

# **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

## **MONTAJE Y CALIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO, UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE TUBERÍAS HELICOIDALES DE ACERO**

Presentado Ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar al Título  
de Ingeniero Metalúrgico  
Por los Brs. **Hernández O, Eduardo E**  
**Moreno F, Fran Claudio**

Caracas, 2004

## **RESUMEN**

**Hernández O Eduardo E, Moreno F Fran C.**

### **MONTAJE Y CALIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO, UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE TUBERÍAS HELICOIDALES DE ACERO**

**Tutor Académico: Prof. Rodolfo Monsalve. Tutor Industrial: Ing. Orlando Gíl. Tesis. Caracas, UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2004.**

Palabras Claves: SAW, Máquina conformadora de tubos, Tubos con costura Helicoidal, API 5L X65, Material de Aporte, Laminación Controlada, Aceros HSLA.

Este trabajo de investigación se basa en desarrollar el montaje y calibración de una máquina para la fabricación de tubos con costura helicoidal, soldadas por SAW, evaluando el comportamiento de tubos conformados con el acero API 5L X65. Para esto se ha desarrollado una metodología que se divide en dos partes que involucra en su primera fase 1) la planificación en planta del montaje, tomando en consideración los factores necesarios para su realización, 2) el conocimiento de cada componente que conforma la máquina y su función, 3) el acondicionamiento del terreno donde se ubica la conformadora; 4) la calibración de componentes y adecuación de parámetros y dispositivos para la soldadura, 5) calibración de la máquina realizando tuberías con un diámetro de 30” utilizando un acero API 5L B. Una segunda fase del estudio se realizó para estimar la combinación de material de aporte para soldar un acero API 5L X65, para lo que se buscó tres combinaciones distintas de alambre/fundente: Lincoln L61/780, ESAB K12/350 y Lincoln L70/997. Una vez conformados los tubos se cortaron las probetas correspondientes y se analizaron los resultados de ensayos mecánicos para la determinación de la combinación adecuada. Además se estudió las propiedades mecánicas de las bobinas del acero en cuestión, para verificar las especificaciones de la norma y el criterio de exigencia que debe cumplir el proveedor de la materia prima.

De la primera parte se obtuvo que la planificación del montaje ha resultado ser un procedimiento adecuado para ajustar la forma de trabajo. El montaje de la máquina se ha realizado en el tiempo adecuado y en su desarrollo deben tomarse en consideración el funcionamiento de cada componente y el nivel de dificultad que involucra su ensamblaje. En la calibración se logró fabricar una serie de tuberías, las cuales presentaron un diámetro adecuado, facilidad de conformación en la máquina, manteniendo sus dimensiones a lo largo del proceso. En la segunda parte se demostró que las propiedades mecánicas de la zona de fusión de cada combinación alambre/fundente es dependiente de la composición química y las características del material de aporte, encontrándose que en los ensayos de dureza, tracción, doblado e impacto, las combinaciones Lincoln L70/997 y ESAB K12/350, no alcanzan los valores requeridos globalmente, es decir, fallan en uno o más de estos ensayos, no ajustándose para la fabricación de tubos con el acero API 5L X65. Se recomendó poner en funcionamiento los dispositivos de la máquina que se encuentran inactivos, para optimizar su trabajo.

La combinación que arrojó los mejores resultados para ser utilizada en la soldadura del acero API 5L X65 es la combinación L61 (EM12K)/ 780 (F7A2) de Lincoln. Los valores de fluencia y resistencia última a la tracción de las primeras tres bobinas del acero API 5L X65 suministradas por SIDOR se encuentran por debajo de las especificaciones. Luego de que la acería hiciese ajustes en su proceso de laminación controlada temomecánicamente se encontraron resultados por encima de los requeridos por la norma API 5L. A su vez se observaron diferencias en cuanto a las propiedades de la bobina a lo largo de su extensión, por lo que las bobinas del acero API 5L X65 fabricado por SIDOR deben tener un valor mínimo de 78.000 Psi de resistencia a la fluencia. Finalmente se recomienda un estudio metalográfico de microscopía óptica y de barrido en estos aceros así como también un estudio del proceso de laminación de estos aceros HSLA.

# INDICE

<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b><i>xvi</i></b>
<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b><i>xvi</i></b>
<b><i>CAPITULO I</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b><i>MARCO TEÓRICO</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b><i>Parte I</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b><i>Planeación y Control de Proyectos con Pert</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>1</b>
<b>Usos</b> .....	<b>2</b>
<b><i>Planeación y Control de Proyectos con PERT- CPM</i></b> .....	<b><i>3</i></b>
Graficas PERT.....	5
Red de Actividades.....	6
Enfoque de tres estimaciones de PERT.....	6
Diferencias Entre PERT y CPM.....	8
<b><i>Configuración de la Máquina</i></b> .....	<b><i>9</i></b>
<b>Rango de Trabajo</b> .....	<b>9</b>
<b>Partes de la Máquina</b> .....	<b>9</b>
Bastidor de Entrada.....	9
Mesa de Conformación.....	11
Bastidor de Salida.....	12
<b><i>Componentes de la Máquina en Forma Detallada</i></b> .....	<b><i>13</i></b>
Sección Alimentación Posterior (Porta Bobinas).....	13
Sistema de Posicionamiento del Ángulo de Conformación.....	14
Posicionamiento de la Bobina.....	14

Rodillos Controladores de la Alimentación y Cajas de Engranajes .....	14
Rodillos Guías del Alimentador de Entrada.....	15
Sección de Enderezamiento .....	15
<b>Sección de Alimentación Frontal.....</b>	<b>15</b>
Estación de Soldadura del Cordón Transversal.....	15
Sección de Fresado.....	16
Rodillos de Tracción .....	17
Mando Principal Sistema Eléctrico .....	17
Rodillos Laterales Guía.....	18
Consola de Operación y Control .....	18
<b>Sección de Conformación o Mesa de Conformación .....</b>	<b>19</b>
Rodillos de Conformación .....	19
Boom de Conformación .....	20
Sistema Guía de la Soldadura.....	20
Cabezal de Soldadura Interna.....	21
Manejo del Fundente y Sistema de Recuperación.....	21
Control de la Abertura o Separación de Raíz .....	21
<b>Sección de la Jaula o Portal de Salida.....</b>	<b>21</b>
Construcción de la Jaula.....	22
Plataforma de Soldeo .....	22
<b>Bastidor de Salida .....</b>	<b>22</b>

Cortadora de Plasma .....	23
Brazos Expulsores de Tubos .....	23
<b>Plantas Auxiliares .....</b>	<b>24</b>
Sistemas de Energía Hidráulica o Centralina .....	24
<b><i>Operación de la Formadora de Tubos con Costura Helicoidal Byard 2000 .....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b>Bastidor de Entrada .....</b>	<b>25</b>
<b>Mesa de Conformación.....</b>	<b>27</b>
<b>Jaula y Bastidor de Salida.....</b>	<b>28</b>
<b>Conformación de Tubos .....</b>	<b>29</b>
<b>Soldadura y Recuperación de Fundente.....</b>	<b>29</b>
<b>Producción de Tubos .....</b>	<b>30</b>
<b>Control del Diámetro.....</b>	<b>31</b>
<b>Corte del Tubo .....</b>	<b>31</b>
<b>Brazos Expulsores.....</b>	<b>32</b>
<b><i>Soldadura por Arco Sumergido (SAW).....</i></b>	<b><i>33</i></b>
<b>Descripción .....</b>	<b>33</b>
<b>Proceso de Arco Sumergido .....</b>	<b>33</b>
<b>Métodos Generales.....</b>	<b>35</b>
Soldadura Automática .....	35
Variaciones del Proceso .....	35
<b>Equipo.....</b>	<b>36</b>

Fuentes de Potencia.....	36
Controles .....	39
Unidades de Recuperación de Fundente.....	40
Posicionadores y Fijaciones .....	41
<b>Materiales .....</b>	<b>41</b>
Metales Base .....	41
Electrodos.....	42
Fundentes .....	43
<b>Aplicaciones Generales del Proceso .....</b>	<b>47</b>
<b>Variables de Operación .....</b>	<b>48</b>
Amperaje de Soldadura .....	48
Voltaje de Soldadura .....	49
Polaridad .....	50
Velocidad de Desplazamiento .....	51
Tamaño del Electrodo .....	52
Extensión del Electrodo .....	52
Anchura y Espesor de la Capa de Fundente .....	55
<b>Procedimiento de Soldadura.....</b>	<b>56</b>
Diseño de Uniones y Preparación de los Bordes.....	56
<b>Métodos para Iniciar el Arco.....</b>	<b>57</b>
Inicio con Alambre Afilado.....	57

<b>Terminación del Arco.....</b>	<b>57</b>
<b>Posición del Electrodo .....</b>	<b>57</b>
<b>Soldaduras Circunferenciales.....</b>	<b>58</b>
<b>Eliminación de Escoria.....</b>	<b>59</b>
<b><i>Parte II.....</i></b>	<b><i>61</i></b>
<b><i>Fundamentos Generales del Trabajo de los Metales.....</i></b>	<b><i>61</i></b>
<b>Conformación de la Chapa Metálica .....</b>	<b>62</b>
Métodos de Conformación.....	62
Efecto de la Temperatura en los Procesos de Conformación .....	63
Efecto de las Estructuras Metalúrgicas en el Conformado .....	64
<b>Conformado de Tubos.....</b>	<b>65</b>
Fabricación de Tubería sin Costura.....	65
Proceso de Fabricación de Tubería Soldada Longitudinalmente.....	67
Proceso de Fabricación de Tuberías Soldadas Helicoidalmente .....	69
<b>Normas Aplicadas para la Conformación de Tubos.....</b>	<b>71</b>
<b><i>Requerimientos para Soldaduras Sanas.....</i></b>	<b><i>71</i></b>
<b>Limpieza .....</b>	<b>71</b>
<b>Diseño de Junta y Montaje.....</b>	<b>71</b>
<b>Cobertura del Fundente.....</b>	<b>72</b>
<b>Posición del Metal Base .....</b>	<b>72</b>
<b>Soldadura de Cuerpos Cilíndricos .....</b>	<b>72</b>
<b>Ubicación de la Conexión a Tierra.....</b>	<b>74</b>



<b>Pre calentamiento .....</b>	<b>74</b>
<b><i>Fundentes para Arco Sumergido.....</i></b>	<b>74</b>
<b>Tipos y Características Generales.....</b>	<b>75</b>
Fundentes Activos:.....	75
Fundentes Neutros.....	76
Fundentes Aleados .....	77
<b><i>Selección de la Combinación Alambre - Fundente.....</i></b>	<b>78</b>
<b><i>Soldadura de Aceros al Carbono por SAW.....</i></b>	<b>80</b>
<b>Metalurgia de la Soldadura .....</b>	<b>81</b>
Zona de Fusión (Cordón de Soldadura) .....	81
Zona Afectada Térmicamente .....	81
<b>Electrodos y Fundentes de Acero al Carbono .....</b>	<b>82</b>
<b>Aceros de Baja Aleación y Alta Resistencia Mecánica (HSLA) .....</b>	<b>83</b>
<b>Soldadura de Aceros de Baja Aleación por SAW .....</b>	<b>85</b>
<b>Microestructura en Aceros HSLA.....</b>	<b>85</b>
Formación de la Ferrita Poligonal .....	85
Formación de la Ferrita Widmanstätten .....	86
Formación de la Bainita .....	87
Formación de la Ferrita Acicular (AF).....	87
Formación de Martensita.....	88
Proceso de Laminación Controlada Termo-mecánicamente .....	88
Fundamentos Microestructurales .....	92

Efecto Bauschinger en Aceros HSLA .....	95
Carbono Equivalente .....	97
Aporte Calórico .....	99
<b><i>¿Cómo Hacer Soldaduras en Tuberías con SAW? .....</i></b>	<b>99</b>
<b>Efecto de la Posición del Alambre .....</b>	<b>100</b>
<b>Efecto de la Corriente y Velocidad de Avance .....</b>	<b>100</b>
<b>Recolección del Fundente.....</b>	<b>101</b>
<b><i>Evaluación de la Soldadura .....</i></b>	<b>102</b>
<b>Ensayos Destructivos .....</b>	<b>102</b>
Ensayo de Tracción .....	102
Prueba de Dobleza en Soldadura.....	103
Prueba de Impacto Charpy V .....	103
<b>Ensayos No Destructivos .....</b>	<b>104</b>
Inspección por Rayos X .....	105
Inspección por Ultrasonido .....	107
<b>Prueba Hidrostática.....</b>	<b>107</b>
<b><i>CAPITULO II .....</i></b>	<b>109</b>
<b><i>MARCO METODOLÓGICO .....</i></b>	<b>109</b>
<b><i>Descripción General del Trabajo y sus Etapas .....</i></b>	<b>109</b>
<b>Montaje de la Máquina .....</b>	<b>110</b>
Acondicionamiento del Terreno .....	110
Desarrollo del Montaje.....	111
Calibración de la Máquina .....	120

<b>Estudio de Propiedades Mecánicas en Tuberías de Acero API 5L X65 Soldadas por SAW</b>	<b>121</b>
.....	
Determinación de la Mejor Combinación de Material de Aporte. Comprobación de Propiedades Mecánicas del Metal Base.....	121
<b><i>CAPITULO III.....</i></b>	<b><i>135</i></b>
<b><i>RESULTADOS .....</i></b>	<b><i>135</i></b>
<b>Calibración.....</b>	<b>135</b>
Cálculo del Ángulo de Conformación.....	135
Cantidad de Tubos a Fabricar.....	135
<b>Estudio de las Propiedades Mecánicas de Tubos de Acero API 5L X65 .....</b>	<b>136</b>
Cálculo del Ángulo de Conformación.....	136
Cantidad de Tubos a Fabricar.....	136
<b>Bobina 1, Fundente 780 (F7A2)/Alambre L61 (EM12K) Lincoln.....</b>	<b>138</b>
Aporte Calórico.....	138
Ensayo de Tracción.....	138
Ensayo de Impacto .....	139
Ensayo de Dureza.....	139
Ensayo de Dobleza.....	140
<b>Bobina 2, Fundente 350 (F7A2)/Alambre K12 (EM12K) ESAB.....</b>	<b>141</b>
Aporte Calórico.....	141
Ensayo de Tracción.....	141
Ensayo de Impacto .....	141

Ensayos de Dureza .....	142
Ensayo de Dobleza.....	143
<b>Bobina 3, Fundente 997 (F7A2)/Alambre L-70 (EM12K) Lincoln.....</b>	<b>143</b>
Aporte Calórico.....	143
Ensayo de Tracción.....	144
Ensayo de Impacto .....	144
Ensayos de Dureza .....	145
Ensayo de Dobleza.....	148
<b>Gráficas Combinadas .....</b>	<b>148</b>
Ensayo de Tracción.....	148
Ensayo de Impacto .....	149
<b>Metal Base .....</b>	<b>149</b>
Análisis Químico.....	149
Ensayo de Tracción.....	152
<b><i>CAPITULO V .....</i></b>	<b><i>160</i></b>
<b><i>DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....</i></b>	<b><i>160</i></b>
<b>Montaje de la Máquina .....</b>	<b>160</b>
<b>Calibración .....</b>	<b>163</b>
<b>Pruebas Acero API 5L X65.....</b>	<b>166</b>
Análisis del Material de Aporte.....	166
<b>Comparación de Propiedades Mecánicas .....</b>	<b>166</b>

Microestructura ..... 169

Material Base ..... 171

***CONCLUSIONES* ..... 174**

***RECOMENDACIONES* ..... 177**

***REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS*..... 179**

## INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2 - Desplazamientos recomendados para soldaduras circunferenciales. Tomada del Manual de Soldadura-4</i> .....	73
<i>Tabla 3 - Denominación utilizada por Lincoln para cada tipo de fundente. Lincoln Electric-22.</i> .....	78
<i>Tabla 4 - Temperatura de prueba y Energía Absorbida.</i> .....	104
<i>Tabla 5 - Métodos de Inspección</i> .....	105
<i>Tabla 6 - Duración de cada etapa del montaje.</i> .....	113
<i>Tabla 7 - Actividades vs. Tiempos en el PERT</i> .....	119
<i>Tabla 8 - Composición química de Aceros a soldar según API 5L PSL 1</i> .....	122
<i>Tabla 9 - Composición Química de Aceros para soldar según API 5L PSL 2</i> .....	122
<i>Tabla.10 - Datos de las Bobinas Suministradas por SIDOR</i> .....	123
<i>Tabla 11 - Propiedades mecánicas requeridas por la especificación API 5L X65.</i> .....	123
<i>Tabla 12 - Combinaciones de Material de aporte utilizado.</i> .....	124
<i>Tabla 13 - Composición química de los tres tipos de alambres.</i> .....	124
<i>Tabla 14 - Composición química del fundente</i> .....	125
<i>Tabla 15 - Parámetros de Soldadura utilizados.</i> .....	127
<i>Tabla 16 - Bobinas utilizadas en el estudio del metal base</i> .....	129
<i>Tabla 17 - Valores de referencia utilizados en la empresa.</i> .....	132
<i>Tabla 18 - Valores de dureza basados en la norma o referencia.</i> .....	133
<i>Tabla 19 - Parámetros de Calibración para la Fabricación de Tuberías de 30'' de diámetro.</i> .....	135
<i>Tabla 20 - Parámetros de Calibración para la fabricación de tuberías de 30'' de diámetro</i> .....	136
<i>Tabla 21 -Descripción de la Materia Prima y Cantidad de Tubos Producidos por Bobina Conformada</i> .....	137
<i>Tabla 22 - Combinaciones Utilizadas en el Estudio de los Materiales de Aporte.</i> .....	138
<i>Tabla 23 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°1</i> .....	138
<i>Tabla 24 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N° 2</i> .....	138
<i>Tabla 25 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°2.</i> .....	139
<i>Tabla 26 -Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 2</i> .....	139
<i>Tabla 27 - Resultados del Ensayo de Dobleza Realizado al Tubo N° 2</i> .....	140
<i>Tabla 28 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°2.</i> .....	141
<i>Tabla 29 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N°7</i> .....	141
<i>Tabla 30 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°7.</i> .....	141
<i>Tabla 31 - Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 7</i> .....	142
<i>Tabla 32 - Resultados del Ensayo de Dobleza Realizado al Tubo N° 7</i> .....	143
<i>Tabla 33 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°3</i> .....	143
<i>Tabla 34 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N°13</i> .....	144

