC, se tiene manejo de energía eléctrica por lo tanto se hace preponderante analizar este aspecto. El contacto directo con piezas eléctricas conectadas puede provocar un electrochoque fatal o quemaduras graves.

- Al hacer funcionar el sistema de plasma, se completa un circuito eléctrico entre la antorcha y la pieza a cortar. La pieza a cortar es parte del circuito eléctrico, como también cualquier cosa que se encuentre en contacto con ella.
- Nunca toque el cuerpo de la antorcha, la pieza a cortar o el agua en una mesa de agua cuando el sistema de plasma se encuentra en funcionamiento.

5.5.2.1.4. *Humos tóxicos*

El arco de plasma es por si solo la fuente de calor que se usa para cortar. Según esto, aunque el arco de plasma no ha sido identificado como la fuente de humo tóxico, el material que se corta puede ser la fuente de humo o gases tóxicos que vacían el oxígeno.

El humo producido varía según el metal que esta cortándose. Metales que pueden liberar humo tóxico incluyen, pero no están limitados a, acero inoxidable, acero al carbón, cinc (galvanizado), y cobre.

En algunos casos, el metal puede estar recubierto con una sustancia que podría liberar humos tóxicos. Los recubrimientos tóxicos incluyen, pero no están limitados a, plomo (en algunas pinturas), cadmio (en algunas pinturas y rellenos), y berilio.

Los gases producidos por el corte por plasma varían basándose en el material a cortarse y el método de cortar, pero pueden incluir ozono, óxidos de nitrógeno, cromo hexavalente, hidrogeno, y otras sustancias, si están contenidas dentro o liberadas por el material que se corta.

Se debe tener cuidado de minimizar la exposición del humo producido por cualquier proceso industrial. Según la composición química y la concentración de humo (al igual que otros factores, tales como la ventilación), puede haber el riesgo de enfermedad física, tal como defectos de natividad o cáncer.

Es la responsabilidad del dueño del equipo y instalación el comprobar la calidad de aire en el lugar donde se está usando el equipo para garantizar que la calidad de aire en el lugar de trabajo cumpla con todas las normas y reglamentos locales y nacionales.

El nivel de calidad de aire en cualquier lugar de trabajo relevante depende en variables específicas al sitio tales como:

- Diseño de la mesa (mojada, seca, bajo agua).
- La composición del material, el acabado de la superficie, y la composición de los recubrimientos.
- Volumen que se quita del material.
- La duración del corte o ranura.
- Tamaño, volumen del aire, ventilación y filtración del lugar de trabajo.
- Equipo de protección personal.
- Numero de cortes en la operación.
- Otros procesos del lugar que pueden producir humo.

5.5.2.2. Evaluación de riesgos¹⁰⁶

La evaluación debe ser realizada sobre los riesgos mencionados en el punto 5.5.2.1., este proceso establecerá las medidas de seguridad apropiadas, procedimientos de trabajo seguro y respuesta a emergencias.

Este proceso debe ser conducido por una persona con el conocimiento, experiencia y entrenamiento apropiado.

5.5.2.2.1. Los pasos básicos en la evaluación de riesgos incluyen:

- Identificación del riesgo.

¹⁰⁶ <http://www.labour.gov.hk/eng/public/os/B/welding2.pdf>

- Consideración de quien será afectado y como.
- Evaluación del riesgo y consideración de si las medidas de seguridad existentes son adecuadas ó más deben ser realizadas.
- Anotación de un reporte explicado fácilmente
- Revisión de la evaluación continuamente y re-evaluar si es necesario.

5.5.2.2.2. Factores a ser considerados en la evaluación de riesgos.

- Gases requeridos y sistema de suministro de los mismos
- Ambiente de trabajo, como:
 - Ventilación
 - Ambientes de trabajo específico, tales como: espacios confinados, ambientes presurizados o ricos en oxígeno.
 - Espacio de trabajo que restringe el movimiento corporal
 - Trabajos cerca de materiales inflamables y combustibles
- Particularidades del trabajo, como:
 - Duración y frecuencia de la operación de corte.
 - Operación en piezas de trabajo con posibles residuos combustibles o inflamables
 - Trabajos en altura
 - Tamaño, forma y peso de las piezas de trabajo

La evaluación de riesgos debe ser revisada regularmente y re-evaluada si es necesario.