<i>Tabla 35 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°13.....</i>	<i>144</i>
<i>Tabla 36 - Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 13.....</i>	<i>145</i>
<i>Tabla 37 - Resultados del Ensayo de Dobleza Realizado al Tubo N° 13 .....</i>	<i>148</i>
<i>Tabla 38 - Análisis Químico Material Base.....</i>	<i>149</i>
<i>Tabla 39 - Resultado de Ensayos de Tracción de las bobinas 1,2 y 3 .....</i>	<i>152</i>
<i>Tabla 40 - Resultado de Ensayos de Tracción de las bobinas 4,5 y 6.....</i>	<i>154</i>
<i>Tabla 41 - Forma de variar los parámetros y mejorar las propiedades mecánicas.....</i>	<i>172</i>

## INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 15 - Flujograma del Proceso de Fabricación de Tubos con Costura Longitudinal por SAW.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 17 - Flujograma del proceso de manufactura de la tubería soldada helicoidalmente. (Figura tomada del CROWN HOLLANDER-9).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 28 - Esquema que representa las partes de la máquina. ....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 29 - Diagrama Esquemático de la programación realizada para el montaje de la máquina.....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 30 - Continuación de la programación del Montaje.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 31 - Gráfica PERT.....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 40 - Probeta Charpy. Los dibujos no están a escala, las medidas son las referenciadas en la norma .....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 64 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 2. ....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 65 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 2.....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 66 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 7.....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 67 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 7.....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 68 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 13.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 69 - Perfil de Dureza Tubo N° 13.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 70 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado en el Centro del Tubo N° 13.....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 71 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado en el opuesto del Tubo N° 13.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 72 - Representación del Ensayo de Dureza del Tubo N° 13.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 73 - Resultados Máxima a la Tracción de los Tubos N° 2,7, 13.....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 74 - Resultados de Impacto en bobinas 1,2 y 3.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 85 - Comparación de los valores de rotura con los requeridos por la norma API 5L.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 86 - Comparación de los Niveles de Fluencia con los requeridos por la norma API 5L.....</i>	<i>153</i>
<i>Figura 87 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 4 .....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 88 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 5 .....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 89 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 6 .....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 90 - Comparación de los Resultados de Fluencia en sentido longitudinal de las Bobinas 4,5 y 6.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 91 - Resultados de Fluencia en Sentido Longitudinal y Transversal de las Bobinas 4,5 y 6.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 92 - Comparación de los Resultados de Fluencia en Sentido Transversal de las Bobinas 4,5 y 6.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 93 - Comparación de los Resultados de Fluencia en Sentido Longitudinal de Bobinas y Tubos.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 94 - Comparación de los Resultados de Fluencia de las Bobinas 4, 5, 6 y Tubos 17, 23, 29.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 95 - Resultado de Resistencia a la fractura en Sentido Transversal de la bobina N° 4.....</i>	<i>159</i>



*Figura 96 - Resultado de Resistencia a la fractura en Sentido Longitudinal de la bobina N°4..... 159*

# INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial a nivel mundial involucra en ciertas áreas la necesidad de transportar fluidos gaseosos o líquidos. El transporte de fluidos de una zona a otra se puede realizar utilizando conductos formados por productos tubulares de forma cilíndrica, donde generalmente se usa como materia prima para su fabricación aceros estructurales de bajo carbono, microaleados, inoxidable y aluminio. A dichos productos se les denomina tuberías que se clasifican en dos grupos, tuberías sin costuras y con costura.

Las industrias encargadas de la fabricación de tuberías a nivel mundial, se han dedicado en su mayoría a la producción de tuberías con costura, donde las mismas se dividen en tuberías con costura helicoidal y longitudinal. Estas dos clases de tuberías presentan características particulares, tanto de fabricación como de aplicación en campo. Por su parte en la fabricación se toma en cuenta varios aspectos como la cantidad de soldadura, la materia prima y forma del cordón, mientras que en la aplicación en campo se toman en consideración la propiedad de doblaje, capacidad de soportar cargas y propiedades anticorrosivas. En relación a dichas características las tuberías que presentan cordón longitudinal, muestran menos cantidad de soldadura que las de costura helicoidal, lo que disminuye la posibilidad a fallas por corrosión, ya que posee menos puntos susceptibles a este fenómeno, por su parte las tuberías helicoidales poseen propiedades de doblaje en campo superiores a las que presentan las tuberías longitudinales, teniéndose una menor probabilidad de falla del cordón por efecto de la presión de carga, siendo la fabricación de tuberías de gran diámetro es mucho mas sencilla que en la longitudinal, esto por la utilización de bobinas de acero como materia prima.

En nuestro país, la Siderurgia del Orinoco (SIDOR) desde comienzo de los años 90 a venido produciendo bobinas de acero, dejando a un lado la producción de planchas de bajo espesor, esto atribuido al hecho de que la capacidad de producción favorecida con la producción de bobina en comparación a la de planchas.

Aunado a este aspecto se ha venido desarrollando en los últimos años una política estatal que favorece el consumo de productos nacionales, gracias a la disminución de aranceles en comparación a los extranjeros que deben cancelar hasta un 100% adicional en su valor de contribución.

Estas condiciones favorecen la producción y utilización de tuberías helicoidales, ya que la materia prima para la producción de las mismas se ve beneficiada por los aspectos antes señalados, lográndose de esta manera una mayor producción y demanda de este tipo de tuberías en el ámbito nacional e internacional, debido a que las mismas logran competir en el mercado de tuberías tanto por su costo como por su calidad. Estos aspectos son unas de las razones que impulsa al manejo y mejora del procedimiento de montaje y calibración de las máquinas conformadoras de tubos con costura helicoidal utilizando como proceso de soldadura el arco sumergido, ya que en la información aquí detallada, se espera lograr estandarizar una metodología para el montaje de dichas máquinas, logrando impulsar el desarrollo y crecimiento de la industria encargada de la fabricación de dicho producto en nuestro país.

Así mismo el progreso en la utilización de aceros que presentan mayores propiedades mecánicas para la fabricación de tuberías, estimula el estudio de las características que presentan las tuberías helicoidales fabricadas con este tipo de aceros, tal es el caso del acero API 5L X65, acero bien definido en su composición química con un elemento aleante como lo es el manganeso, siendo este excelente para el aporte de propiedades mecánicas al material. Este tipo de acero es producido por primera vez en nuestro país a los niveles de espesores requeridos, para ser utilizado en la fabricación de tuberías en el proyecto ICO de PDVSA en la línea que va desde Anaco estado Anzoátegui hasta Coro estado Falcón. El acero API 5L X65 se ha producido a niveles de espesores más bajo que los utilizados en esta oportunidad, no siendo utilizado en la fabricación de tuberías en nuestro país mediante la aplicación de arco sumergido como método de soldadura, esto nos trae como consecuencia la evaluación tanto del material base como de soldadura, así como los parámetros a utilizar para la soldadura deben ser establecidos con el fin de garantizar las propiedades mecánicas requeridas y obtener niveles óptimos en la sanidad del cordón. La

información aquí detallada muestra el estudio de las propiedades obtenidas con la utilización de diferentes materiales de aporte en el proceso de soldadura y el estudio de las propiedades mecánicas observadas en bobinas de este material, lográndose determinar el material de aporte a utilizar y los requerimientos en propiedades de materia prima empleada para la fabricación de las tuberías por el método de arco sumergido como proceso de soldadura.

El trabajo se limita al estudio de las propiedades mecánicas tanto de los tubos como del acero, además del montaje de la máquina y producción de una primera orden de tuberías que demuestren la utilidad de la misma una vez ensamblada. Estos son las necesidades de la empresa para poder competir en el mercado nacional e internacional.

# **CAPITULO I**

## **MARCO TEÓRICO**

### **Parte I**

## **Planeación y Control de Proyectos con Pert**

### ***Antecedentes***

De acuerdo a CHUEN-8, dos son los orígenes del método del camino crítico: el método PERT (Program Evaluation and Review Technique) desarrollado por la Armada de los Estados Unidos de América, en 1957, para controlar los tiempos de ejecución de las diversas actividades integrantes de los proyectos espaciales, por la necesidad de terminar cada una de ellas dentro de los intervalos de tiempo disponibles. Fue utilizado originalmente por el control de tiempos del proyecto Polaris y actualmente se utiliza en todo el programa espacial.

El método CPM (Crítical Path Method) fue desarrollado también en 1957 en los Estados Unidos de América, por un centro de investigación de operaciones para la firma Dupont y Remington Rand, buscando el control y la optimización de los costos de operación mediante la planeación adecuada de las actividades que componen un proyecto.

Ambos métodos aportaron los elementos administrativos necesarios para formar el método del camino crítico actual, utilizando el control de los tiempos de ejecución y los costos de operación, para buscar que el proyecto total sea ejecutado en el menor tiempo y al menor costo posible.

## **Usos**

El campo de acción de este método es muy amplio, dada su gran flexibilidad y adaptabilidad a cualquier proyecto grande o pequeño. Para obtener los mejores resultados, NETMBA-29, debe aplicarse a los proyectos que posean las siguientes características:

- Que el proyecto sea único, no repetitivo, en algunas partes o en su totalidad.
- Que se deba ejecutar todo el proyecto o parte de el, en un tiempo mínimo, sin variaciones, es decir, en tiempo crítico.
- Que se desee el costo de operación más bajo posible dentro de un tiempo disponible.

Dentro del ámbito de aplicación, el método se ha estado usando para la planeación y control de diversas actividades, tales como construcción de presas, apertura de caminos, pavimentación, construcción de casas y edificios, reparación de barcos, investigación de mercados, movimientos de colonización, estudios económicos regionales, auditorias, planeación de carreras universitarias, distribución de tiempos de salas de operaciones, ampliaciones de fábrica, montaje de maquinaria, planeación de itinerarios para cobranzas, planes de venta y censos de población.

El objetivo de los sistemas tipo PERT consiste en ayudar en la planeación y el control, por lo que no implica mucha optimización directa. Algunas veces el objetivo primario es determinar la probabilidad de cumplir con fechas de entrega específicas. También identifica aquellas actividades que son más probables que se conviertan en cuellos de botella y señala, por ende, en que puntos debe hacerse el mayor esfuerzo para no tener retrasos. Un tercer objetivo es evaluar el efecto de los cambios del programa.

## Planeación y Control de Proyectos con PERT- CPM

Todos los sistemas tipo PERT emplean una red de proyecto para visualizar gráficamente la interrelación entre sus elementos. Esta representación del plan de un proyecto muestra todas las relaciones de procedencia, respecto al orden en que se deben realizar las actividades.

En la terminología de PERT, cada arco de la red representa una actividad, es decir, una de las tareas que requiere el proyecto, cada nodo representa un evento que por lo general se define con el momento en que se terminan todas las actividades que llegan a ese nodo. Las puntas de flecha indican la secuencia en la que debe ocurrir cada uno de esos eventos. Lo que es más, un evento debe preceder a la iniciación de las actividades que llegan a ese nodo. (En la realidad, con frecuencia se pueden traslapar etapas sucesivas de un proyecto, por lo que la red puede representar una aproximación idealizada del plan de un proyecto).

El nodo hacia el que todas las actividades se dirigen es el evento que corresponde a la terminación desde su concepción, o bien, si el proyecto ya comenzó, el plan para su terminación.

Cada arco juega un doble papel, el de representar una actividad y el de ayudar a representar las relaciones de procedencia entre las distintas actividades. En ocasiones, se necesita un arco para definir las relaciones de procedencia aun cuando no haya una actividad real que representar. En este caso, se introduce una actividad ficticia que requiere un tiempo cero, en donde el arco que representa esta actividad ficticia se muestra como una flecha punteada que indica esa relación de procedencia. Una regla común para construir este tipo de redes es que dos nodos no pueden estar conectados directamente por más de un arco. Las actividades ficticias también se pueden usar para evitar violar esta regla cuando se tienen dos o más actividades concurrentes. Una vez desarrollada la red de un proyecto, el siguiente paso es estimar el tiempo que se requiere para cada actividad. Estos tiempos se usan para calcular dos cantidades básicas para cada evento, a saber, su tiempo más próximo y su tiempo más lejano.

El tiempo más próximo para un evento es el tiempo (estimado) en el que ocurrirá el evento si las actividades que lo proceden comienzan lo más pronto posible. Los tiempos más próximos se obtienen al efectuar una pasada hacia delante a través de la red, comenzando con los eventos iniciales y trabajando hacia delante en el tiempo, hasta los eventos finales, para cada evento se hace un cálculo del tiempo en el que ocurrirá cada uno, si cada evento precedente inmediato ocurre en su tiempo más próximo y cada actividad que interviene consume exactamente su tiempo estimado. La iniciación del proyecto se debe etiquetar con el tiempo 0.

El tiempo más lejano para un evento es el último momento (estimado) en el que puede ocurrir sin retrasar la terminación del proyecto más allá de su tiempo más próximo. En este caso los tiempos más lejanos se obtienen sucesivamente para los eventos al efectuar una pasada hacia atrás a través de la red, comenzando con los eventos finales y trabajando hacia atrás en el tiempo hasta los iniciales. Para cada evento el cálculo del tiempo final en el que puede ocurrir un evento de manera que los que le siguen ocurran en su tiempo más lejano, si cada actividad involucrada consume exactamente su tiempo estimado.

Sea la actividad  $(i, j)$  la actividad que va del evento  $i$  al evento  $j$  en la red del proyecto. La holgura para un evento es la diferencia entre su tiempo más lejano y su tiempo más próximo. La holgura para una actividad  $(i, j)$  es la diferencia entre el tiempo más lejano del evento  $j$  y el tiempo más próximo del evento  $i$  más el tiempo estimado para la actividad.

Así, si se supone que todo lo demás marcha a tiempo, la holgura para un evento indica cuánto retraso se puede tolerar para llegar a ese evento sin retrasar la terminación del proyecto, y la holgura para una actividad indica lo mismo respecto a un retraso en la terminación de esa actividad.

Una ruta crítica de un proyecto es una ruta cuyas actividades tienen la holgura cero. (Todas las actividades y eventos que tienen holgura cero deben estar sobre una ruta crítica, pero no otras.)



Esta secuencia de actividades críticas debe mantenerse estrictamente a tiempo, si se quiere evitar retrasos en la terminación del proyecto. Esta información sobre los tiempos más cercanos y más lejanos, las holguras y la ruta crítica, es invaluable para el administrador del proyecto. Entre otras cosas, le permite investigar el efecto de posibles mejoras en la planeación para determinar en donde debe hacerse un esfuerzo especial para mantenerse y evaluar el impacto de los retrasos.

### **Graficas PERT**

La gráfica PERT es una gráfica original de redes no medidas que contiene los datos de las actividades representadas por flechas que parten de un evento  $i$  y terminan en un evento  $j$ .

En la parte superior de la flecha se indica el número de identificación, generalmente los números de los eventos ( $i-j$ ). En la parte inferior aparece dentro de un rectángulo la duración estándar ( $t$ ) de la actividad. En la mitad superior del evento se anota el número progresivo, en el cuarto inferior izquierdo la última lectura del proyecto y en el cuarto inferior derecho la primera lectura del proyecto.

## **Red de Actividades**

FREDERICK-13, define red a la representación gráfica de las actividades que muestran sus eventos, secuencias, interrelaciones y el camino crítico. No solamente se llama camino crítico al método sino también a la serie de actividades contadas desde la iniciación del proyecto hasta su terminación, que no tienen flexibilidad en su tiempo de ejecución, por lo que cualquier retraso que sufriera alguna de las actividades de la serie provocaría un retraso en todo el proyecto.

Al construir la red, debe evitarse lo siguiente:

- Dos actividades que parten de un mismo evento y llegan a un mismo evento. Esto produce confusión de tiempo y de continuidad. Debe abrirse el evento inicial o el evento final en dos eventos y unirlos con una liga.
- Partir una actividad de una parte intermedia de otra actividad. Toda actividad debe empezar invariablemente en un evento y terminar en otro. Cuando se presenta este caso, a la actividad base o inicial se le divide en eventos basándose en porcentajes y se derivan de ellos las actividades secundadas.
- Dejar eventos sueltos al terminar la red. Todos ellos deben relacionarse con el evento inicial o con el evento final.

## **Enfoque de tres estimaciones de PERT**

Hasta ahora se ha supuesto implícitamente que se puede obtener estimaciones con una exactitud razonable del tiempo requerido para cada actividad del proyecto. En la realidad, con frecuencia existe bastante incertidumbre sobre cuales serán estos tiempo; de hecho se trata de una variable aleatoria que tiene cierta distribución de probabilidad. La versión original de PERT toma en cuenta esta incertidumbre usando tres tipos diferentes de estimaciones para los tiempos de las actividades, con el fin de obtener información básica sobre su distribución de probabilidad. Esta información para todos los tiempos de las

actividades se utiliza para estimar la probabilidad de terminar el proyecto en la fecha programada.

Las tres estimaciones empleadas por PERT para cada actividad son una estimación más probable, una estimación optimista y una estimación pesimista. La estimación más probable (denotada por  $m$ ) intenta ser la estimación más realista del tiempo que puede consumir una actividad. En términos estadísticos, es una estimación de la moda (el punto más alto) de la distribución de probabilidad para el tiempo de la actividad. La estimación optimista (denotada por  $a$ ) procura ser el tiempo poco probable pero posible si todo sale bien; es en esencia una estimación de la cota inferior de la distribución de la probabilidad. Por último, se intenta que la estimación pesimista (denotada por  $b$ ) sea el tiempo poco probable pero posible si todo sale mal. En términos estadísticos, se trata en esencia de una estimación de la cota superior de la distribución de probabilidad.

De acuerdo a CHUEN-8, con la distribución definida, la media (esperada) y la desviación estándar, respectivamente, del tiempo de la actividad para la actividad Z puede calcularse por medio de las fórmulas de aproximación.

El tiempo esperado de finalización de un proyecto es la suma de todos los tiempos esperados de las actividades sobre la ruta crítica. De modo similar, suponiendo que las distribuciones de los tiempos de las actividades son independientes (realísticamente, una suposición fuertemente cuestionable), la varianza del proyecto es la suma de las varianzas de las actividades en la ruta crítica. En CPM solamente se requiere un estimado de tiempo. Todos los cálculos se hacen con la suposición de que los tiempos de actividad se conocen. A medida que el proyecto avanza, estos estimados se utilizan para controlar y monitorear el progreso. Si ocurre algún retardo en el proyecto, se hacen esfuerzos por lograr que el

proyecto quede de nuevo en programa cambiando la asignación de recursos.

## **Diferencias Entre PERT y CPM**

Las versiones originales de CPM y PERT difieren en dos aspectos importantes. Primero, el CPM supone que los tiempos de las actividades son determinísticos (es decir, se pueden predecir de manera confiable sin incertidumbre significativa), por lo que no necesita las tres estimaciones que se acaban de describir. Segundo, en lugar de dar una importancia primordial al tiempo (explícitamente), el CPM asigna la misma importancia al tiempo y al costo y pone esto de relieve al construir una curva de tiempo-costo para cada actividad, (MARTIN-26).