5.5.3. MEDIDAS DE SEGURIDAD

El objetivo primario de adoptar medidas de seguridad es eliminar o reducir tan bajo como sean posibles los riesgos en las operaciones de corte. Basados en los resultados obtenidos de la evaluación de riesgos, normas de seguridad apropiadas deben ser establecidas, implementadas y mantenidas.¹⁰⁷

¹⁰⁷ <http://www.labour.gov.hk/eng/public/os/B/welding2.pdf>

5.5.3.1. Ventilación¹⁰⁸

La ventilación provee el medio para remover humos tóxicos y gases emitidos durante el proceso, además de abastecer un aire fresco para el trabajador. El tipo de ventilación requerida debe ser evaluada de acuerdo al ambiente de lugar de trabajo, el volumen de trabajo y la toxicidad de los humos o gases emitidos durante el proceso.

5.5.3.1.1. Ventilación general

Una ventilación general (preferiblemente por un medio mecánico) es adecuada para un trabajo de corte infrecuente y de corta duración que no emite humos tóxicos los cuales están localizados en el aire abierto o en un bien ventilado taller. Los gases tóxicos incluyen derivados de metales como: plomo, cadmio, berilio y zinc.

5.5.3.1.2. Ventilación local

No obstante la ventilación general es usada en el taller, la ventilación local es requerida para operaciones de corte que emiten humos y gases tóxicos, u operaciones que involucran una producción pesada. La campana de extracción debe estar ubicada tan cerca como sea posible del sitio de trabajo para una efectiva remoción de humos antes que estos se dispersen a otras partes del taller.

5.5.3.2. Sistema de suministro de gases y dispositivos asociados proceso OFC¹⁰⁹

En general cada uno de los gases (oxígeno y acetileno) es suministrado por un cilindro independiente. Básicamente, cada gas es suministrado a través de una manguera hacia la antorcha donde se mezclan en una proporción adecuada y se combustionan para formar la llama requerida. El suministro de gases debe ser ajustado y monitoreado por un regulador de presión provisto de un manómetro para cada cilindro. Además, para reducir los riesgos de fuego y explosión en el sistema, estos dispositivos deben estar incluidos:

¹⁰⁸ <http://www.oshc.org.hk/others/bookshelf/BB060E.pdf>

¹⁰⁹ <http://www.labour.gov.hk/eng/public/os/B/welding2.pdf>

- Una válvula anti-retorno en cada entrada a la antorcha para prevenir el retorno del oxígeno en la línea de gas combustible o viceversa.
- Un arrestador de llama que posee una válvula de corte de presión o temperatura para prevenir la propagación de la llama desde la boquilla hacia los cilindros.

5.5.3.2.1. Ubicación de cilindros

Los cilindros en uso y las válvulas de seguridad en la instalación de gases deben estar localizados en un lugar conveniente, fácilmente accesible al trabajador para que en caso de emergencia sean cerradas inmediatamente el suministro de gases.

5.5.3.2.2. Mangueras

Las mangueras deben ser las más cortas y las conexiones de mangueras deber ser reducidas tanto como sea razonablemente posible para reducir la posibilidad de fugas de gas. Se debe poner atención en los siguientes puntos cuando se colocan tuberías de gas:

- Deben ser fácilmente inspeccionadas
- Una fuga de gas de las mangueras, si hay alguna, debe ser fácil y efectivamente removida por la ventilación y no debe acumularse en regiones localizadas
- Las mangueras no deben ser enrolladas alrededor del cilindro o del regulador de presión. El fuego en una manguera enrollada es difícil de extinguir.

5.5.3.2.3. Cilindros

Los cilindros deben tener en color de acuerdo a la legislación vigente, para una fácil identificación.

5.5.3.3. Medidas para reducir el riesgo de exposición al humo genera en el PAC

- Quite todos los recubrimientos y solventes del metal a cortar.