El PERT es en particular apropiado cuando se maneja mucha incertidumbre al predecir los tiempos de las actividades y cuando es importante controlar de una manera efectiva la programación del proyecto, FREDERICK-13, por ejemplo, la mayor parte de los proyectos de investigación y desarrollo caen dentro de esta categoría. Por otro lado, el CPM resulta muy apropiado cuando se pueden predecir bien los tiempos de las actividades (quizá con base en la experiencia) y cuando estos tiempos se pueden ajustar con facilidad (por ejemplo, si se cambian tamaños de brigadas), al igual que cuando es importante planear una combinación apropiada entre el tiempo y el costo del proyecto. Este último tipo lo representan muchos proyectos de construcción y mantenimiento.

La diferencia entre PERT y CPM es la manera en que se realizan los estimados de tiempo. El PERT supone que el tiempo para realizar cada una de las actividades es una variable aleatoria descrita por una distribución de probabilidad. El CPM por otra parte, infiere que los tiempos de las actividades se conocen en forma determinísticas y se puede variar cambiando el nivel de recursos utilizados. En la actualidad, las diferencias entre las versiones actuales de PERT y CPM no son tan marcadas como se han descrito. Muchas versiones de PERT permiten emplear una sola estimación (la más probable) para cada actividad y omiten así la investigación probabilística.

## **Configuración de la Máquina**

La información aquí detallada en esta sección fue tomada de CROWN HOLLANDER INC-9: Wilson Byard 2000 Spiral Weld Pipe Mill.

### ***Rango de Trabajo***

La capacidad de la máquina se puede resumir con los siguientes parámetros:

Rango de diámetro de los tubos	406 – 3.000 mm
Rango de espesores de tubos	5 – 25 mm
Longitud del tubo	6 – 20 m

### ***Partes de la Máquina***

La máquina es una construcción compuesta de tres módulos. Puede ser fácilmente desmontada, transportada y re-ensamblada en el sitio escogido, para favorecer una producción más económica de tubos, lográndose de una reducción de costos.

La Formadora Byard consiste en:

- El Bastidor de Entrada
- La Mesa de Conformación
- El Bastidor de salida.

### **Bastidor de Entrada**

El bastidor de entrada está compuesto por cuatro secciones: la sección de alimentación

posterior, sección de enderezado, la estación de empalme y la sección de preparación superficial. En la parte superior del bastidor de entrada se encuentra la sección de alimentación posterior o carro porta bobina, diseñada para ubicar la bobina en la entrada de la máquina y des-bobinarla, sirviendo de esta forma como preparación a la entrada del bastidor, donde la banda o lámina se aplana en la sección de enderezado al hacerla pasar por 7 rodillos enderezadores. Seguidamente, se encuentra la estación de empalme o estación de soldadura, en la cual se unen los dos extremos de las bobinas, es decir, la cola de la bobina que está finalizando con la punta de la bobina entrante.

Finalmente, en la sección de preparación superficial se realiza el acondicionamiento de los bordes siguiendo tres pasos. Primero se utiliza una fresadora para alcanzar un ángulo de bisel previamente determinado, luego se limpian los bordes gracias a la acción de unos cepillos de cerdas metálicas que giran encima de la banda bajo la acción de motores, y por último se realiza un predoblado de los bordes mediante la operación de unos rodillos dobladores.

En el bastidor de entrada se conduce la bobina a una velocidad y potencia uniforme hacia la etapa de conformación, el mismo se encuentra montado sobre rieles que permiten ajustar el ángulo de alimentación de la banda o ángulo de conformación, dependiendo tanto del tamaño de la tubería (diámetro) como del ancho efectivo de la bobina utilizada.

## **Mesa de Conformación**

La sección de conformación comprende tres bancos de rodillos de formación, los cuales son usados para formar o conformar la banda de la bobina y convertirla en una tubería en espiral con un diámetro requerido. En este modulo, se encuentra el boom de conformación, en el cual se instala el cabezal de soldadura interna.

## **Bastidor de Salida**

El tubo recién formado es conducido hasta este módulo, donde se encuentra el cabezal de soldadura externa. Aquí se produce el cordón de soldadura que finalmente sella el tubo y completa el proceso. Esta sección es denominada la jaula de conformación o jaula de salida. El tubo soldado sigue su recorrido desde la puerta o jaula de salida hasta el bastidor de salida. Una vez que se consigue la longitud requerida un sistema de plasma corta el tubo a la longitud deseada. El cabezal de la cortadora de plasma se mueve en la misma dirección del tubo hacia el final del bastidor de salida y el corte resultante es circunferencial. Utilizando un cabezal de plasma móvil permite cortar mientras el tubo sigue su movimiento normal aumentando la velocidad del proceso. Una vez cortado el tubo se activan los brazos expulsores, siendo entonces el tubo desplazado del bastidor de salida hacia la zona de revisión.



## **Componentes de la Máquina en Forma Detallada**

### **Sección Alimentación Posterior (Porta Bobinas)**

La bobina es levantada y es soportada por el porta-bobinas, el cual consiste de un rodillo maquinado y templado. El porta-bobina es elevado y colgado para permitir que el rodillo sea insertado dentro del eje de la bobina, el mismo consta de un gancho o hueco que permite que sea levantado por una grúa que lo posiciona en la sección de alimentación posterior. La sección de alimentación posterior tiene un recuadro de montaje en el cual el porta- bobina puede ser ajustado, soportando un peso máximo de la bobina de 40 ton. Esta sección puede observarse en la Figura 9.

## **Sistema de Posicionamiento del Ángulo de Conformación**

Al principio de la sección de alimentación posterior se encuentra el rodillo hidráulico que ajusta el ángulo de conformación. Este rodillo se ajusta de forma segura al cuadro del alimentador posterior en uno de sus extremos y es ubicado en el riel del piso (al cual es ajustado) con el ángulo exacto.

Variación de la posición de ajuste y actuación del cilindro hidráulico permite el posicionamiento de las secciones de alimentación posterior y frontal como una estructura homogénea, para cualquier ángulo entre 45° y 82 grados relativos a la sección de conformado del tubo, el ángulo es determinado por el tamaño del tubo manufacturado y el espesor de la bobina de acero utilizada.

## **Posicionamiento de la Bobina**

Cuando la bobina de acero ha sido colocada en la sección de alimentación posterior, su posición transversal en relación a la estructura principal puede ser ajustada por la actuación de los rodillos laterales guías (operados hidráulicamente) que se encuentran ajustadas a la estructura.

## **Rodillos Controladores de la Alimentación y Cajas de Engranajes**

La banda de la bobina de acero es alimentada hacia la sección de enderezamiento de la máquina usando un par de rodillos de arrastre o de tracción, por debajo y por encima de la banda (lamina). La presión y la posición vertical del rodillo superior puede ser ajustada para alcanzar o controlar el espesor de la bobina utilizada, por la actuación de cilindros hidráulicos colocados en los extremos de los rodillos.

## **Rodillos Guías del Alimentador de Entrada**

Antes de la sección de rodillos enderezadores, se encuentran posicionados rodillos guías para permitir el posicionamiento de las bandas dentro de los rodillos gracias a un gato y un cilindro hidráulico. En la Figura 10 se distinguen los rodillos de alimentación y la sección de enderezado.

## **Sección de Enderezamiento**

La sección de alimentación posterior es también el lugar de la sección del rodillo enderezador. Este es usado para aplanar la bobina y asegurar que la misma sea completamente desenrollada y adaptada para la producción de tubos en espiral. La sección de enderezamiento consta de un arreglo de 7 rodillos de los cuales 3 están en la parte inferior y pueden ser ajustados verticalmente utilizando cilindros hidráulicos. Estos son operados por un interruptor simple y pueden ser movidos fácilmente. Inmediatamente después de la sección de enderezamiento, un sistema de rodillos laterales guías son utilizados para ajustar la posición horizontal de la bobina en el centro de la máquina, cuando la banda deja la sección de rodillos enderezadores y entra en la sección de alimentación de entrada frontal de la formadora.

## ***Sección de Alimentación Frontal***

## **Estación de Soldadura del Cordón Transversal**

En esta estación se hace el empalme de la cola de una bobina con la entrada o punta de la otra bobina. Desde la sección del rodillo enderezador la banda de la bobina de acero es alimentada hacia la estación de soldadura transversal. Esta construcción permite sujetar la cola de la bobina y la cabeza de la otra. Esto ayuda en el ajuste de las dos bobinas y en la preparación de los dos extremos utilizando un equipo de corte oxiacetilenico que se encuentra adaptado a esta sección.

Después de que cada extremo de las bobinas han sido preparadas, las mismas son ajustadas con ayuda de las tenazas hidráulicas, son soldadas utilizando una máquina soldadora por arco sumergido, la cual esta ajustada con una caja de control que es similar a la máquina usada en la soldadura interna y externa del tubo, también en este punto un banco de cobre es utilizado para minimizar la reparación del cordón.

## **Sección de Fresado**

La banda pasa entonces hacia la sección de la fresadora de la máquina, donde los bordes pueden ser preparados para la soldadura con biseles simples, en V o doble V.

La fresa cortadora es montada en un arreglo movable y flotante. Esto permite al cabezal cortador adecuarse a pequeñas variaciones del ancho de la banda y asegurar una preparación uniforme, la viruta es removida de la placa hacia un depósito localizado debajo de la fresa. Un cepillo de acero se encuentra ubicado después del mando principal para limpiar la bobina preparada superficialmente. En la Figura 11 se aprecia la imagen de una de las fresadoras.

## **Rodillos de Tracción**

Se encuentran seguidamente después de la sección de la fresadora, donde se conduce la banda de la bobina de acero a una velocidad constante hacia la sección de conformación de tubos. El mando principal esta compuesto de un rodillo superior y uno inferior maquinado y templado. Estos poseen un diámetro de 450 mm. Los rodillos son capaces de alimentar a las bandas en velocidades que oscilan desde 0 mm hasta 2.500 mm por minuto. La presión es aplicada por cilindros hidráulicos adjuntos al cilindro de tracción superior, operados desde una consola adaptada al suelo. La presión es indicada en una válvula cercana a la caja de engranaje. Cada unidad de mando es controlada utilizando mandos digitales, los cuales permiten la pre-programación de todos los parámetros de control necesarios, y el monitoreo continuo de las condiciones del equipo o mando.

En el caso improbable de que se desarrolle una falta mayor en cualquiera de los controladores durante la operación, el sistema ilumina el bombillo de falla del equipo localizado en la cabina del sistema eléctrico principal de control y se cierran los equipos hasta que la falla sea rectificada.

Se encuentra acoplada una opción de diagnostico de fallas completas, PLC (Programador Lógico Controlable) como un estándar del modulo de comando, pudiéndose utilizar un sistema de acceso al menú, muy sencillo de operar solo, presionando el botón de acceso al menú del sistema y un panel de muestras.

## **Mando Principal Sistema Eléctrico**

Los controladores principales y los sistemas electrónicos asociados se encuentran en una cabina de acero ventilada que puede colocarse en cualquier lugar conveniente a una distancia razonable de la formadora de tubos con soldadura helicoidal.

## **Rodillos Laterales Guía**

En varios lugares de la sección de alimentación frontal, la banda es guiada o encarrilada por rodillos laterales guías, estos son operados por uno de sus extremos por gatos mientras que por el otro lado son operados por cilindros hidráulicos. La banda es a su vez guiada por arriba y por abajo por barras deslizadoras de baja fricción, la presión aplicada por las barras superiores es ajustable por el efecto de los cilindros hidráulicos adjuntos, mientras que la barra inferior permanece ajustada. Tanto la sección de alimentación posterior como la sección de entrada son fabricadas con aceros montados sobre rodillos o ruedas.

Estas ruedas corren sobre unos arcos de acero que se encuentran ajustadas al piso, las cuales permiten a las dos secciones un movimiento radial relativo a la mesa de conformación. Esto establece el ángulo de conformación requerido para la manufactura del tubo.

## **Consola de Operación y Control**

La consola principal de operaciones se encuentra localizada cerca de la máquina y permite al supervisor u operador el controlar distintos aspectos de la formadora: control del motor eléctrico, control del motor de la fresadora y otros controles hidráulicos, requeridos para la operación de la formadora de tubo. La consola de operación se coloca en una posición donde el operador pueda observar todas las operaciones claves y asegurar que las distintas operaciones están trabajando en forma segura y efectiva. La consola de operación consta de un botón de emergencia que permite detener la máquina de forma inmediata.

## ***Sección de Conformación o Mesa de Conformación***

Esta sección es donde la bobina es conformada en forma de espiral transformándola en un tubo y es aquí donde se encuentra el cabezal de la soldadura interior. La sección de conformación se encuentra fabricada en acero y en forma de mesa en donde se encuentra un boom movable, donde se cuadran los rodillos de conformación. Al final del boom se localiza el cabezal de soldadura interior.

## **Rodillos de Conformación**

Tres bancos de rodillos son utilizados para formar el tubo. La parte frontal es montada sobre la mesa de conformación superior, bajo la banda de acero que viene entrando. El segundo banco de rodillos montado sobre la sección del boom, por encima de la banda, sobre el lado inferior del brazo del boom. El brazo del boom es ajustado para amoldarse al espesor y ancho de la banda de acero. El tercer banco de rodillos es montado sobre la mesa de conformación y estos pueden ser ajustados por un gato manual, de forma horizontal, para formar el doblado requerido de la banda.

## **Boom de Conformación**

La sección del boom esta montada sobre la mesa de conformación usando tornillos de acero que soportan grandes tensiones. Su posición puede cambiar dentro de la mesa de conformación al ajustar estos tornillos y al operar el gato, para obtener el ajuste necesario para asegurar la mejor posición o punto de soldadura. Un rodillo denominado inversor se encuentra bajo la costura, en el punto de soldadura interna, para mantener la posición correcta de los extremos de la banda. El rodillo se asegura dentro del montaje con un posicionador manual y uno hidráulico, con la altura y con el ángulo de conformación.

Para poder conformar la mayor cantidad de diámetros y espesores diferentes se hace necesario contar con dos boom. El primero es utilizado para tubos comprendidos entre los 600 y 3000 mm de diámetros. Un segundo boom presenta un cuello más pequeño y se usa para conformar tubos en rangos entre los 400 y 900 mm. Como se puede apreciar, existe un rango de diámetros dentro del cual cualquiera de los dos boom se pueden utilizar, el uso de uno o de otro depende del espesor de pared.

## **Sistema Guía de la Soldadura**

El sistema utiliza un rayo láser tanto en la soldadura externa. El láser se encuentra ubicado en los cabezales de las soldaduras y el mismo se encarga de controlar que los cabezales de soldadura se encuentren alineados entre los dos extremos de la banda y de esta forma asegurar que el depósito del cordón se haga en la separación de los dos extremos de la banda.

El sistema es continuamente monitoreado para ajustar el estado del cordón y de la soldadura en general. El sistema láser elimina la necesidad de un excesivo control de la abertura entre los dos extremos.



## **Cabezal de Soldadura Interna**

El equipo de soldadura LINCOLN, consiste en un cabezal de soldadura montada al final del boom. Los rectificadores suministran la corriente y se encuentra localizada en una ubicación adecuada, lo más cercana a los cabezales.

## **Manejo del Fundente y Sistema de Recuperación**

La alimentación de fundente y las mangueras de recuperación se encuentran localizadas al final del boom, junto al equipo de soldadura. La unidad de recuperación de fundente por vacío debe ser colocada cerca del equipo, mientras que la alimentación de fundente es controlada aplicando presión, utilizando aire comprimido a 20 psi. Este sistema de manejo de fundente utiliza una unidad de vacío de gran capacidad. El sistema incluye un sistema de calentamiento de fundente y un magneto para remover partículas metálicas.

## **Control de la Abertura o Separación de Raíz**

El control de la abertura o separación de raíz entre el extremo de la banda de entrada y el extremo de la banda ya deformada, se hace de forma automática gracias al sistema guía de soldadura debido a la actuación de un cilindro hidráulico adjunto al bastidor de salida. Esto proporciona un movimiento radial de la jaula y del bastidor de salida, para optimizar la posición de los extremos de la banda antes de realizar la soldadura interna. La jaula y el bastidor de salida una vez armados, forman una sola estructura homogénea.

## ***Sección de la Jaula o Portal de Salida***

La sección de la jaula esta diseñada para soportar al tubo recién formado y mantener las dimensiones y tolerancias del tubo. El cabezal de soldadura externa se encuentra localizado en la parte superior de la jaula, la misma es conectada por un pivot o eje a la mesa de conformación, esto permite a la jaula el movimiento, que es controlado por el operador logrando abrir o cerrar la abertura o separación de los extremos de la banda.

## **Construcción de la Jaula**

Esta sección comprende un arreglo de doble jaula complementado con rodillos superiores e inferiores colocados para guiar y soportar al tubo recién formado, conduciéndolo hasta la soldadura externa y subsecuentemente hacia el módulo de corte y la sección de salida. Todos los rodillos deben ajustarse manualmente a una posición específica y con un mismo ángulo de conformación. La altura de la jaula es controlada desde la consola de operaciones al accionar unos rodillos con una máquina con motor eléctrico incorporado.

## **Plataforma de Soldeo**

La plataforma de soldeo se encuentra ubicada en la sección de doble jaula en la parte superior de esta. Una estación de operación esta situada en la plataforma de soldeo y todos los controles del cabezal de soldadura son activados desde esta estación.

## ***Bastidor de Salida***

El tubo ya conformado y soldado deja la sección de la jaula y baja hacia el bastidor de salida. La sección de corte del tubo es parte integral del bastidor de salida. El bastidor comprende un número de cajas de rodillos que contienen pares de ruedas que sirven de soporte para el tubo ya conformado. Cada una de estas ruedas deben ajustarse de forma manual para alcanzar el diámetro del tubo y el ángulo de conformación. El cuerpo del bastidor de salida se encuentra sobre rolineras que permiten el posicionamiento radial al operador del control de apertura. El movimiento es alcanzado por un sistema hidráulico que mueve al bastidor de salida mientras se abre y se cierra la separación. La máquina formadora de tubos Byard 2000 posee un bastidor de salida que soporta tubos de más de 20 metros de longitud. Se le pueden adaptar bastidores de salida adicionales de 12 metros de longitud.

## **Cortadora de Plasma**

Cuando el tubo ya ha alcanzado la longitud deseada, un interruptor previamente programado al final de la mesa hace energizar el carro de la cortadora. Entonces, la cortadora de plasma se ajusta automáticamente al tubo y procede a moverse en el mismo sentido y a la misma velocidad del tubo. El carro lleva consigo el cabezal de la cortadora hipotermica de plasma. La operación de corte ocurre de forma continua y al mismo tiempo que el tubo se mueve dentro del bastidor.

## **Brazos Expulsores de Tubos**

Cuando se ha completado el proceso de corte, el tubo es desplazado del bastidor de salida utilizando unos brazos hidráulicos expulsores. Estos son activados por el operador. El tubo es trasladado a la estación de inspección.

## ***Plantas Auxiliares***

### **Sistemas de Energía Hidráulica o Centralina**

El sistema de energía hidráulica, que se encarga de suplir a los cilindros situados a lo largo de la formadora de tubos con soldadura helicoidal por arco sumergido, es energizado desde una central que posee una bomba hidráulica. La bomba comprende un alimentador de presión que suministra:

- Los requerimientos del cilindro de tracción hidráulico principal.
- Cualquier otro sistema o cilindro hidráulico.

Esto, en conjunto con las válvulas que regulan la presión, permite ajustar la presión de trabajo de cada cilindro en los distintos cilindros posicionados a lo largo de la formadora.

El suelo debe ser reforzado con una base de concreto de 200 mm de espesor. En su punto más elevado la formadora tiene 4,5 metros medidos desde el suelo.

# **Operación de la Formadora de Tubos con Costura Helicoidal Byard 2000**

De acuerdo a WILSON BYARD 2000-33, la operación de la máquina debe desarrollarse de acuerdo a los siguientes pasos.

## ***Bastidor de Entrada***

1. Para esta operación solo se necesita poner a funcionar la bomba hidráulica. Se debe calcular el ángulo de conformación. Es beneficioso medir el ancho de todas las bobinas dentro del lote para conseguir un ancho nominal de trabajo óptimo.
2. Ajustar el bastidor de entrada al ángulo de conformación calculado utilizando el cilindro hidráulico que se encuentra sobre el riel graduado, los controles que accionan este cilindro se encuentran en la parte posterior del bastidor de entrada (debajo de donde queda el porta bobinas).
3. Ajustar o Colocar los dos paneles laterales exteriores, los que guían la bobina en el porta bobina, más allá del ancho de la banda a utilizar. Los botones controladores se encuentran a ambos lados del bastidor de entrada, en su parte posterior.
4. Accionar el rodillo de alimentación superior utilizando el botón que se encuentra a un lado del comienzo del bastidor de entrada.
5. Bajar todos los rodillos enderezadores inferiores, presionando el botón que se encuentra al lado del bastidor de entrada.
6. En la mesa de empalme, elevar la tenaza superior a su posición más alta y bajar la barra de apoyo.

7. Utilizando los cilindros hidráulicos, halar las cuchillas fresadoras hacia fuera en su posición máxima. Se presiona el botón dentro del bastidor de entrada y coloca el rodillo sujetador en su posición más alta.
8. Los rodillos superiores o barras deslizantes deben estar en su posición más alta, al igual que los rodillos conductores.
9. Colocar todos los rodillos fijadores o sujetadores laterales (sujetadores laterales) en su posición correcta. Esto se realiza midiendo la mitad de la bobina con la línea central de la máquina. El sujetador o fijador de lado es el gato de lado. En esta etapa, se debe mantener los ajustadores de lado completamente abiertos, estos ajustadores son los que se controlan de forma hidráulica.
10. Halar y levantar la bobina utilizando el balancín elevador, porta bobina, alimentar la bobina por medio de los rodillos conductores, asegurándose de que la bobina se encuentre en el centro del porta bobina.
11. Sujetar la bobina dentro de los rodillos conductores empujadores. La bobina debe estar alineada con los rodillos guías sujetadores. Mientras va pasando la bobina, introduzca los rodillos laterales ajustables.
12. Cuando la bobina se encuentre en el conductor principal, sujete con los rodillos principales y libere los rodillos conductores empujadores.
13. Ahora siga llevando la bobina hacia la mesa de conformación. En este momento, todos los rodillos laterales en el bastidor de entrada deberían encontrarse rodando sobre las esquinas de la banda. Dejar los rodillos conductores en la posición más baja.
14. En esta etapa, fijar los rodillos superiores e inferiores o la barra deslizante entre 50 y 75 mm con respecto al borde de la chapa. Ajustar el rodillo superior o las barras

deslizantes para dar un despeje de aproximadamente 3mm sobre la banda.

15. Ajustar los rodillos inferiores para corregir la posición, luego colocar los rodillos de agarre superiores inmediatamente por encima de los rodillos inferiores. Si no se requiere corte, no se necesitan más ajustes en el bastidor de entrada.

### ***Mesa de Conformación***

1. Posicionar la carrera del Boom directamente en el borde o alinear el mismo con el borde de la chapa. Aflojar los tornillos del boom. Mover el Boom hacia adentro o hacia fuera usando los gatos hasta que la línea central de la nariz del Boom este 90 mm atrás del borde de la chapa, esto proporciona suficiente espacio para cualquier ajuste requerido sobre el cabezal de soldadura.
2. La altura del Boom es colocada para que se tenga un efecto de apretado de 3mm entre los rodillos del Boom y los rodillos del plano de la mesa, por ejemplo, para una banda de 12 mm de ancho, el espacio entre el rodillo del Boom y los rodillos del plano deberá ser de 9mm. Existen dos pequeños gatos en cada final de la sección de sujeción para asistir en la elevación o bajada del Boom. Cuando este se encuentre completamente ajustado, apretar los pernos o tornillos con la llave inglesa especial (llave de tuerca) suministrada.
3. En esta etapa, colocar todos los tres bancos de rodillos en el ángulo de conformación correcto, dependiendo del ancho de la banda puede que no se necesiten todos los rodillos.
4. La posición de los rodillos del piso (rodillos que se encuentran horizontalmente, en el plano de la mesa), dependen del diámetro del tubo requerido, como usted verá los mismos pueden ser ajustados utilizando un gato pequeño.
5. El rodillo inversor puede colocarse ahora en posición. El rodillo inversor es

posicionado de manera que el borde de la chapa corra centrada a la línea central del rodillo y longitudinalmente posicionado sobre el centro del Boom. Estas posiciones pueden cambiar cuando el tubo se conforma.

6. Los rodillos de conformación posteriores, rodillos de respaldo, deberían en esta etapa estar convenientemente, lejos de la chapa entrante.

### ***Jaula y Bastidor de Salida***

1. Colocar todos los rodillos de la jaula y el bastidor de salida con el ángulo correcto y ajustar la posición exterior.
2. Aflojar las tuercas de sujeción sobre las dos vigas superiores de la jaula. Ajustar la altura de las vigas energizando los motores de la jaula desde de la consola de operaciones. Volver a apretar las tuercas de sujeción después de haber alcanzado la altura deseada. La distancia entre las barras luminosas de la parte superior y las vigas inferiores debe ser aproximadamente 200 mm mayor que el diámetro exterior.
3. Chequear que el bastidor de salida este centrado. Si se requiere ajustar su posición puede hacerse con el control colgante (la palanca de control). Esta palanca controla el cilindro hidráulico del bastidor de salida.



## ***Conformación de Tubos***

1. El primer requerimiento dentro de la conformación de tubos es una plantilla (template), hecho para satisfacer o alcanzar el radio interno requerido. La plantilla de acero debe ser solo de 300 – 400 mm en longitud.
2. Cuando el Boom y los rodillos del piso al frente se encuentren ajustados, nosotros podemos empujar o mover la banda hacia y sobre los rodillos de conformación posteriores. Un pequeño gato hidráulico puede utilizarse para lograr dirigir el borde de la banda sobre los rodillos posteriores.
3. Con la banda ahora sobre los rodillos posteriores nosotros podemos traer los rodillos hacia adentro utilizando los gatos y conduciendo la banda hasta alcanzar el radio correcto con la plantilla. Este proceso puede tener que llevarse acabo unas cuantas veces hasta alcanzar el radio correcto. Cuando el radio sea satisfactorio, completar una vuelta hasta que la banda entrante este pasando el rodillo posterior en por lo menos 100 mm. Una cinta para medir es requerida en este momento para chequear la circunferencia exterior. Cuando este diámetro sea el correcto, puntee con soldadura los bordes. (es mejor comenzar sobre tolerancias más bajas).
4. Ahora continúe empujando y punteando hasta que el tubo llegue a la parte de atrás de la jaula de salida. En esta etapa revise la posición del rodillo posterior.

## ***Soldadura y Recuperación de Fundente***

1. Ahora que el tubo se dirige hacia el pórtico o jaula de salida, el equipo de soldadura puede ser colocado. La mayoría de este equipo debe haberse colocado en la etapa de montaje. Se puede utilizar soldadura con un solo electrodo o con tandem. Es mejor utilizar un solo electrodo para diámetros menores a 32 pulgadas, aunque se puede usar un par de cables para la soldadura externa de diámetros pequeños.

2. La distribución del fundente y su recuperación puede ahora ser utilizada. El fundente es distribuido hacia los cabezales de soldadura desde dos depósitos de alimentación en un tubo plástico para cada cabezal. La presión de aire requerida es de cerca de 10 psi. El fundente es recuperado mediante un tubo de acero en cada cabezal y dos unidades de vacío de aire. El flux es depositado dentro de los depósitos de alimentación, los que más tarde se dejan caer usando una válvula dentro de los depósitos de alimentación inferiores.

### ***Producción de Tubos***

1. Inicie impulsando o traccionando la chapa y encendiendo solo el cabezal de soldadura interna. Cuando la soldadura interna alcanza la soldadura externa comience el cabezal externo.
2. Encienda las unidades de recuperación de fundente desde la consola.
3. Incremente gradualmente la velocidad de tracción pero no más allá del punto en donde la calidad de la soldadura se deteriore. En todo momento asegúrese de que la soldadura se encuentre sobre la costura haciendo ajustes menores al cabezal de soldadura.
4. Observe la forma del calor aportado por la soldadura interna constantemente. Abra o cierre la abertura de ser necesario, esto se realiza accionando los botones que se encuentran sobre la mesa de conformación, esto opera el cilindro de control de abertura del bastidor de salida.

## ***Control del Diámetro***

1. El mantener un buen diámetro solo se alcanza conservando la geometría correcta, el ángulo de conformación debe ser ajustado siempre que exista un cambio en el ancho de la banda. Chequeos frecuentes deben realizarse sobre el ancho de banda y sobre la circunferencia del tubo. Cualquier cambio del ángulo de conformación debe llevarse acabo de forma gradual.
2. Otra vía para corregir las variaciones de diámetro es subiendo o bajando el rodillo inversor. Esto es hecho con un gato manual. Elevando el tubo se dará un incremento en el diámetro, mientras que bajándolo se conseguirá una disminución del diámetro del tubo.

## ***Corte del Tubo***

1. Coloca el interruptor de resorte límite en la longitud requerida midiendo a partir de la posición de la cortadora de plasma.
2. Enciende el interruptor de la caja de control para encender la lámpara verde.
3. Cuando el final del tubo hace contacto con el interruptor de resorte límite una luz de precaución ubicada en la parte posterior de la jaula de salida (pórtico) se enciende para avisarle al operador. Además, la rueda de contacto del carro de corte automáticamente se moverá sobre el tubo y el carro se comenzará a mover. La luz verde sobre la caja de control se apagará y se encenderá la luz roja.
4. La boquilla del plasma debe controlarse para comenzar el corte. Ajustando los tornillos sobre el carro se puede alterar el ángulo de contacto de la rueda conductora para que coincida el comienzo con el final del corte.
5. Luego de completarse el corte se debe mover el interruptor que se encuentra sobre

la caja de control a la posición “off”, la luz indicadora de color rojo debe encenderse. A su vez un botón de retroceso que se encuentra sobre el riel guía retorna a su posición original a la rueda de contacto.

6. Manualmente se regresa el carro a su posición inicial, pero debe mantenerse la luz verde encendida hasta que el tubo recién cortado sea removido de la formadora (máquina).

### ***Brazos Expulsores***

1. Ocho brazos expulsos o expulsatubos se encuentran al final del bastidor de salida. Cuando estos son accionados ellos elevan el tubo a una altura tal que se separe el mismo de los rodillos del bastidor y del mismo modo mueven dicho tubo fuera de la máquina para mantener un espacio libre para el tubo siguiente que se viene conformando. En su posición más elevada los tubos se inclinan oblicuamente y de esta forma ruedan hacia la carrilera de salida. Se pueden realizar ajustes de la posición de los brazos sobre el bastidor, dependiendo de la longitud de tubo requerida. A su vez la dirección de la inclinación puede colocarse para que los tubos sean expulsados a cualquiera de los dos lados de la máquina.
2. Los movimientos “Arriba / Abajo” de los brazos son controlados accionando unos botones que se encuentran sobre el bastidor de salida después de los controles de corte. Debe tomarse la precaución de bajar los brazos una vez expulsado el tubo para prevenir la interferencia al nuevo tubo que viene avanzando.
3. Una unidad de energía hidráulica es utilizada para operar los brazos. Los botones de encendido y apagado de esta unidad viene en una consola individual.

# **Soldadura por Arco Sumergido (SAW)**

## ***Descripción***

De acuerdo al AWS Manual de Soldadura- 4, la soldadura por arco sumergido (submerged arc welding, SAW), produce la coalescencia de metales calentándolos con un arco entre un electrodo de metal desnudo y el trabajado. Esto quiere decir que el arco se forma entre el alambre (electrodo) y la pieza a soldar o la unión a soldar arco y el metal derretido están “sumergidos” en un manto de fundente granular fusible sobre el metal a trabajar. No se aplica presión y el metal de aporte se obtiene del electrodo y en ocasiones de un suministro complementario como una varilla para soldar o gránulos metálicos. En la soldadura por arco sumergido, el arco está cubierto por fundente, el cual desempeña un papel preponderante porque:

- La estabilidad del arco depende del fundente.
- Las propiedades mecánicas y químicas del depósito de soldadura final se pueden controlar con el fundente.
- La calidad de la soldadura puede ser afectada por la forma como se maneje el fundente.
- La soldadura por arco sumergido es un proceso de soldadura de producción versátil capaz de soldar con corrientes de hasta 2000 amperios de corriente alterna o continua, empleando uno o varios alambres o tiras de metal de aporte.

## ***Proceso de Arco Sumergido***

En la soldadura por arco sumergido, el extremo de un electrodo continuo de alambre desnudo se inserta en un montículo de fundente que cubre la unión que se va a soldar (LINCOLN ELECTRIC-25). Se enciende el arco empleando un método de iniciación del arco. Seguidamente, un mecanismo alimentador de alambre comienza a introducir el

electrodo en la unión a una velocidad controlada, y el alimentador se desplaza manual o automáticamente a lo largo de la soldadura. En la soldadura mecanizada o automática, el metal base puede desplazarse debajo de un alimentador de alambre estacionario.

En todo momento, se alimenta fundente adicional adelante del electrodo y a su alrededor, y se distribuye continuamente sobre la unión. El calor producido por el arco eléctrico derrite parte del fundente, el extremo del alambre y de los bordes adyacentes de metal base, creando un charco de metal fundido debajo de una capa de escoria líquida. El baño fundido cerca del arco presenta mucha turbulencia y burbujas de gases que ascienden rápidamente a la superficie del charco. El fundente flota sobre el metal derretido y la zona de soldadura es protegida completamente de la atmósfera de su alrededor.

El fundente líquido puede conducir algo de corriente eléctrica entre el alambre y el metal base, pero el arco eléctrico es la fuente de calor predominante. El manto de fundente que flota sobre el charco de soldadura evita que los gases atmosféricos contaminen el metal de soldadura y disuelve las impurezas del metal base, como las del electrodo, que entonces flotan sobre el charco. Además el fundente, puede agregar ciertos elementos de aleación al metal de soldadura, o extraerlo de él.

Al avanzar la zona de soldadura a lo largo de la unión, el metal de soldadura y el fundente líquido se enfrían y solidifican, formando una franja de soldadura con una capa protectora de escoria encima. Es importante eliminar por completo la escoria antes de efectuar otra pasada de soldadura. El proceso de arco sumergido se ilustra en la Figura 13.

Entre los factores que determinan si conviene o no usar soldadura por arco sumergido están:

- La composición química y las propiedades mecánicas que debe tener el depósito final.
- El espesor del metal base que se va a soldar.

- La accesibilidad de la unión.
- La posición en que se va a soldar.
- La frecuencia o la cantidad de soldaduras que se van a efectuar.

## ***Métodos Generales***

La soldadura por arco sumergido se puede aplicar en tres modos distintos (LINCOLN-21): automático, semiautomático y manual. En todos ellos es preciso colocar el metal a soldar de modo que el fundente y el charco de soldadura permanezcan en su sitio hasta solidificarse. Ya existen o pueden construirse muchos tipos de fijaciones y equipos de posicionamiento para satisfacer este requisito. Para el alcance de este trabajo y debido al funcionamiento de la máquina se explicará solo la soldadura automática, que es el modo en que trabaja el equipo de soldadura helicoidal para la producción de tuberías.

## **Soldadura Automática**

La soldadura automática se efectúa con equipo que realiza la operación de soldadura sin que un operador tenga que vigilar y ajustar continuamente los controles. El costoso equipo de autorregulación se puede justificar si se desea alcanzar tasas de producción elevadas, (LINCOLN-24).

## **Variaciones del Proceso**

La soldadura por arco sumergido se presta a una amplia variedad de combinaciones de alambre y fundente, disposiciones de uno o varios electrodos y empleo de fuentes de potencia de corriente alterna o corriente continua. Este proceso se ha adaptado a una amplia gama de materiales y espesores. Es posible utilizar diversas configuraciones de múltiples arcos para controlar el perfil de la soldadura e incrementar las tasas de deposición respecto a las de operación con un solo arco. Los depósitos de soldadura pueden ir desde franjas

anchas con poca penetración para trabajos de recubrimientos hasta franjas angostas con penetración profunda para uniones gruesas. Parte de esta versatilidad se debe al empleo de arcos de corriente alterna.

Los principios que favorecen el empleo de ca para minimizar el golpe de arco cuando se suelda con un solo arco a menudo se aplican a la soldadura con múltiples arcos para crear una desviación de arco favorable. La corriente que fluye por electrodos adyacentes crea campos magnéticos interactuantes que pueden reforzarse o bien reprimirse mutuamente. En el espacio entre los arcos, estos campos magnéticos sirven para producir fuerzas que desvían los arcos (distribuyendo el calor) en direcciones que benefician a la aplicación de soldadura propuesta.

Se han diseñado y fabricado diversos tipos de fuentes de potencia y equipo accesorio especialmente para la soldadura con múltiples arcos. Estas máquinas relativamente avanzadas se destinan a producción de alto volumen en series largas de aplicaciones repetitivas.