- Use ventilación extractora local para quitar humo del aire.
- No inhale el humo. Use un respirador con fuente propia de aire cuando corte cualquier metal cubierto con, o sospechado de contener, elementos tóxicos.
- Garantice que aquellos usando equipo de cortar, al igual que aparatos de respiración con aire propio de aire, estén capacitados y entrenados en el uso apropiado del equipo.
- Nunca corte recipientes con materiales potencialmente tóxicos adentro. Primero, vacíe y limpie el recipiente adecuadamente.
- Monitoree o compruebe la calidad del aire en el sitio como fuera necesario.
- Consulte con un experto local para realizar un plan al sitio para garantizar la calidad de aire seguro.

5.5.3.4. Equipo de protección personal¹¹⁰

El objetivo principal del uso del equipo de protección personal es proveer protección al trabajador de riegos por objetos calientes, radiación, humos tóxicos.

5.5.3.4.1. Protección visual

Protege los ojos de lesiones por radiación y de objetos extraños como escorias o chispas. Deben cumplir con ANSI Z87.1, Occupational and Educational Eye and Face Protection Devices.

Soldadura y corte con gas combustible. Gafas protectoras u otra protección de aceptada se debe llevar durante todas las operaciones de corte con gas oxiacetilénico y corte por plasma. Se recomienda que las protecciones para los ojos incluyan defensas laterales.

¹¹⁰ BENAVIDES Alexandra, *Manual de Seguridad en Soldadura, Corte y Procesos Relacionados de Acuerdo con la Norma ANSI Z49.1:2005.*

En el caso de corte por plasma los rayos del arco de plasma producen rayos intensos visibles e invisibles (ultravioleta o infrarrojo) que pueden quemar los ojos y la piel.

- Utilice protección para los ojos de conformidad con los códigos locales o nacionales aplicables.
- Colóquese protectores para los ojos (gafas o anteojos protectores con protectores laterales, y bien un casco de soldar) con lentes con sombreado adecuado para proteger sus ojos de los rayos ultravioleta e infrarrojos del arco.

5.5.3.4.2. Protección de la piel y del cuerpo

Incluye protección para la cara, manos, pies, y cuerpo. La ropa debe ser seleccionada para minimizar el potencial de ignición, quemado, atrapado de chispas calientes, o choque eléctrico.

La ropa de protección apropiada para cualquier operación de soldadura y corte variará con el tamaño, naturaleza, y situación del trabajo a ser realizado. La ropa debería mantenerse limpia, de aceite y grasa ya que sus calidades protectoras pueden disminuirse. Los trabajadores deben utilizar:

- **Guantes.** Todos los soldadores y cortadores deben llevar guantes de protección resistentes a la llama. Todos los guantes deben estar en buen estado, secos, y capaces de proporcionar protección del choque eléctrico por el equipo de soldadura.
Se recomiendan guantes hechos de cuero, caucho, u otros materiales convenientes. Deberían usarse revestimientos aislantes para proteger áreas expuestas a energía radiante alta.
- **Delantales.** Se deben usar delantales resistentes a la llama durables para proteger el frente del cuerpo cuando sea necesaria una protección adicional contra las chispas y la energía radiante.
Se recomiendan delantales hechos de cuero u otros materiales convenientes. Deberían usarse revestimientos aislantes para proteger áreas expuestas a energía radiante alta.

- **Polainas.** Para trabajo pesado, se usarán polainas resistentes a la llama u otros medios equivalentes para dar protección agregada a las piernas, cuando sea necesario.

Para trabajo en producción, una pantalla de metal en plancha delante de las piernas del obrero puede proporcionar protección extensa contra las chispas y el metal fundido en operaciones de corte.

- **Capotillos y Mangas.** Se llevarán mangas de capotillo o tapas del hombro con baberos hechos de cuero u otro material resistente a la llama se deben llevar durante operaciones de soldadura y corte sobre cabeza, o cuando sea necesario.
- **Otra Ropa de Protección.** Tapones resistentes a la llama apropiadamente ajustados en los canales de la oreja, o protección equivalente, se deben usar donde exista riesgo para los canales de la oreja. Gorras hechas de material resistente a la llama se deben llevar bajo los cascos, cuando sea necesario, para prevenir quemaduras en la cabeza. Ropa seca, libre de agujeros será suficiente y adecuada para aislar al soldador del choque eléctrico.

5.5.3.4.3. Protección auditiva

Se debe controlar a la fuente que produce el ruido cuando es factible. Cuando los métodos de control no disminuyen la exposición al ruido dentro de los límites aceptables, se deben usar dispositivos de protección personales como tapones para las orejas.

5.5.3.4.4. Protección respiratoria

Cuando el control en la ventilación no reduce los contaminantes del aire a niveles aceptables o cuando la aplicación de controles no es factible, se deben usar equipos de protección respiratorios para proteger al personal del riesgo de las concentraciones de contaminantes aerotransportados, como polvo.

5.5.4. PRÁCTICA SEGURA¹¹¹

Proveen instrucciones al personal para asegurar la salud y seguridad en el trabajo. Puede ser necesario mostrar reglas y procedimientos importantes en forma de noticias o posters en el área de trabajo para despertar una atención especial.

5.5.4.1. Preparación antes de iniciar el corte

- Evaluar los riesgos de la operación para permitir la selección de las medidas de control apropiadas y el equipo de protección personal. Prestar especial atención a condiciones de trabajo específico.
- Establecer procedimientos seguros de operación
- Proveer entrenamiento e instrucciones a los trabajadores
- Asegurar la limpieza del área de trabajo y tomar medidas para prevenir el fuego
- Inculcar el chequeo del equipo antes del uso

5.5.4.2. Durante el corte

- Utilizar el equipo de protección personal y seguir procedimientos seguros de operación
- Manejar la llama de corte con gran cuidado. No dejar desatendida ni por un corto periodo de tiempo.

5.5.4.3. Después del corte proceso OFC

- Extinguir la llama de la boquilla
- Cerrar las válvulas de los cilindros tanto de oxígeno como de acetileno
- Asegurarse que la escoria, chispas y la pieza de trabajo han sido completamente enfriadas antes de Salir del área de trabajo.

5.5.4.4. Consideraciones especiales para el proceso PAC

5.5.4.4.1. Área de corte

¹¹¹ <http://www.oshc.org.hk/others/bookshelf/BB060E.pdf>

Prepare el área de corte para reducir la reflexión y transmisión de la luz ultravioleta:

- Pinte las paredes y demás superficies con colores oscuros para reducir la reflexión.
- Utilice pantallas o barreras protectoras para proteger a los demás de los destellos.
- Advierta a los demás que no debe mirarse el arco. Utilice carteles o letreros.

5.5.4.4.2. Seguridad de toma a tierra.

- **Cable de trabajo.** La pinza del cable de trabajo debe estar bien sujeta a la pieza y hacer un buen contacto de metal a metal con ella o bien con la mesa de trabajo. No conecte el cable con la parte que va a quedar separada del corte.
- **Mesa de trabajo.** Conecte la mesa de trabajo a una buena toma de tierra, de conformidad con los códigos eléctricos o locales apropiados.
- **Potencia primaria de entrada.** Asegúrese de que el alambre de toma a tierra del cordón de alimentación esta conectado al terminal de tierra en la caja del interruptor de corriente.

5.5.4.5. Prevención y protección del fuego

- Mover todos los materiales inflamables y combustibles a un lugar seguro alejado del área de trabajo. Use medios adecuados para proteger los materiales combustibles que no pueden ser movidos del contacto cercano con la llama, calor, escoria caliente o chispas como cubriéndolo con materiales resistentes al fuego.
- Use medios adecuados para prevenir que la escoria o chispas estén al alcance de materiales combustibles como ductos, canales o agujeros a través de paredes o pisos.
- Prevenir que el equipo de corte oxiacetilénico sea contaminado con aceite o grasas.

- Antes de empezar el trabajo de corte en contenedores usados, asegurarse que el contenedor este libre de cualquier substancia que pueda emitir vapores tóxicos o inflamables mediante el lavado con solventes adecuados y purgue con gases inertes.
- Proveer un confiable equipo contra incendios, tales como, extintores, cubos de arena cerca del área de trabajo.
- Asegurarse que las chispas y escoria del trabajo sean extinguidas y enfriadas antes de salir del área de trabajo.