## ***Equipo***

El equipo requerido para soldadura por arco sumergido consiste en una fuente de potencia, un sistema de suministro de electrodo, un sistema de distribución de fundente, un mecanismo de desplazamiento y un sistema de control del proceso. El equipo opcional incluye sistemas de recuperación de fundente y equipo de posicionamiento o manipulador.

## **Fuentes de Potencia**

La elección de la fuente de potencia para un sistema de arco sumergido desempeña un papel operativo muy importante. Hay varios tipos de fuente de potencia adecuados para la soldadura por arco sumergido. Las fuentes de potencia pueden ser del tipo de transformador/rectificador o de motor/generador y proporcionar salida de voltaje constante (cv), corriente continua (cc) o salida cv/cc seleccionable. Las fuentes de potencia de corriente alterna por lo general son del tipo de transformador y pueden suministrar una



salida de corriente continua o bien de voltaje constante de onda cuadrada. Como en general el proceso SAW es de corriente elevada con ciclo de trabajo alto, se recomienda una fuente de potencia capaz de suministrar un amperaje alto con ciclo de trabajo del 100%.

## **Fuentes de Potencia de Corriente Directa de Voltaje Constante**

En el mercado hay fuentes de potencia de cc de voltaje constante en modelos de transformador – rectificador y de motor – generador. Su capacidad varía entre 400 y 1500 A. Estas fuentes de potencia se usan para SAW semiautomática con corrientes de 300 a 600 A con electrodos de 1,6, 2,0 y 2,4 mm (1/16, 5/64 y 3/32 pulg.) de diámetro. La soldadura automática se efectúa con corrientes de 300 a más de 1000 A, generalmente con diámetros de alambre entre 2,4 y 6,4 mm (3/32 y ¼ pulg.). Sin embargo, las aplicaciones de la soldadura con cc a más de 1000 A son limitadas porque a niveles de corriente tan elevadas el golpe de arco puede ser severo. Las fuentes de potencia más modernas permiten mantener un arco estable con densidades de corriente tan bajas como 23 A/mm<sup>2</sup> (15000 A/pulg<sup>2</sup>).

Las fuentes de potencia de voltaje constante cuentan con autorregulación, de modo que pueden usarse con un alimentador de alambre de velocidad constante. No es necesario detectar el voltaje o la corriente para mantener un arco estable, así que se puede usar controles de velocidad de alimentación del alambre muy sencillos. La velocidad de alimentación del alambre y el diámetro del mismo controlan la corriente del arco y la fuente de potencia controla el voltaje del arco.

Las fuentes de potencia de corriente directa de voltaje constante son las fuentes de uso más común para soldadura por arco sumergido. Funcionan bien en la mayor parte de las aplicaciones en las que la corriente del arco no rebasa los 1000 A, siendo probable que trabajen sin problemas a corrientes aún más altas. La fuente de potencia de corriente continua de voltaje constante es la mejor opción para soldar acero delgado a alta velocidad.

## **Fuentes de Potencia de Corriente Directa con Amperaje Constante**

Es posible conseguir fuentes de potencia de corriente directa de amperaje constante en modelos tanto de transformador y rectificador como de motor y generador, con salidas específicas de hasta 1500 Amperios.

Las fuentes de corriente constante no tienen autorregulación, así que deben usarse con un control de alimentación variable del alambre que detecte el voltaje. Este tipo de control ajusta la velocidad de alimentación del alambre en respuesta a variaciones en el voltaje del arco. El voltaje se vigila a fin de mantener un arco de longitud constante. Con este sistema, el voltaje del arco depende de la velocidad de alimentación del alambre y del diámetro del mismo. La fuente de potencia controla la corriente del arco. Como los controles de alimentación variable de alambre con detección de voltaje son más complejos, también son más costosos que los alimentadores de velocidad constante que se pueden usar con los sistemas de cv.

## **Controles**

Los sistemas de control que se usan para la soldadura por arco sumergido son sencillos controles de velocidad de alimentación del alambre. Los que se usan con fuentes de potencia de voltaje constante mantienen una velocidad del alambre constante, los que se emplean con fuentes de potencia de corriente constante vigilan el voltaje del arco y ajustan la velocidad de alimentación del alambre a fin de mantener un voltaje constante. Los alimentadores de alambre más sencillos tienen controles analógicos de una sola perilla que mantienen una alimentación de alambre constante. Los alimentadores más modernos que se usan para SAW automática, tienen controles digitales basados en microprocesadores. Estos controles cuentan con lazos de retroalimentación conectados a la fuente de potencia y al motor de alimentación del alambre y mantienen el voltaje de soldadura y la velocidad del alambre en niveles preestablecidos. La gran ventaja de los controles digitales es que permiten controlar con precisión el proceso de soldadura, las desventajas son que los controles no son compatibles con algunas fuentes de potencia y que su construcción es un poco menos robusta que la de la mayor parte de los controles analógicos.

Los controles digitales permiten ajustar la velocidad de alimentación del alambre (control de corriente), ajustar la fuente de potencia (control de voltaje), iniciar y detener la soldadura, cambiar el modo de desplazamiento (manual o automático), ajustar verticalmente la alimentación del alambre frío, controlar el retardo inicial y el llenado de

cráteres, evitar el retroquemado y activar o desactivar el suministro de fundente. Todos los controles digitales cuentan con medidores de corriente, voltaje y velocidad de alimentación del alambre también digitales.

Los controles analógicos existentes pueden usarse con fuentes de potencia tanto de voltaje constante como de corriente constante. Los controles básicos consisten en un control de velocidad de alimentación del alambre (ajusta la corriente en los sistemas de cv, controla la corriente en los sistemas de cc), un interruptor para iniciar y detener la soldadura, un conmutador para desplazamiento manual / automático y un control vertical para la alimentación de alambre frío. Estos controles tienen las mismas ventajas que los controles analógicos para SAW semiautomática, pero son propensos a derivar y no permiten un control preciso del proceso.

## **Unidades de Recuperación de Fundente**

A menudo se usan unidades de recuperación de fundente para optimizar el aprovechamiento del fundente y minimizar la limpieza manual. Este tipo de unidades pueden realizar cualquier combinación de las siguientes actividades:

- Retirar el fundente no fusionado y la escoria fusionada detrás de la soldadura.
- Separar con mallas la escoria fusionada y otros materiales de gran tamaño.
- Eliminar partículas magnéticas.
- Eliminar polvos finos.
- Recircular fundente a una tolva para su reutilización.
- Calentar el fundente en una tolva para mantenerlo seco.
- La alimentación neumática de fundente es la que se usa más comúnmente en la SAW semiautomática y con frecuencia en la SAW automática.

## **Posicionadores y Fijaciones**

Dado que la SAW se limita a la soldadura en posición plana, se utiliza ampliamente posicionadores y equipo de fijación relacionado. Entre los posicionadores de uso común están:

- Unidades de cabeza – cola, rodillos giratorios o ambas cosas, para girar piezas cilíndricas bajo la cabeza de soldadura.
- Posicionadores de inclinación y giratorios para colocar piezas irregulares de modo que el área por soldar quede en la posición plana.
- La fijación a la medida a menudo incluye posicionadores que ayudan a preparar, ubicar y sostener la pieza de trabajo.

## ***Materiales***

La soldadura por arco sumergido se emplea para fabricar ensambles de casi todos los materiales empleados en la actualidad, desde aceros al carbono ordinarios, hasta aleaciones con base níquel. La mayor parte de los aceros y aleaciones se pueden soldar fácilmente con alambres y fundentes comerciales, aunque algunos metales requieren alambres de electrodos especiales de composición química precisa y fundentes especiales diseñados para conferir a la unión soldada propiedades específicas.

## **Metales Base**

Existen distintos materiales que pueden ser soldados por arco sumergido, entre ellos tenemos:

- Aceros al carbono con contenido de carbono de hasta 0,29 %.
- Aceros de baja aleación.
- Aceros al Cromo – Molibdeno (0,5 a 9% de Cr y 0,5 a 1 % de Mo).

- Aceros inoxidable.
- Aleaciones base níquel.

La gama de composiciones de las aleaciones que pueden soldarse por arco sumergido se ha expandido al aparecer electrodos y fundentes apropiados. Las combinaciones electrodo, fundente por lo regular pueden clasificarse según las especificaciones de un código. Los datos de combinación alambre fundente se pueden obtener de fabricante de fundentes.

## **Electrodos**

Los electrodos para arco sumergido producen depósitos de soldadura que coinciden con los metales base de acero al carbono, acero de baja aleación, aceros de alto carbono, aceros de aleación especial, aceros inoxidable, aleaciones de níquel y aleaciones especiales para aplicaciones de recubrimiento. Estos electrodos se suministran como alambre sólido desnudo y como electrodos compuestos con núcleo metálico (similares a los electrodos para soldadura por arco con núcleo de fundente).

Los fabricantes de electrodos preparan electrodos compuestos que duplican aleaciones complejas encerrando los elementos de aleación requeridos en un tubo de metal de una composición más ordinaria (acero inoxidable u otros metales). Los electrodos normalmente se empaquetan en bobinas. Los paquetes de electrodo grandes, resultan económicos, aumentan la eficiencia de operación y eliminan el desperdicio de fin de rollo.

Los electrodos de acero suelen estar recubiertos de cobre, excepto los destinados a materiales resistentes a la corrosión o a ciertas aplicaciones nucleares. El recubrimiento de cobre prolonga la vida del electrodo, reduce el desgaste por rozamiento con el tubo de contacto y mejora la conductividad eléctrica. Los electrodos se empaquetan de manera que duren mucho tiempo almacenados en condiciones normales. El diámetro de los electrodos para soldadura por arco sumergido varía de 1,6 a 6,4 mm (1/16 a 1/4 pulg.).

## **Fundentes**

Los fundentes protegen al charco de soldadura de la atmósfera, al cubrir el metal con escoria fundida (fundente fusionado). Los fundentes limpian el charco de soldadura, modifican la composición química del metal de soldadura e influyen en la forma que se adquirirá la franja de soldadura y en las propiedades mecánicas que tendrá. Los fundentes son compuestos minerales granulares que se mezclan de acuerdo con diversas formulaciones. Dependiendo del método de fabricación elegido, los diferentes tipos de fundentes se fusionan, aglomeran o mezclan por medios mecánicos.

### **Fundentes Fusionados**

Para fabricar un fundente fusionado, las materias primas se mezclan en seco y se funden en un horno eléctrico. Una vez fundida y después de agregarse los ingredientes finales, la carga del horno se vacía y se enfría. El enfriamiento puede efectuarse disparando la mezcla a través de un chorro de agua o vaciándola sobre grandes bloques refrigerados. El resultado es un producto de aspecto vidrioso que se tritura, se pasa por mallas para uniformar su tamaño y se empacan. Los fundentes fusionados tienen las siguientes ventajas:

- Buena homogeneidad química.
- Fácil eliminación de polvos finos sin afectar la composición del fundente.
- Normalmente no son higroscópicos, lo que simplifica el manejo y el almacenamiento, evitando problemas al soldar.
- Se recicla fácilmente mediante sistemas de alimentación y recuperación sin que cambie significativamente el tamaño de las partículas o su composición.

Su desventaja principal es la dificultad para añadirles desoxidantes y ferroaleaciones durante la fabricación sin segregaciones ni pérdidas muy elevadas. Las temperaturas tan altas necesarias para fundir los ingredientes limitan la gama de composiciones de los fundentes.

## **Fundentes Aglomerados**

Para fabricar un fundente aglomerado, las materias primas se pulverizan, se mezclan en seco y se aglomeran con silicato de potasio, silicato de sodio o una mezcla de ambos. Ya aglomerada, la mezcla húmeda se convierte en pelotillas y se cuece a una temperatura menor que la empleada para los fundentes fusionados. Las pelotillas se disgregan, se pasan por mallas para uniformar el tamaño y se empaacan.

Entre sus ventajas están las siguientes:

- Es fácil añadir desoxidantes y elementos de aleación, estos últimos se agregan como ferroaleaciones o como metales elementales para producir aleaciones que no están fácilmente disponibles como electrodos, o para ajustar la composición del metal de soldadura.
- Se puede usar una capa de fundente más gruesa al soldar.
- Se pueden identificar por su color.

Sus desventajas son las siguientes:

- Tendencia de algunos fundentes a absorber humedad como lo hacen los recubrimientos de algunos electrodos para soldadura por arco de metal protegido.
- Posible generación de gases a partir de escoria fundida.
- Posibles cambios en la composición del fundente debido a segregaciones o eliminación de partículas de grano fino.

## **Fundentes Mezclados Mecánicamente**

Para producir un fundente de mezcla mecánica, dos o más fundentes fusionados o aglomerados se mezclan en la proporción necesaria para producir los resultados deseados.



La ventaja de los fundentes mezclados mecánicamente es la posibilidad de combinar varios fundentes comerciales para operaciones de soldadura extremadamente críticas o patentadas.

Los fundentes producidos por mezcla mecánica tienen las siguientes desventajas:

- Segregación de los fundentes combinados durante el embarque, el almacenamiento y el manejo.
- Segregación dentro de los sistemas de alimentación y recuperación durante la operación de soldadura.
- Inconsistencia del fundente combinado de una mezcla a otra.

## **Tamaño y Distribución de Partículas**

Los tamaños de las partículas de fundente y su distribución uniforme dentro del material en cantidad son importantes porque afectan la alimentación y la recuperación, el nivel de amperaje y la tersura y forma del cordón de soldadura. Si se incrementa el amperaje, es recomendable reducir el tamaño medio de las partículas de los fundentes fusionados y aumentar el porcentaje de partículas pequeñas. Si el amperaje es demasiado alto para un tamaño de partícula dado, el arco puede ser inestable y producir cordones con bordes irregulares y discontinuos. Si se suelda el acero con herrumbre, son preferibles los fundentes con partículas gruesas porque dejan escapar más fácilmente los gases. Algunos fabricantes de fundentes incluyen en sus paquetes información de tamaño de partículas presentada en forma de dos números de malla. Los números representan los tamaños más grandes y más pequeños de partículas presentes cuando se usan mallas estandarizadas para medirlos. El primer número identifica la malla a través de la cual pasan prácticamente todas las partículas, y el segundo, la malla a través de la cual no pasa prácticamente ninguna de las partículas.

Estos tamaños de partículas no proporcionan toda la información que podría necesitarse. Por ejemplo, si se designa un fundente con tamaño de partícula 20 x 200, no se está indicando si el fundente es de grano grueso con algo de finos o de grano fino con algo de

gruesos. Lo único que se conoce es el intervalo. Algunos fabricantes de fundentes ofrecen cada uno de sus fundentes en un solo intervalo de tamaño de partícula, adaptado a un área general de aplicación del fundente.

## **Utilización del Fundente**

Si el fundente es demasiado fino, se apretará y no podrá alimentarse debidamente. Si un fundente fino o un fundente con cantidades pequeñas de partículas finas se recuperan mediante un sistema de vacío, las partículas finas pueden quedar atrapadas en el sistema. Sólo las partículas gruesas volverán al sistema de alimentación para reutilizarse, lo que puede causar problemas de soldadura.

En aplicaciones en las que es importante la ausencia de hidrógeno (tuberías para la industria petrolera), los fundentes deben mantenerse secos. Los fundentes fusionados no contienen  $H_2O$  unida químicamente (agua de hidratación), pero las partículas pueden tener humedad superficial. Los fundentes aglomerados deben protegerse como se hace con los electrodos para arco de metal bajos en hidrógeno. El usuario debe seguir las instrucciones del fabricante en cuanto a los procedimientos específicos de mantenimiento en el horno.

Si se usan fundentes que contienen aleaciones, es necesario mantener una proporción fija entre las cantidades de fundente y el electrodo que se funden, a fin de obtener un metal de soldadura de composición consistente. Esta proporción las determinan realmente las variables del procedimiento de soldadura. Por ejemplo, si el proceso se aparta de una relación voltaje/amperaje establecida, cambiará el contenido de aleación del metal de soldadura al cambiar la proporción de fusión del fundente y el electrodo. Los fundentes también se identifican como químicamente ácidos, básicos o neutros. La basicidad o acidez de un fundente tiene que ver con la facilidad con que los óxidos componentes del fundente se disocian para dar un catión metálico o un anión de oxígeno. Los fundentes químicamente básicos tienen generalmente un contenido elevado de  $MgO$  o  $CaO$ , en tanto que los fundentes químicamente ácidos por lo general tienen un contenido considerable de  $SiO_2$ .

La basicidad o acidez se expresa como la proporción entre CaO, MgO y SiO<sub>2</sub>. Los fundentes con proporciones mayores que uno se denominan químicamente básicos, aquellos en los que la proporción se acerca a uno son químicamente neutros y los que tienen una proporción menor que la unidad son químicamente ácidos.

### ***Aplicaciones Generales del Proceso***

La SAW se usa en una amplia gama de aplicaciones industriales. La alta calidad de la soldadura, las elevadas tasas de deposición, la penetración profunda y la adaptabilidad a la operación automática hacen que el proceso sea apropiado para la fabricación de ensamblajes soldados grandes. La SAW se usa mucho en la fabricación de recipientes a presión, la construcción de barcos, barcas y carros de ferrocarril, la fabricación de tuberías y la manufactura de miembros estructurales que requieren soldaduras largas. Algunas instalaciones de SAW automática producen en masa ensamblajes unidos con soldaduras cortas repetitivas.

El proceso se emplea para soldar materiales que van desde láminas de 1,5 mm de espesor hasta soldaduras gruesas y pesadas. La soldadura por arco sumergido no es apropiada para todos los metales y aleaciones. Se le utiliza mucho con aceros al carbono, aceros estructurales de baja aleación y aceros inoxidable. Unos algunos aceros estructurales de alta resistencia mecánica, aceros de alto carbono y aleaciones de níquel, pero es posible obtener mejores propiedades de unión en esos metales empleando un proceso con menor aporte de calor al metal base, como la soldadura por arco de metal y gas.

La soldadura por arco sumergido se emplea para soldar uniones a tope en la posición plana, para soldaduras de filete en las posiciones plana y horizontal, y para recubrimientos en la posición plana. Es posible soldar uniones traslapadas y a tope en la posición horizontal.

## ***Variables de Operación***

El control de las variables de operación en la soldadura por arco sumergido es indispensable para obtener tasas de producción elevadas y soldaduras de buena calidad. Estas variables, en orden aproximado de importancia, son las siguientes:

- Amperaje de soldadura
- Tipo de fundente y distribución de partículas.
- Voltaje de soldadura.
- Polaridad
- Velocidad de soldadura.
- Tamaño del electrodo.
- Extensión del electrodo.
- Tipo de electrodo.
- Anchura y espesor de la capa de fundente.

### **Amperaje de Soldadura**

La corriente de soldadura es la variable más influye porque controla la rapidez con que se funde el electrodo, y por tanto la tasa de deposición, la profundidad de penetración y la cantidad de metal base fundido. Si la corriente es demasiado alta a una velocidad de desplazamiento determinada, la profundidad de fusión o penetración será excesiva. La soldadura resultante puede tender a atravesar de lado a lado el metal base que se esta uniendo. Una corriente alta también propicia el desperdicio de electrodos al reforzar demasiado la soldadura y causa mayores distorsiones. Si la corriente es demasiado baja, el resultado puede ser una penetración insuficiente o una fusión incompleta. El efecto de las variables en la corriente se muestra en la Figura 14.

Tres reglas relativas a la corriente de soldadura son:

- Si se incrementa la corriente aumenta la penetración y la tasa de fusión.
- Una corriente demasiado alta produce un arco excavador y socavamiento, o una franja alta y angosta.
- Una corriente de soldadura demasiado baja produce un arco inestable.

## **Voltaje de Soldadura**

El ajuste del voltaje de soldadura hace variar la longitud del arco entre el electrodo y el metal de soldadura fundido. Si se incrementa el voltaje global, el arco se hará mas corto. El voltaje casi no afecta la tasa de deposición del electrodo, que depende de la corriente de soldadura. El voltaje determina sobre todo la forma de la sección transversal de la franja de soldadura y el aspecto externo de esta última. En la Figura 15 se ilustra este efecto.

Las consecuencias de incrementar el voltaje de soldadura manteniendo constantes la corriente de soldadura y la velocidad de desplazamiento son:

- Una franja de soldadura más plana y ancha.
- Mayor consumo de fundente.
- Tendencia a reducir la porosidad causada por orín o incrustaciones en el acero.
- Mejor absorción de elementos de aleación de un fundente de aleación.

Las consecuencias de un voltaje de arco excesivo son:

- Franja de soldadura ancha propensa al agrietamiento.
- Problemas para eliminar la escoria en las soldaduras de surcos.
- Soldadura cóncava que puede ser propensa al agrietamiento.
- Mayor socavamiento en los bordes de las soldaduras de filetes.

Si se reduce el voltaje se obtiene un arco más “rígido”, con lo que se mejora la penetración en surcos de soldadura profundos y se reduce la tendencia al golpe de arco. Un voltaje demasiado bajo produce una franja alta y angosta que dificulta la eliminación de la escoria a lo largo de sus bordes.

## **Polaridad**

### **DC (+) vs. DC (-)**

La corriente continua positiva, cc (+) o DC (+), es recomendada para la mayoría de las aplicaciones ya que la misma produce soldaduras uniformes y con una excelente penetración. A su vez presenta excelente resistencia a la porosidad, a menos que el acero utilizado presente grandes cantidades de sulfuro y fósforo.

DC (-), por su parte presenta una tasa de fusión 1/3 más rápida pero con menor penetración. La corriente continua negativa es utilizada:

1. En soldadura a filetes convencional donde la chapa esté limpia y libre de óxido.
2. Para aplicaciones en donde la alta tasa de fusión se a útil como para el endurecimiento superficial.
3. Cuando se necesite una menor penetración para reducir la mezcla controlando el agrietamiento o la porosidad.
4. Para grandes acumulaciones de material y menos penetración ayudando a prevenir el agrietamiento en los primeros pasos cuando se van a soldar grandes espesores.

## **Soldadura en AC**

La corriente alterna, ca o AC, se encuentra recomendada para dos aplicaciones específicas. La primera es que es utilizada sobre el electrodo cola en la soldadura con Tandem y ocasionalmente en aplicaciones de un solo arco donde el golpe de arco no puede eliminarse reubicando la posición del cable a tierra.

Para una buena estabilidad del arco se debe utilizar una densidad de corriente elevada al utilizar corriente alterna, al compararla con la de densidad de corriente necesaria para corriente continua. Cuando ocurran condiciones inestables del arco, incremente la corriente o utilice un electrodo más pequeño con la misma corriente.

## **Velocidad de Desplazamiento**

Con cualquier combinación de corriente y voltaje de soldadura, los efectos de alterar la velocidad de desplazamientos se ajustan a un patrón general. Si se aumenta la velocidad se reduce el aporte de potencia o calor por unidad de longitud de la soldadura y se deposita menos metal de aporte por unidad de longitud de la soldadura, con lo que se reduce el refuerzo de esta última. Así, la franja de soldadura se hace más pequeña como se aprecia en la Figura 16.

La penetración de la soldadura acusa más efecto por la velocidad de desplazamiento que por cualquier otra variable excepto la corriente. Esto no sucede a velocidades excesivamente bajas, cuando el charco de soldadura queda debajo del electrodo. En este caso la fuerza de penetración del arco es amortiguada por el metal fundido. Una velocidad excesiva puede causar socavamiento.

Dentro de ciertos límites, la velocidad de corriente puede ajustarse para controlar el tamaño y la penetración de la soldadura. En este sentido, ésta relacionada con la corriente y el tipo de fundente. Una velocidad desplazamiento excesiva promueve el socavamiento, el golpe de arco, la porosidad y la irregularidad en la forma de la franja. Si la velocidad es

relativamente baja, los gases tienen tiempo de escapar del metal fundido y se reduce la porosidad. Una velocidad demasiado alta produce una franja de forma convexa propensa al agrietamiento, una exposición excesiva del arco, lo que resulta molesto para el operador y un charco de soldadura grande que fluye alrededor del arco y produce una franja áspera con inclusiones de escoria.

## **Tamaño del Electrodo**

Los electrodos de diámetro pequeños se usan con equipos semiautomáticos porque así se tiene más flexibilidad de movimiento. También se emplean en equipos de potencia paralela y de múltiples electrodos. Si el embonamiento es deficiente, un electrodo de diámetro grande es mejor que uno pequeño para cubrir las aberturas de raíz ancha.

El tamaño del electrodo también influye en la tasa de deposición. A una corriente dada, un electrodo de diámetro pequeño tiene mayor densidad de corriente y una tasa de deposición mayor que uno más grueso. Por otro lado, los electrodos de diámetro grande pueden transportar más corriente que los pequeños, y producir una tasa de deposición más alta a amperajes elevados. Si la velocidad de alimentación del electrodo deseada es más alta (o más baja) que la que puede mantener el motor alimentador, puede lograrse la tasa de deposición deseada cambiando a un electrodo más grueso (o más delgado).

## **Extensión del Electrodo**

A densidades de corrientes por encima de  $125 \text{ A/mm}^2$  ( $80000 \text{ A/pulg}^2$ ), la extensión del electrodo se convierte en una variable importante. Si la densidad de corriente es elevada, el calentamiento por resistencia del tramo de electrodos que está entre el tubo de contacto y el arco incrementa la tasa de fusión del electrodo. Cuando más larga sea la extensión, mayor serán el calentamiento y la rapidez de fusión. Este calentamiento por resistencia se conoce comúnmente como calentamiento  $I^2R$ .

Al desarrollar un procedimiento, un buen punto de partida es una extensión de electrodo de



unas ocho veces el diámetro del electrodo. Conforme se afina el procedimiento, esta longitud se modifica hasta lograr la tasa de fusión del electrodo óptima con un amperaje fijo.

El aumento en la extensión del electrodo añade un elemento de resistencia al circuito de soldadura y consume parte de la energía que de otra manera se suministraría al arco. Al bajar el voltaje a través del arco, disminuye la anchura y penetración de la franja. Como la baja en el voltaje del arco hace mas convexa la franja, ésta tendrá una forma distinta de la que se obtendría con una extensión del electrodo normal. Por tanto, cuando se incrementa la extensión del electrodo a fin de aprovechar la mayor tasa de fusión, se debe ajustar hacia arriba el voltaje en la máquina de modo se mantenga la longitud de arco correcto.

La condición del tubo de contacto afecta la extensión efectiva del electrodo. Los tubos de contacto deben cambiarse a intervalos predeterminados a fin asegurar condiciones de soldaduras consistentes.

Las tasas de deposición se pueden incrementar entre 25% y un 50% empleando extensiones de electrodo largas sin alterar el amperaje de soldadura. En la SAW automática con un solo electrodo, la tasa de deposición puede acercarse a la del método de dos alambres con dos fuentes de potencia.

Un incremento en la tasa de deposición va acompañado por una reducción en la penetración, por lo que no se recomienda alargar la extensión del electrodo cuando se desea una penetración profunda. Si hay problemas de fusión de lado a lado de la pieza de trabajo, como puede suceder cuando se sueldan materiales de calibre delgado, puede resultar benéfico incrementar la extensión del electrodo. Sin embargo conforme se aumenta la extensión del electrodo se hace más difícil mantener la punta del electrodo en la posición correcta respecto a la unión. Las que siguen son extensiones de electrodo máximas sugeridas para electrodos de acero sólidos para SAW.

- Para electrodos de 2.0, 2.4 y 3.2 mm (5/64, 3/32 y 1/8 pulg.) de diámetro, con una extensión de 75mm (3 pulg.).

- Para electrodos de 4.0, 4.8 y 5.6 mm ( $5/32$ ,  $3/16$  y  $7/32$  pulg.) de diámetro, con una extensión de 125mm (5 pulg.).

## **Anchura y Espesor de la Capa de Fundente**

La anchura y el espesor de la capa de fundente granular influye en el aspecto y la integridad de la soldadura terminada, así como en la acción de soldadura. Si la capa granular es muy gruesa, el arco estará demasiado confinado y la soldadura resultante tendrá un aspecto acordeado áspero. Los gases generados durante la soldadura no pueden escapar con facilidad, y la superficie del metal de soldadura fundido se distorsiona de manera irregular. Si la capa granular es demasiado delgada, el arco no quedara sumergido por completo en el fundente y habrá destellos y salpicaduras. La soldadura tendrá un aspecto deficiente, y puede ser poroso.

Hay un espesor óptimo de la capa de fundente para cualquier conjunto de condiciones de soldadura. Este espesor puede establecerse incrementando lentamente el flujo de fundente hasta que el arco de soldadura quede sumergido y ya no halla destellos. Los gases saldrán sin violencia a los lados del electrodo, y en ocasiones se encenderá.

Durante la soldadura, el fundente granular no fusionado puede irse retirando a una distancia corte detrás de la zona de soldadura después que el fundente fusionado se haya solidificado. No obstante, lo mejor puede ser no perturbar el fundente hasta que el cordón de la soldadura se haya distribuido uniformemente por todo el espesor de la sección.

El fundente fusionado no deberá aflojarse por la fuerza mientras el metal de soldadura éste a altas temperaturas (por encima de 600 °C). Si se deja enfriar, el material fusionado se desprenderá fácilmente y podrá retirarse con un cepillo con poco esfuerzo. En ocasiones, se podrá desprender por la fuerza una sección pequeña con objeto de inspeccionar rápidamente el aspecto superficial de la soldadura.

Es importante no recoger materiales extraños al momento de recuperar el fundente no usado. Para este fin, se deberá limpiar un espacio de unos 300 mm (12 pulg.) de anchura a ambos lados de la unión soldada antes de depositar el fundente. Si el fundente recuperado contienen trozos fusionados, se le deberá pasar por una malla con aberturas no mayores que 3.2 mm (1/8 pulg.) a fin de eliminar las partículas gruesas. En el momento en que el

fabricante lo empaqueta, el fundente está bien seco. Si se le expone a una humedad elevada, se deberá secar en una estufa antes de usarse. La humedad del fundente causa porosidad en la soldadura. Siempre deben seguirse las recomendaciones del fabricante.

## ***Procedimiento de Soldadura***

### **Diseño de Uniones y Preparación de los Bordes**

Los tipos de uniones que se sueldan por arco sumergido son principalmente las uniones a tope, en T y traslapadas, aunque también es posible soldar uniones de borde y de esquina. Los principios de diseños de las uniones y los métodos de preparación de los bordes son similares a los de otros procesos de soldadura por arco. Las soldaduras típicas son las de filete, surco cuadrado, surco en V sencillo y doble, y surco en U sencillo y doble.

Los diseños de uniones, sobre todo cuando se sueldan placas, a menudo exigen una abertura de raíz de 0.8 a 1.6 mm (1/32 a 1/16 pulg.) a fin de evitar la distorsión angular o el agrietamiento debidos a esfuerzos de contracción. Por otro lado, si la abertura de raíz es mayor que la necesaria, el tiempo y los costos de soldadura aumentarán.

La preparación de los bordes puede hacerse con cualquier método de corte térmico o por maquinado. La exactitud de la preparación de los bordes es importante, sobre todo para la soldadura mecánica o automática. Por ejemplo, si una unión diseñada con una abertura de raíz de 6.4 mm (1/4 pulg.) se produjera realmente con una cara de raíz que convergiera desde 3.2 hasta 7.9 mm (1/8 a 5/16 pulg.) a lo largo de la unión, la soldadura puede ser inaceptable por falta de penetración al principio y excesiva perforación al final. En un caso así habría que verificar y corregir el funcionamiento del equipo de corte y quizá dar capacitación al operador.

## ***Métodos para Iniciar el Arco***

El método que se emplee para iniciar el arco en una aplicación en particular dependerá de factores tales como el tiempo requerido para el inicio, en comparación con el tiempo de configuración y soldadura total, el número de piezas por soldar y la importancia de comenzar a soldar en un punto específico de la unión.

### **Inicio con Alambre Afilado**

El tramo de electrodo que sobresale del tubo de contacto se recorta con unas pinzas para cortar alambres; esto forma una configuración filosa, semejante a un cincel, en el extremo del alambre. A continuación se baja el electrodo hasta que el extremo apenas toca la pieza de trabajo. Se aplica el fundente y se comienza a soldar. La punta de cincel se fundirá rápidamente para formar el arco.

### ***Terminación del Arco***

En algunos sistemas eléctricos, el desplazamiento y la alimentación del electrodo se detienen al mismo tiempo cuando se pulsa el botón de “alto”. Otros sistemas solo detienen el desplazamiento y siguen alimentando el electrodo durante un lapso controlado. Un tercer tipo de sistema invierte la dirección del desplazamiento durante un lapso controlado mientras continúa la soldadura.

### ***Posición del Electrodo***

Son tres los factores a considerar para determinar la posición correcta del electrodo de soldadura:

1. La alineación del electrodo en relación con la unión.
2. El ángulo de inclinación en dirección lateral, esto es, la inclinación en un plano

perpendicular a la unión ( ángulo de trabajo)

3. La dirección en que apunta el electrodo hacia delante o hacia atrás (ángulos de desplazamiento).

La dirección hacia “adelante” es en el sentido del desplazamiento; por tanto, un electrodo que apunta hacia delante forma un ángulo agudo con la soldadura terminada. Un electrodo que apunta hacia atrás forma un ángulo obtuso con la soldadura terminada.

La mayor parte de las soldaduras con arco sumergido se efectúan con el eje del electrodo en posición vertical. La inclinación del electrodo hacia delante o hacia atrás adquiere importancia cuando se usan múltiples arcos, al aplicar recubrimientos y cuando la pieza de trabajo no se puede inclinar. Si el electrodo apunta hacia delante, se obtiene configuración de soldadura parecida a cuando se suelda cuesta abajo; si el electrodo apunta hacia atrás la soldadura será similar a la que se produce soldando cuesta arriba. La inclinación del electrodo hacia delante o hacia atrás no afecta tanto la configuración de la soldadura como lo hace el posicionamiento inclinado de las piezas de trabajo.

Una alineación incorrecta puede causar falta de penetración. Si se sueldan a tope espesores desiguales, el electrodo debe colocarse sobre la sección gruesa para fundirla con la misma rapidez que la sección delgada.

### ***Soldaduras Circunferenciales***

En base a Lincoln-23, las soldaduras circunferenciales difieren de las que se hacen en la posición plana en virtud de la tendencia que tienen el metal de soldadura y el fundente fundido en fluir y alejarse del arco. A fin de evitar un derramamiento y la distorsión de la franja, las soldaduras deben solidificarse al pasar por los puntos que correspondería a los doce y a las seis en la carátula de un reloj. En la Figura 17 se ilustran los perfiles de franja que resultan de las diversas posiciones de electrodo con respecto a las posiciones de las doce y las seis.

Si el desplazamiento angular es insuficiente en una soldadura exterior, o excesivo en una soldadura interior, la penetración será profunda y la franja de soldadura será angosta y muy convexa; además puede haber socavamiento. Un desplazamiento excesivo en una soldadura exterior o un desplazamiento insuficiente en una soldadura interior produce una franja ligera y cóncava.

El fundente es granular y no podrá sostenerse sobre una pieza de trabajo de diámetro pequeño si no se le sujeta. Si el fundente se derrama, el arco quedará descubierto y la soldadura será de baja calidad. Un método para resolver esta situación consiste en usar una unidad de boquilla que vierte el fundente concéntricamente alrededor del arco; de esta manera, no tendrá mucha oportunidad de derramarse. Además, puede agregarse un aditamento de cerdas de alambre u otro material flexible resistente al calor que descansa sobre el trabajo adelante del arco y contenga el fundente.

Sea cual sea la posición del electrodo, si el charco fundido es demasiado grande para el diámetro de trabajo, el metal de soldadura líquido se derramará por la sencilla razón de que no puede solidificarse con la suficiente rapidez. El tamaño de la franja, depende del amperaje y de la velocidad de desplazamiento empleados. Los amperajes bajos y las velocidades de recorrido altas reducen el tamaño de la franja.

### ***Eliminación de Escoria***

En las soldaduras de múltiples pasadas, la eliminación de escoria es importante ya que no es recomendable depositar soldadura en pasadas subsecuentes si hay escoria en la superficie. Los factores que más influyen en este aspecto son el tamaño y la forma de del cordón de soldadura. Los cordones pequeños tienden a enfriarse con mayor rapidez, con lo que se reduce la adherencia de escoria. En los cordones planos o ligeramente convexas que se funden suavemente con el metal base, la eliminación de la escoria es mucho más fácil que en los cordones muy cóncavos o socavados. Por esta razón, una reducción de voltaje ayudará a la eliminación de escoria en surcos angostos. Si el cordón depositado en la primera pasada de una soldadura de dos pasadas es cóncavo y se funde suavemente con los

bordes superiores de la unión, será mucho más fácil de limpiar que un cordón convexo que forma una muesca con su frontera con el metal base.



## Parte II

### Fundamentos Generales del Trabajo de los Metales

La importancia de los metales en la tecnología moderna se debe en gran parte, a la facilidad con que pueden dárseles formas útiles. (DIETER-10). Se han desarrollado centenares de procesos para trabajar los metales, destinados a aplicaciones específicas. Sin embargo, estos se pueden clasificar en un número reducido de clases, en base a las fuerzas aplicadas al material cuando se le da la forma requerida. Estas clases son:

1. Proceso de compresión directa.
2. Proceso de compresión indirecta.
3. Proceso de tracción.
4. Procesos de plegado o flexión.
5. Procesos de cizallamiento.