5.5.4.6. Almacenamiento y transporte seguro de cilindros

- Asegurarse que los cilindros estén apropiadamente pintados y no tengan signos de fugas de gas
- Almacenar los cilindros en un lugar fresco y bien ventilado, alejado de cualquier fuente de calor o ignición, mantener los cilindros en uso alejados del trabajo de corte
- Siempre mantener el cilindro en posición vertical y asegurar el anclado a soportes resistentes, durante el almacenamiento y el uso.
- Mantener la cantidad de cilindros en el lugar de almacenamiento en un número mínimo y en concordancia con los requerimientos.
- Manejar los cilindros con cuidado y no golpear o tirarlos fuertemente. Informar inmediatamente al distribuidor si el cilindro es encontrado físicamente dañado.
- Movilizar los cilindros en vehículos diseñados para el propósito y asegurar la prevención de daños en la válvula del cilindro y minimizar el riesgo de daño.

5.5.4.7. Prevención ante electrochoque

Todos los sistemas por plasma de Hypertherm usan alto voltaje en el proceso de corte (son comunes los voltajes CD de 200 a 400). Tome las siguientes precauciones cuando se utiliza el equipo de plasma:

- Use guantes y botas aislantes y mantenga el cuerpo y la ropa secos.

- No se siente, se pare o se ponga sobre cualquier superficie húmeda cuando este trabajando con el equipo.
- Aíslese eléctricamente de la pieza a cortar y de la tierra utilizando alfombrillas o cubiertas de aislamiento secas lo suficiente grandes como para impedir todo contacto físico con la pieza a cortar o con la tierra. Si su única opción es trabajar en una área húmeda o cerca de ella, sea muy cauteloso.
- Instale un interruptor de corriente adecuado en cuanto a fusibles, en una pared cercana a la fuente de energía. Este interruptor permitirá al operador desconectar rápidamente la fuente de energía en caso de emergencia.
- Al utilizar una mesa de agua, asegúrese de que esta se encuentre correctamente conectada a la toma a tierra.
- Instale este equipo y conéctelo a tierra según el manual de instrucciones y de conformidad con los códigos locales y nacionales.
- Inspeccione el cordón de alimentación primaria con frecuencia para asegurar de que no este dañado ni agrietado. Si el cordón de alimentación primaria esta dañado, replácelo inmediatamente. **Un cable pelado puede provocar la muerte.**
- Inspeccione las mangueras de la antorcha y replácelas cuando se encuentran dañadas.
- No toque la pieza ni los recortes cuando se esta cortando. Deje la pieza en su lugar o sobre la mesa de trabajo con el cable de trabajo con el cable de trabajo conectado en todo momento
- Antes de inspeccionar, limpiar o cambiar las piezas de la antorcha, desconecte la potencia primaria o desenchufe la fuente de energía.
- Nunca evite o descuide los bloqueos de seguridad.
- Antes de retirar la cubierta de una fuente de energía o del gabinete de un sistema, desconecte la potencia primaria de entrada. Espere 5 minutos después de desconectar la potencia primaria para permitir la descarga de los condensadores.
- Nunca opere el sistema de plasma sin que las tapas de la fuente de energía estén en su lugar. Las conexiones expuestas de la fuente de energía presentan un serio riesgo eléctrico.

- Al hacer conexiones de entrada, conecte el conductor de conexión a tierra en primer lugar.
- Cada sistema de plasma Hypertherm está diseñado para ser utilizado solo con antorchas Hypertherm específicas. No utilice antorchas diferentes, que podrían recalentarse y ser peligrosas.

5.5.4.8. Previsiones especiales

5.5.4.8.1. Operación de marcapasos y de audífonos.

Los campos magnéticos producidos por las elevadas corrientes pueden afectar la operación de marcapasos y de audífonos. Para reducir los peligros del campo magnético:

- Mantenga el cable de trabajo y la manguera de la antorcha a un lado, lejos del cuerpo.
- Dirija la manguera antorcha lo más cerca posible del cable de trabajo.
- Manténgase tan lejos de la fuente de energía como sea posible.

5.5.4.8.2. Antorchas de encendido instantáneo.

El arco de plasma se enciende inmediatamente después de activarse el interruptor de la antorcha. El arco de plasma puede cortar a través de guantes y de la piel con rapidez.

- Manténgase alejado de la punta de la antorcha.
- No sostenga el metal junto al trayecto del corte.
- Nunca apunte la antorcha hacia usted mismo o hacia otras personas.