En los procesos de compresión la fuerza se aplica a la superficie de la pieza que se trabaja y el metal fluye formando ángulo recto con la dirección de la compresión, ejemplos: procesos de forja y laminación. Los procesos de compresión indirecta incluyen el estirado de tubos y alambres, la extrusión y la embutición profunda. Las fuerzas aplicadas son de tracción y compresión. El mejor ejemplo del proceso de conformación por tracción es la conformación por estirado, en la que un metal se adapta al contorno de una matriz por aplicación de fuerzas de tracción. El proceso de plegado o flexión supone la aplicación de momentos de flexión a la chapa, un ejemplo de este proceso es el proceso de manufactura de tubos a partir de chapas o bobinas. El proceso de cizallamiento implica fuerzas cizallantes lo suficientemente grandes para provocar el corte del metal en el plano de cizallamiento, un ejemplo típico es el conformado de arandelas. A manera representativa se pueden ver las operaciones típicas de conformación en la Figura 18.

La conformación plástica se lleva a cabo por dos razones, la primera es obtener la forma

deseada, mientras que la otra es el mejorar las propiedades del material al modificar su microestructura, afino del tamaño de grano e introducción de endurecimiento por deformación.

Los procesos de conformación plástica destinados a transformar un lingote o palanquilla en un producto tipificado de forma sencilla, tal como una chapa, una barra, se llaman procesos primarios de trabajo mecánico. Los métodos de conformación que producen piezas de la forma acabada definitiva se llaman procesos secundarios de trabajo mecánico. La mayoría de las operaciones de conformación de la chapa, el estirado de tubos y trefilado son procesos secundarios. La terminología en este campo no es muy precisa. Es frecuente que los procesos secundarios se llamen procesos de fabricación, de transformación o de manufactura.

### ***Conformación de la Chapa Metálica***

La posibilidad de producir una gran variedad de formas a partir de la chapa metálica plana, con velocidades de fabricación muy grandes, es uno de los mayores avances tecnológicos del siglo XX. El paso de la fabricación manual a los métodos de producción en masa ha sido uno de los factores decisivos para dichos avances. En esencia, la producción de una forma a partir de una pieza plana se realiza alargando y contrayendo las dimensiones de todos los elementos del volumen en las tres direcciones principales mutuamente predeterminadas. La forma resultante es una integración de todos los alargamientos y contracciones locales de los elementos del volumen.

### **Métodos de Conformación.**

La mayoría de las operaciones de conformación se realizan en prensas mecánicas o hidráulicas. En las prensas mecánicas suele almacenarse la energía en un volante y se transmite al carro móvil en la última parte de la carrera. Las prensas mecánicas son de acción rápida y tienen carreras cortas, mientras que las hidráulicas son de acción más lenta pero pueden ser de carrera más larga. Para la conformación de la chapa metálica se puede

emplear un martillo de forja en lugar de una prensa, la diferencia es que suelen aplicarse golpes de fuerza variable en vez de una sola carrera de longitud o presión determinada. Una dobladora es una prensa de simple efecto cuya finalidad es hacer dobleces en piezas como canales y chapas onduladas. El perfilado con rodillos es otro procedimiento para obtener perfiles por doblado de chapa. Se han desarrollado una amplia variedad de métodos para doblar o dar forma contorneada a secciones rectas. Se pueden fabricar piezas de forma cilíndrica o cónica empleando cilindros curvadores, la curvadora de tres cilindros no es muy adecuada para evitar el alabeo de la chapa muy fina, para ajustar mejor la curvatura se suele colocar un cuarto cilindro en la salida. En la carga en tres puntos el momento máximo de flexión se produce en el punto medio. Esta localización de la deformación puede hacer que se alcance el límite de formabilidad en el punto medio antes de que el resto de la chapa haya tomado la forma debida.

## **Efecto de la Temperatura en los Procesos de Conformación**

Los dos tipos principales de trabajo mecánico en los cuales el material puede sufrir una deformación plástica y cambiarse de forma son trabajos en caliente y trabajos en frío. Como muchos conceptos metalúrgicos, la diferencia entre trabajo en caliente y en frío no es fácil de definir. Cuando al metal se le trabaja en caliente, las fuerzas requeridas para deformarlo son menores y las propiedades mecánicas se cambian moderadamente. Cuando a un metal se le trabaja en frío, se requieren grandes fuerzas, pero el esfuerzo propio del metal se incrementa permanentemente.

El trabajo en caliente se define como una deformación en condiciones tales de temperatura y velocidad de deformación que se producen la restauración y deformación de manera simultánea. Por el contrario, el trabajo en frío es el realizado en condiciones tales que no es posible que se produzcan eficazmente los procesos de recuperación.

En el conformado en caliente se elimina rápidamente el endurecimiento por deformación y la estructura granular alargada, por la formación de nuevos granos libres de deformación en un proceso de recristalización. Se pueden lograr deformaciones muy grandes trabajando en

caliente ya que se eliminan las perturbaciones producto de la deformación.

En el conformado en frío no se elimina el endurecimiento por deformación, aumentando la tensión de fluencia gracias a la deformación. Por esta razón, la deformación total que puede darse sin provocar la rotura es menor que la que se alcanzaría trabajando en caliente, a menos que se elimine, mediante recocidos intermedios, el endurecimiento por deformación.

El trabajo en frío acarrea un aumento en la resistencia mecánica y una disminución en la ductilidad. Si se trabaja en frío excesivamente, el metal puede romperse antes de alcanzar la forma y tamaño final que se desea. Por esta razón, el trabajo en frío suele realizarse en varias etapas, intercalando entre ellas recocidos intermedios, que disminuyan el endurecimiento por deformación y restauren la ductilidad.

### **Efecto de las Estructuras Metalúrgicas en el Conformado**

Las fuerzas necesarias para realizar una operación de conformación están relacionadas directamente con el límite elástico del material que se trabaja, y dicho límite a su vez, depende de la estructura metalúrgica y la composición de la aleación. En los metales puros la facilidad para el trabajo mecánico disminuye al aumentar el punto de fusión. Puesto que la temperatura mínima de recristalización es aproximadamente proporcional al punto de fusión, la temperatura mínima de trabajo en caliente aumentará también con el punto de fusión. La adición de elementos de aleación eleva, generalmente, la curva de fluencia cuando forma soluciones sólidas y las cargas de conformación aumentarán proporcionalmente. Los aleantes que forman soluciones sólidas provocan un descenso en el punto de fusión, para evitar el peligro de la fragilización en caliente es necesario emplear temperaturas máximas de trabajo más bajas.

Las características del trabajo plástico de las aleaciones de dos fases dependen de la distribución microscópica de la segunda fase. La presencia de una fracción grande, en volumen, de partículas uniformemente dispersas de una fase dura incrementa mucho el límite elástico, dificultando el conformado. Si las partículas de segunda fase son blandas solo modifican escasamente las características del trabajo. Si estas partículas tienen un

punto de fusión más bajo que la matriz, se presentarán dificultades por fragilidad en caliente.

La presencia de un microconstituyentes en masas grandes, uniformemente distribuidas, produce menos aumento del límite elástico que las partículas muy finamente divididas de una segunda fase, tal es el caso de la perlita en el acero. La forma de las partículas de carburo tiene mucha importancia en el trabajo en frío. Como resultado del trabajo mecánico, las partículas de una segunda fase tenderán a tomar la forma y distribución que corresponde a la deformación del cuerpo como un todo. Las partículas de segunda fase o inclusiones, que originalmente son esféricas, se distorsionan en la dirección principal de trabajo tomando una forma elipsoidal si son más blandas y dúctiles que la matriz.

Si las partículas son más duras y resistentes que la matriz, se mantendrán esencialmente indeformadas, DIETER-10. En general, la ductilidad en tracción, las propiedades a fatiga y la resistencia al choque serán más bajas en la dirección transversal a la laminación (perpendicular a la fibra) que en la longitudinal.

## ***Conformado de Tubos***

### **Fabricación de Tubería sin Costura**

Mediante extrusión se pueden fabricar tubos con tolerancias dimensionales tan estrechas como las que se logran en el estirado en frío. Para producir tubos con extrusión es necesario acoplar un mandril al extremo del vástago de extrusión. El mandril llega hasta la entrada de la matriz y el espacio que queda entre mandril y matriz es el que determina el espesor de paredes del tubo extrusado. Generalmente hay que emplear una palanquilla perforadora para que el mandril llegue hasta la matriz. Para que los tubos resulten concéntricos es necesario que el vástago y el mandril estén coaxialmente alineados con el cuerpo de extrusión y la matriz; también debe ser concéntrico el agujero de la palanquilla y esta debe ofrecer en toda su sección transversal igual resistencia a la deformación.

Uno de los métodos de extrusar tubos consiste en emplear una palanquilla perforada como material de partida. El agujero puede hacerse en el molde por mecanizado o por punzonado en caliente en una prensa separada. Como el agujero se puede oxidar durante el calentamiento, a veces se obtienen por este procedimiento tubos con la superficie interna oxidada. Un método más satisfactorio de extrusar un tubo consiste en partir de una palanquilla maciza, que es punzonada y extrusada en una sola fase en la prensa de extrusión. En una prensa de extrusión moderna, el mandril de punzonar es accionado por un sistema hidráulico distinto del que actúa sobre el vástago. El mandril se mueve coaxialmente respecto al vástago, pero su movimiento es independiente. En la operación de una prensa de extrusión de doble efecto, la primera etapa es la de recalcar la palanquilla con el vástago, manteniendo retirado el mandril. Seguidamente el mandril punzona la palanquilla expulsando un tapón de metal a través de la matriz. Por último avanza el vástago y extrusa la palanquilla sobre el mandril para formar el tubo. La extrusión es un proceso excelente para fabricar tubos sin costura, sin embargo existen otros procesos para fabricar este tipo de tuberías utilizadas corrientemente en la industria, que resultan más baratos que la extrusión.

Se utiliza el punzonado del acero y del cobre en la fabricación de tubos sin costura. Este procedimiento de punzonado aprovecha las tensiones de tracción que se producen en el centro de una barra que está sujeta a fuerzas alrededor de su periferia. En la se coloca una barra cilíndrica entre cilindros giratorios que están inclinados un cierto ángulo en el plano horizontal. Mediante rodillos guías (no inclinados) se evita que la barra pueda caer en dirección vertical a través de los cilindros de trabajo. Como estos últimos forman un ángulo entre sí, dan a la palanquilla un movimiento helicoidal que la hace avanzar hacia el mandril de punzonar. La presión de los rodillos que actúa alrededor de la periferia de la palanquilla inicia un agrietamiento en el centro, justamente al frente de la punta del mandril. El mandril de punzonar coopera en la operación, abriendo más el centro de la palanquilla y dando el diámetro interno al tubo. El punzonado es la operación de conformación más difícil de las que se acostumbra a someter a los metales. Solo un acero de la mejor calidad puede emplearse en esta operación y hay muchos metales y aleaciones que no se pueden punzonar satisfactoriamente. Al fabricar tubos de gran tamaño suele

hacerse un punzonado doble. En una primera operación se practica un agujero pequeño y en la segunda se reduce el espesor de pared y se aumenta el diámetro interno.

Los tubos producidos requieren usualmente una elaboración posterior para darles las dimensiones finales. Esto suele hacerse en un tren de mandril, que es fundamentalmente un tren dúo con un mandril. En esta operación se reduce el espesor de pared y el diámetro alargándose el tubo, disminuyendo el espesor de pared y aumentando el diámetro. Después se pasa el tubo por un tren alisador que limpia la superficie externa e interna y elimina la ligera forma oval resultante de las operaciones previas. La operación final en la fabricación de tubos de acero sin costura consiste en pasarlos a través de un tren dúo, con cilindros acanalados, que ajusta el diámetro externo final.

### **Proceso de Fabricación de Tubería Soldada Longitudinalmente**

Los tubos con soldadura longitudinal son elaborados a partir de planchas de acero, cuyos bordes laterales son doblados hacia adentro por medio de una calandradota, hasta darle la forma de un tubo, el cual primeramente es punteado y posteriormente soldado automáticamente por arco sumergido, (ICHASO-17). Como se puede ver, el diámetro y longitud de la tubería están sujetos al ancho y largo de las planchas. Una vez elaborado el tubo, este es inspeccionado por Ultrasonido y Rayos X, probándose posteriormente bajo carga hidrostática.

La línea es alimentada con hojas de acero que entran en la cilindradora de tres rodillos, donde son conformadas a la medida requerida. Tanto la soldadura exterior como la interior, se efectúan por un proceso de soldado automático con aporte de material, manteniéndose el arco eléctrico protegido por un fundente. Finalmente, el tubo es expandido mecánicamente en frío, para lograr sus dimensiones definitivas. Esto puede observarse esquemáticamente en la Figura 19, tomada del AHMSA-1.

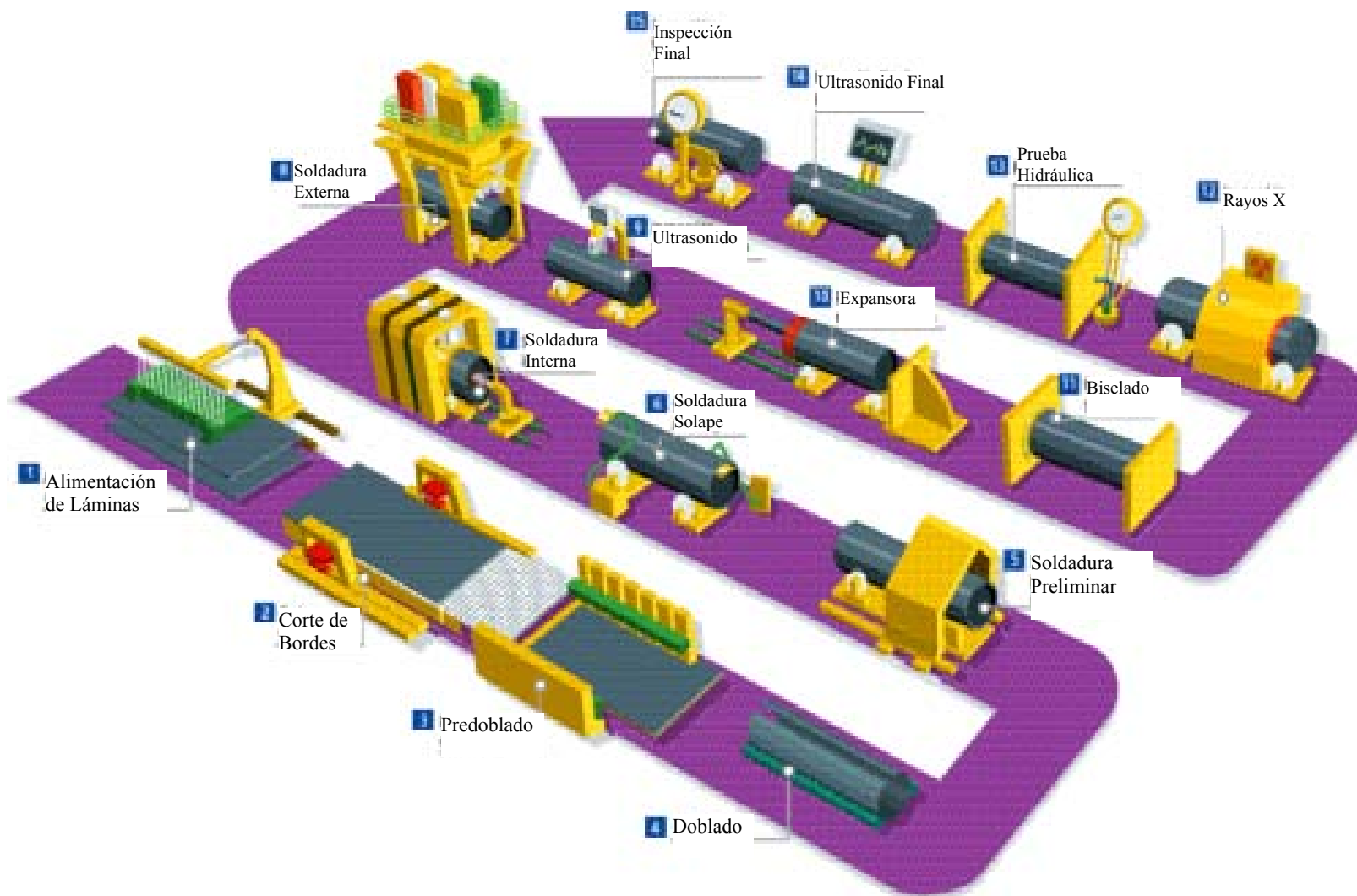


Figura 1 - Flujograma del Proceso de Fabricación de Tubos con Costura Longitudinal por SAW.



La fabricación de tubos longitudinales sin material de aporte se realiza por el proceso de resistencia eléctrica, donde el tubo adquiere forma mediante un tren continuo de rodillos y es soldado por resistencia eléctrica, sin aporte de material. Se aplica, simultáneamente compresión de recalque. A continuación, la zona soldada es sometida a tratamiento térmico.

## **Proceso de Fabricación de Tuberías Soldadas Helicoidalmente**

La tubería con soldadura helicoidal es fabricada a partir de una bobina de acero, la cual primeramente es desenrollada y enderezada, haciéndose posteriormente una preparación de la junta (bordes de la bobina) y enrollada en forma de hélice, (ICHASO-17).

Como se muestra en la Figura 20 el diámetro de la tubería dependerá del ángulo de conformación, formado por la banda de la bobina que entra y el eje del tubo que sale, así como del ancho efectivo de la banda utilizada.

$$\cos \phi = \frac{Ab}{\pi \cdot D}$$

La relación muestra que si el ancho de banda permanece constante, el diámetro dependerá solamente del ángulo  $\phi$ . La costura en espiral es realizada automáticamente por el método de “Arco Sumergido” en un proceso continuo, primeramente en la parte inferior interna y posteriormente en la superior externa. La chapa es cilindrada en forma de espiral por medio de rodillos de formación. Esto permite la obtención de distintos diámetros de tubo con un mismo ancho de bobina. Un cabezal de soldadura interna fijo suelda automáticamente la chapa y un cabezal de soldadura externa completa la costura. En ambos casos, el arco eléctrico permanece protegido por un fundente. Este proceso puede verse de manera ilustrativa en la Figura 21.