5.5.5. EMERGENCIA¹¹²

Estar preparados ante una emergencia es vital, una rápida y correcta respuesta es necesaria en caso de emergencias con el fin de reducir lesiones, enfermedades y otros daños, las situaciones de emergencias comunes son fugas de gas, fuego y explosiones.

¹¹² <http://www.labour.gov.hk/eng/public/os/B/welding2.pdf>

5.5.5.1. Procedimiento de respuesta ante una emergencia

Los procedimientos de respuesta ante una emergencia deben ser establecidos para que el personal siga en un evento serio de inminente peligro. El procedimiento debe incluir un guiado para el personal explicando cuando y como deben parar el trabajo y moverse a un lugar seguro o en su defecto una evacuación total.

El equipo de emergencia apropiado debe ser diseñado para manejar situaciones de emergencia, el equipo debe incluir:

- Alarma de fuego
- Equipo contra incendios, como mangueras, extintores.
- Equipo de primeros auxilios.

5.5.5.2. Respuesta a una posible situación de emergencia

5.5.5.2.1. Fugas de gases

Si la fuga de gas es ubicada en la línea de suministro de gas

- Aislar el suministro de gas, cerrando las válvulas de los cilindros.
- Informar a todas las personas en el lugar de trabajo
- Aislar todas las fuentes de ignición
- Evacuar el puesto de trabajo y llamar al departamento de bomberos

5.5.5.2.2. Retorno de llama

- Primero cerrar la válvula de oxígeno de la antorcha, y luego la válvula de gas combustible.
- Completar el procedimiento de apagado.
- Investigar las causas y rectificar la falla
- Re-utilizar la antorcha solo después de que este completamente frío.

5.5.5.2.3. Fuego en la manguera de gas

- Aislar el suministro de gas combustible y oxígeno, cerrando las válvulas de los cilindros.

- Puede intentar controlar el fuego con el equipo contra incendios, solo cuando este no represente riesgo de lesiones personales.
- Activar la alarma de incendio y llamar al departamento de bomberos

5.5.5.2.4. Fuego envolvente en el cilindro de acetileno

Si el fuego envuelve el cilindro de acetileno siempre representa un riesgo de explosión. Sin embargo, bajo circunstancias seguras las siguientes medidas iniciales pueden ser apropiadamente adoptadas:

- Enfriar el cilindro rociando agua solo si es seguro hacerlo
- Cerrar la válvula del cilindro para controlar el fuego solo si es seguro hacerlo
- Evacuar las instalaciones activando la alarma de incendio

Nunca intentar remover un cilindro de acetileno que ha sido envuelto por fuego, o mover uno que ha sido afectado por el calor creado por el fuego. Mover el cilindro puede provocar una explosión.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Una vez finalizado el proyecto se cumplió el objetivo planteado obteniendo los parámetros de trabajo mostrados en las tablas de la 4.22 a la 4.24 y a partir de estos valores el subsiguiente análisis de costos.
- El análisis de cargas realizado sobre la mesa de corte demostró que a pesar de ser construida empíricamente, la misma resiste las solicitaciones mecánicas a las que estará expuesta con un factor de seguridad de 2.4.
- El costo de corte es inversamente proporcional a la velocidad, siendo el proceso OFC el que presenta relativamente bajas velocidades comparadas con el proceso PAC, por lo tanto, el costo de corte en el primero es mayor.
- La velocidad de corte para el acero inoxidable es menor que para el acero al carbono, esto se debe a que en el proceso PAC se requiere que el material sea eléctricamente conductor y siendo el acero inoxidable menos conductor que el acero al carbono, este presenta mayor resistencia a la transferencia de energía a través del gas de plasma, disminuyendo por esta causa la velocidad de corte e incrementándose el costo del proceso para este material.
- En el proceso PAC, además de la velocidad de corte otro factor de influye en gran medida en el costo es la vida útil de los consumibles, estando este último relacionado directamente con la correcta selección de los parámetros de trabajo especialmente el amperaje y el mantenimiento de la antorcha.
- El costo de corte por plasma y oxiacetilénico tiene un punto de equilibrio aproximadamente en 30 mm de espesor, por lo tanto, hasta antes de este valor el proceso de corte a utilizar debe ser por plasma. Se hace

mucho énfasis en esta conclusión ya que la empresa solo utilizaba el proceso PAC para cortar espesores de hasta 8 mm y para espesores superiores se utilizaba el proceso OFC duplicando así sus costos de producción como se ilustra en las Figura 5.1 y Figura 5.2.

- Un defecto común en el proceso de corte por arco de plasma es la escoria de alta velocidad junto con un ángulo de corte positivo, que tiene como causa principal la elevada velocidad de corte, distancia antorcha-pieza de trabajo alta y la selección incorrecta de consumibles.
- La mejor calidad de corte y vida útil de las piezas generalmente se consigue cuando el amperaje no alcanza el 100% de la capacidad de la boquilla.
- La formación de escoria en la parte inferior del corte es un defecto común en el proceso de corte oxiacetilénico, este se debe fundamentalmente a: velocidad de corte demasiado baja, llama de precalentamiento demasiado fuerte y elevada presión de oxígeno de corte. Estos factores son independientes, de esta manera, el defecto puede ser resultado de uno solo o de los tres al mismo tiempo.
- La formación de estos óxidos más refractarios puede dificultar la operación de corte oxiacetilénico. Así, para los aceros al cromo, a partir de una cierta concentración en cromo, el acero presenta dificultades de corte debido a la formación de óxido de cromo que tiene un punto de fusión muy alto respecto al del óxido de hierro y el hierro. El corte oxiacetilénico se limita al acero al carbono y no resulta efectivo en acero inoxidable o aluminio.
- Las tablas de corte proporcionadas por el fabricante del equipo de plasma especifican velocidades de corte de laboratorio que producirán, en condiciones ideales, un mejor ángulo de bisel, mínima escoria y el mejor acabado de la superficie, sin embargo estas tablas tienen el propósito de proporcionar un punto de partida para cada requerimiento de corte debido a que todo sistema de corte requiere después afinarse para obtener la calidad de corte deseada.
- Se define a la velocidad de corte como la rapidez con que la antorcha se mueve respecto a la pieza de trabajo, y su valor depende del tipo de material, espesor, amperaje, tipo de consumibles.

- El amperaje se encarga de proporcionar la energía suficiente al chorro de plasma generado para fundir el metal en las velocidades de corte requeridas. Para un específico espesor de pieza de trabajo y una velocidad de corte dada existe una corriente de corte óptima que produzca el corte deseado. Así pues se selecciona el amperaje de acuerdo al espesor a cortar y se elije el consumible correcto.

6.2. RECOMENDACIONES

- Si se encuentra el operario en el caso de realizar cortes en los límites de rango de cada boquilla (10 mm, 20 mm, 40 mm, 60mm), se recomienda utilizar las boquillas en sus límites superiores de rango ya que de esta manera se pueden utilizar velocidades mayores e incrementar la productividad del proceso.
- Hacer uso de las tablas de velocidades obtenidas en el presente estudio para obtener resultados satisfactorios. A saber, Tablas 4.22 a la 4.24
- Debido a las deficiencias observadas se ha visto la necesidad de realizar la siguiente propuesta a futuro: se recomienda cambiar las antorchas por nuevas ya que la vida útil de estas fue cumplida.
- Se recomienda realizar mantenimientos continuos al sistema de corte atendiendo al punto 4.2.5.1.
- Antes de realizar los cortes asegurarse que las antorchas estén niveladas.
- Se recomienda acatar las medidas de seguridad industrial mostrada en el punto 5.5

BIBLIOGRAFÍA:

1. AMERICAN WELDING SOCIETY, (1996) "*Manual de Soldadura 2*", Ed. PRENTICE, Octava edición, México.
2. ALMEIDA Steeve, VILLENA Cecilia, (2009), "*Soldadura Fuerte en Acero Inoxidable Austenítico*".
3. AMERICAN WELDING SOCIETY, (2005), "*ANSI Z49.1:2005 Safety in Welding, Cutting and Allied Processes*", USA.
4. BAWA H, (2007), "*Procesos de Manufactura*", Ed. McGraw-Hill, Primera edición, México.
5. CACUCI, Dan Gabriel, (2010), "*Handbook of Nuclear Engineering volume 5*", Ed. Springer, USA.
6. CLEVELAND MOTION CONTROLS, "*Burny 10 LCD plus operator's guide*"
7. DEGARMO P, BLACK T, KOHSER R, (2002), "*Materiales y Procesos de Fabricación volumen 2*", Ed Reverté, España.
8. GONZÁLES J, (1991) "*Manual de Soldadura con Llama*", Ed. CEAC, Sexta Edición, España.
9. GROOVER M, (1997), "*Fundamentos de Manufactura Moderna*", Ed. Prentice Hall, Primera edición, México.
10. JANAPETOV M, (1978), "*Soldadura y Corte de Metales*", Ed. MIR, Segunda edición, Moscú.
11. JEFFUS L, (2009), "*Soldadura, Principios y Aplicaciones*", Ed. Paraninfo, Quinta edición, España.
12. LOBJOIS Ch, (2004), "*Fabricación Mecánica, Soldadura y Calderería Transformación de la Chapa - Trazado, Corte, Curvado y Plegado*", Ed. CEAC, España.
13. MADISON J, (1996), "*CNC Machining Handbook*", Ed. Industrial Press Inc, Primera edición, New York.
14. MARKS L, (1960), "*Manual del Ingeniero Mecánico*", Editorial Hispano Americana, Primer edición, México.
15. RODRÍGUEZ Pedro, "*Manual de Soldadura*", Ed. Alsina.
16. SHANGAI GAS WELDING EQUIPMENT CO., "*CNC-4000 Flame/Plasma Cutting equipment operation manual*"

17. SMID P, (2003), "*CNC programming handbook*", Editorial Industrial Press Inc, Segunda edición, New York.
18. ZAMBRANO A, (2007), "*Matemáticas financieras*", Editorial alfa y omega, Tercera edición.
19. ZURITA E,(2012), "*Análisis comparativo de la soldabilidad de planchas de acero A-36 soldadas*".
20. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12110-Tecnologias-de-corte-de-chapa.html>
21. http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/sistemasinteligentes/FFlexible/EL_CONTROL_NUMERICO_COMPUTARIZADO_EN_EL_DESARROLLO_INDUSTRIAL.pdf
22. http://www.burny.com/downloads/ds_burny10lcdplus_spanish.pdf
23. <http://www.chodansinh.net/multidata/20090417180733271682.pdf>
24. <http://www.topfreebiz.com/product/3614804/CNC-Plasma-Cutting-Machine-CNC-3000-CNC-4000.htm>
25. http://web.univ-ubs.fr/limatb/EG2M/Disc_Seminaire/ESAFORM_09/data/pdf/paper259tumcd.pdf
26. http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/401a500/ntp_495.pdf
27. http://www.bugo.com/pdf/Flame%20Ctg%20Hndbk%205_07.pdf
28. http://www.globalsecurity.org/military/library/policy/navy/nrtc/14250_ch5.pdf
29. http://www.esab.ca/literature/Gas%20Apparatus/Miscellaneous/Oxy-Fuel_Cutting_Quality_0558006478_Spanish.pdf
30. <http://es.scribd.com/doc/26775766/AWS-Jefferson-s-Welding-Encyclopedia>
31. [http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-\(1-parte\).html?R=12109](http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/1831-El-corte-de-chapa-mediante-oxicorte-(1-parte).html?R=12109)
32. <http://alec.tamu.edu/LinkClick.aspx?fileticket=f2yzlgm7utQ%3D&tabid=618>
33. <http://ebookbrowse.com/pt-24-precision-plasmarc-system-iefc-s-ce-f-15-771-spanish-jun05-pdf-d373109606>
34. <http://www.soldasur.com/catalogos/HYPERTHERM/CORTE%20POR%20LASMA%20CONSEJOS..pdf>

35. http://www.centricut.com/ArticlesSpanish/2Troubleshooting_PAC_systems_Parts_Life_ProblemsSpa.doc/TroubleshootingPACsystemsPartsLifeProblemsSPAN_0406.pdf
36. <http://thermadyne.com/thermaldynamicsautomation/documents/63-2823%20Operator's%20Ready%20Reference.pdf>
37. <http://www.retroplasma.com/documents/Machine%20Cutting%20Reference%20Guide.pdf>
38. http://www.hypertherm.com/es/Products/Mechanized_Plasma/Systems/Air_Plasma/powermax1650.jsp

ANEXOS