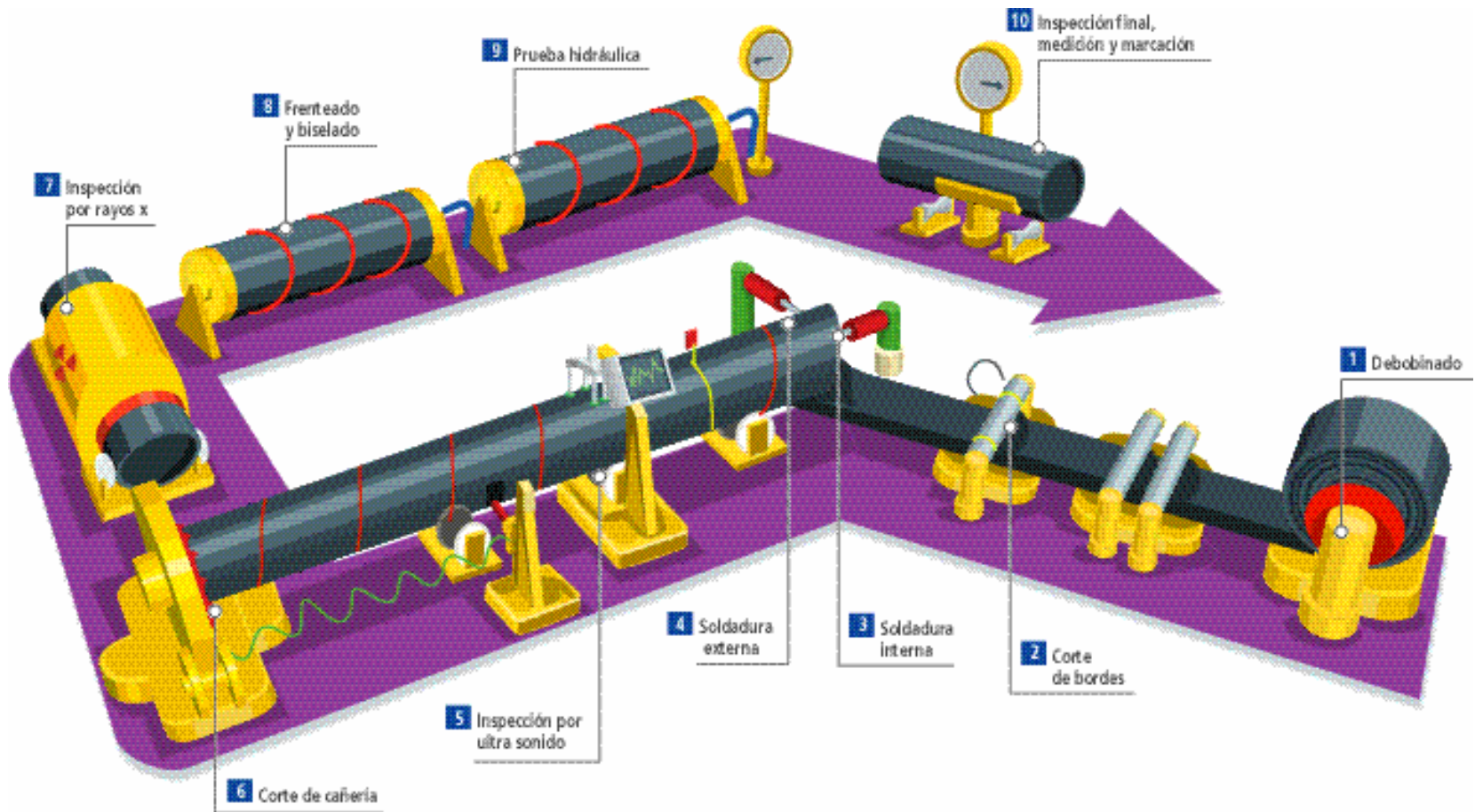


Figura 2 - Flujo del proceso de manufactura de la tubería soldada helicoidalmente. (Figura tomada del CROWN HOLLANDER-9)

## ***Normas Aplicadas para la Conformación de Tubos***

A manera ilustrativa se muestran a continuación algunas de las normas o procedimientos más utilizados por la industria para la conformación de tubos.

## **Requerimientos para Soldaduras Sanas**

### ***Limpieza***

Contaminantes orgánicos (aceites, petróleo, pinturas, etc.), óxidos y cascarillas o humedad, pueden causar porosidad. La contaminación de la junta soldada con zinc o epóxicos primarios puede resultar en porosidades severas debido a la gran cantidad de gases que se generan a causa de estos materiales durante la soldadura. Por consiguiente se deben utilizar electrodos limpios, libres de óxidos. Además se debe cuidar el utilizar fundente recirculado que no este en buen estado y siempre se debe tener el cuidado de remover óxidos o cascarillas de la junta a soldar y sen debe eliminar aceites, grasas y humedad.

Si cualquiera de estos contaminantes están presentes, la velocidad de soldadura se debe reducir de tal forma que permita que las burbujas de gas escapen de la soldadura antes de que estas solidifiquen. Debido a esto, es que frecuentemente resulta más beneficioso des – engrasar la junta o evaporar la humedad con el uso de sopletes.

### ***Diseño de Junta y Montaje***

El método de arco sumergido es un proceso de penetración profunda. Para evitar perforaciones, las láminas a soldar son generalmente soldadas a tope o se utiliza un pase de respaldo. Cuando se consiguen aberturas o boquetes, se debe alterar el procedimiento para reducir la penetración. Se puede o bien bajar la corriente, aumentar la velocidad de desplazamiento, utilizar corriente continua de polaridad negativa (electrodo negativo) o mayores “stickout.”

## ***Cobertura del Fundente***

Fijar la profundidad de la capa de fundente de manera que la luz del arco se refleje sobre el electrodo. Bajas cantidades de fundente resulta en destellos que incomodan al operador y pueden causar porosidad. Cantidades excesivas de fundente producen un cordón muy alto y angosto. En soldadura automática, la profundidad de fundente se fija por la distancia entre la boca de descarga del tubo de fundente y la pieza a soldar.

## ***Posición del Metal Base***

De forma general, en la soldadura por arco sumergido la posición del trabajo o metal base debe ser tal que el mismo se encuentre siempre nivelado. Sin embargo, existen dos casos en donde la soldadura se puede realizar con la plancha inclinada:

1. En algunas planchas de metal la velocidad de soldadura puede ser incrementada posicionando la pieza de trabajo para soldar de forma descendente, en un ángulo máximo de 25°.
2. La soldadura de piezas de gran espesor es algunas veces realizada entre 2 y 5° en posición ascendente. Esto mantiene al metal fundido dentro del arco sin que se caiga.

## ***Soldadura de Cuerpos Cilíndricos***

La tendencia del fundente y del metal fundido de caer o derramarse debe ser superada cuando se realicen soldaduras circunferenciales o en redondel. Tres factores deben ser cuidados:

1. Que el fundente perdido se mantenga en la zona del cordón mediante el uso de un soporte.
2. Que el tamaño del cordón sea limitado utilizando baja corriente y/o alta velocidad de avance.

- Que sea ajustado el desplazamiento del electrodo para que la soldadura solidifique mientras pasa por el centro vertical. Se puede ver en la Tabla 2 los desplazamientos recomendados.

Tabla 1 - Desplazamientos recomendados para soldaduras circunferenciales. Tomada del Manual de Soldadura-4

<b>Diámetro</b>		<b>Desplazamiento "d"</b>	
<b>pulg.</b>	<b>mm.</b>	<b>pulg.</b>	<b>mm.</b>
1-3	25-76	3/8 – 3/4	9,5-19
3-18	76-457	3/4 - 1	19 – 25,4
18-36	457-914	1 ¼ - 1 ½	32 – 38
36-42	914-1067	1 ½ - 1 ¾	38 – 44
42-48	1067-1219	1 ¾ - 2	44 – 51
48-72	1219-1829	2 – 2 ½	51 – 64
Más 72	Más 1829	3	64

Un desarrollo un poco más detallado de cómo realizar este tipo de soldadura se explicará más adelante en este mismo capítulo.

## ***Ubicación de la Conexión a Tierra***

Generalmente, se obtienen mejores resultados al soldar lo más alejado posible de la conexión a tierra. Siempre que sea posible, se debe sujetar la tierra directamente al metal a soldar.

Una mala colocación de la conexión a tierra puede causar o incrementar el golpe de arco y resultar en porosidad y mala calidad del cordón. Desafortunadamente no siempre es sencillo predecir el efecto y deben realizarse algunos experimentos sencillos. En algunos casos se obtiene buenos resultados dividiendo el cable de conexión a tierra y conectándolo en dos o más lugares de la pieza.

## ***Pre calentamiento***

Se puede necesitar pre calentamiento cuando se realice la soldadura de aceros de alta resistencia. La cantidad de pre calentamiento necesario se incrementa con planchas gruesas y contenidos de carbonos y elementos aleantes elevados. En soldaduras de múltiples pasos, manteniendo una temperatura entre pasadas iguala el pre calentamiento requerido hasta que se completa la soldadura.

## **Fundentes para Arco Sumergido**

En los fundentes para arco sumergido, las variaciones en el voltaje del arco cambian el consumo de fundente. Voltajes de arco más altos y por lo tanto mayores longitudes del arco incrementan la cantidad de fundente consumido. Consecuentemente, cuando un fundente contiene un elemento aleante en su composición química, aumentando el voltaje del arco se incrementa la cantidad de aleación recuperada en el depósito de soldadura.

## ***Tipos y Características Generales***

Además de la clasificación dada en la primera parte de este mismo trabajo, los fundentes para arco sumergido son además clasificados de acuerdo a sus características y aporte al cordón de soldadura en activos, neutros o aleantes, cada uno de los cuales se explicarán de forma resumida.

### **Fundentes Activos:**

Lincoln define a los fundentes activos como aquellos que contienen cantidades controladas de Mn y/o Silicio, LINCOLN ELECTRIC-22. Estas aleaciones están incorporadas en el fundente como ingredientes para proveer una mejor resistencia a la porosidad y fisuración de la soldadura causado por contaminantes sobre la plancha. La principal razón para usar los fundentes activos es realizar soldaduras de un solo paso con la menor cantidad de defectos y la más alta calidad. Note las siguientes consideraciones relacionadas con los fundentes activos:

1. Debido a que los fundentes activos contienen algunas aleaciones como ingredientes, la aleación del depósito variara con los cambios en el voltaje del arco. Un incremento en la aleación del depósito incrementa el nivel de resistencia del depósito en soldadura de múltiples pasos, pero puede reducir las propiedades de impacto. Por esta razón el voltaje debe ser controlada en forma más estricta en soldadura de múltiples pases cuando se utiliza fundentes activos que cuando se utiliza fundentes neutros. Por este motivo no se recomienda utilizar fundentes activos (700) para soldadura de múltiples pasos en planchas de más de una pulgada de espesor.
2. Algunos fundentes son más activos que otros. Esto significa que estos fundentes presentan mejor resistencia a cierto tipo de problemas en soldaduras de un solo paso que aquellos que son menos activos.

## Fundentes Neutros

Se definen como fundentes neutros aquellos que no producirán ningún cambio significativo en la composición del metal de soldadura como resultado de un cambio considerable en el voltaje del arco y por lo tanto en la longitud del arco. El uso principal para los fundentes neutros esta en la soldadura de múltiples pasos, especialmente cuando en el espesor de la plancha base excede una pulgada de espesor. Note las siguientes consideraciones relacionadas con los fundentes neutros:

1. Debido a que los fundentes neutros no contienen o contienen pocas aleaciones activas, ellos tienen poca o ninguna resistencia a la fisuración y/o porosidad causada por contaminantes, especiales en soldaduras de un solo paso. Por esta, razón, los fundentes neutros usualmente no son la mejor opción para soldaduras de un solo paso.
2. Todos los fundentes neutros no necesariamente producen soldaduras con buenas propiedades de impacto. Las propiedades de impacto dependen del diseño del fundente y del electrodo y tienen poco o nada que ver con relación a que el fundente sea neutro o no.
3. Aunque los fundentes neutros mantienen la composición del depósito de soldadura aunque se cambie el voltaje, no siempre es cierto que la composición de todo el depósito de soldadura sea la misma que la composición del electrodo usada.
4. Algunos fundentes neutros se desintegran con el calor del arco y liberan oxígeno, resultando un depósito de soldadura con menor contenido de carbono que el del electrodo.
5. Algunos fundentes neutros contienen silicatos de manganeso, los cuales pueden desintegrarse con el calor del arco y agregar algo de manganeso metálico y silicio al depósito. Estos cambios en la composición del depósito son bastantes consistentes aún cuando existan cambios considerables en el voltaje.
6. Aunque los fundentes neutros se utilizan para mantener la composición del metal de soldadura a través de un rango de voltajes, las propiedades de la soldadura, tales como



resistencia e impacto pueden variar debido a cambios en otros parámetros de soldadura tales como penetración, calor de entrada y números de pasos.

## **Fundentes Aleados**

Por su parte, los fundentes aleados son aquellos que se utilizan con electrodos de aceros al carbono para obtener depósitos de soldaduras aleados. Las aleaciones para el depósito de soldadura son agregados como ingredientes en el fundente. El uso principal para estos fundentes está en la soldadura de los aceros de baja aleación y para recargues duros. Note las siguientes consideraciones relacionadas con los fundentes aleados.

1. Debido a que el nivel de aleación en el depósito de soldadura depende del voltaje de arco correcto, y por lo tanto de la longitud del arco, es muy importante que el voltaje recomendado por el fabricante sea monitoreado muy cuidadosamente para asegurarse de que se logre la aleación deseada en el depósito.
2. Los fundentes aleados generalmente reducen los costos de soldadura debido a que permiten el uso de electrodos de aceros al carbono en lugar de alambres aleados de alto costo.
3. Los fundentes aleados son versátiles. Dependiendo de la aplicación, la aleación en el depósito de soldadura puede alterarse simplemente cambiando el voltaje.

La empresa Lincoln solo manufactura fundentes aglomerados, los cuales mezclan la materia prima en partículas de fundente de composición consistente sin causar cambios químicos. Este método de manufactura permite la inclusión de ingredientes químicos activos para controlar la porosidad, la adición de aleantes al depósito cuando sea necesario y una mejora general de la calidad de la soldadura. La denominación Lincoln para fundentes activos, neutros y aleados se muestra en la Tabla 3.

Tabla 2 - Denominación utilizada por Lincoln para cada tipo de fundente. Lincoln Electric-22.

<b>Fundente Tipo</b>	<b>Denominación Lincoln</b>
Activo	Serie 700
Neutro	Series 800/900
Aleado	A-XXX-10 y ST -100

## **Selección de la Combinación Alambre - Fundente**

Para la selección del fundente y del electrodo, es necesario escoger una combinación que cumpla con las exigencias mecánicas de la soldadura.

Las propiedades en servicio de las tuberías soldadas, dependen de tres partes de la junta: el metal base, la zona afectada por el calor y la zona de fusión. La zona de fusión en la soldadura por acero sumergido es producida por reacciones físicas y químicas del metal de aporte, el metal base y el fundente. Es necesario desarrollar una combinación de alambre – fundente para que las propiedades de la zona de fusión sean parecidas a las del metal base. (PENG Y.)

El alambre para la soldadura por arco sumergido de tuberías de acero debe satisfacer los siguientes requerimientos: (1) El electrodo debe ser apto para soldaduras de elevada corriente y velocidad. (2) Soldaduras Internas y externas pueden ser aplicadas, no necesitándose preparación de la junta. (3) No se necesita precalentamiento, calentamiento post soldadura y tratamiento térmico post soldadura. (4) La zona de fusión o cordón de soldadura debe presentar baja tendencia al endurecimiento. (5) El alambre de acero debe poseer capacidad para ser trabajado, con aceptable dureza y bajo costo.

La composición química del alambre es diseñada de acuerdo a los siguientes principios: (1) El cordón de soldadura consistirá mayormente de ferrita acicular. (2) Los elementos microaleantes son añadidos para incrementar la resistencia y la tenacidad de la zona de fusión y para producir partículas con gran estabilidad a altas temperaturas. (3) El alambre de acero es purificado para disminuir el contenido de S, P, H, O y N, además de bajo contenido de carbono.

Para soldar aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), la selección de la combinación del aporte es un poco más complicada que para otros procesos ya que se deben elegir dos componentes: el electrodo y el fundente. Esta combinación es la que nos dará las propiedades mecánicas. Para simplificar el proceso de selección la empresa Lincoln propone el siguiente procedimiento:

#### Primer Paso

Revisar que la combinación se encuentre certificada por el fabricante del par.

#### Segundo Paso

Cuando existan múltiples opciones, determine el desempeño y las propiedades requeridas. Se puede hacer uso de gráficos de barra suministrados por el fabricante (anexos) para determinar que fundente cumple mejor con el criterio.

#### Tercer Paso

Revisar la descripción del fundente para confirmar que el criterio de soldadura a utilizar es alcanzado con la combinación seleccionada.

#### Cuarto Paso

Antes de hacer la selección definitiva, revisar que el procedimiento de soldadura, la composición del metal a soldar, la temperatura y el diseño del bisel han sido tomados en cuenta en la escogencia del par alambre – fundente. La selección de la combinación alambre/fundente debe alcanzar, por lo menos, las propiedades mecánicas del acero a soldar, pudiendo sin embargo tener una composición química algo diferente. Estas propiedades (por ejemplo resistencia, tenacidad, termofluencia y resistencia a la corrosión) son referencia del tipo de servicio en el que será utilizado el acero. Siempre que sea posible, el electrodo debe seleccionarse de manera que se obtenga un cordón de soldadura con niveles de resistencia óptimos.

## **Soldadura de Aceros al Carbono por SAW**

Los aceros al carbono se definen como aceros que tienen adiciones de carbono de hasta 0,29%, de manganeso de hasta 1,65%, de silicio de hasta 0,60% y de cobre de hasta 0,60%, sin especificarse intervalos para otros elementos de aleación. (Manual de Soldadura - 12)

Los materiales de acero al carbono por lo regular se sueldan con combinaciones de electrodos y fundentes clasificadas bajo la norma AWS A5.17, Electrodos de aceros al carbono y fundentes para soldadura por arco sumergido. Los aceros típicos que se sueldan con estos consumibles se listan en ANSI/AWS D 1.1, Acero de código de soldadura helicoidal, dentro de las clasificaciones de Grupo I y Grupo II. Estos aceros incluyen ASTM A 106 Grado B, A36, A516, Grados 55 a 70, A537 Clase 1, A570 Grados 30 a 50, API 5LX Grados X42 a X52 y ABS Grados A a EH36. Estos aceros habitualmente se suministran en la condición de recién colados o normalizados.

Al seleccionar consumibles para SAW, es preciso que tanto la resistencia a la fluencia, la resistencia máxima a la tracción y la tenacidad a la entalla del metal de soldadura, coincidan con las propiedades del metal base. En aplicaciones especiales, sobre todo en ensambles de acero al carbono sujetos a tratamiento térmico de larga duración, después de la soldadura, es posible que se requieran los consumibles de baja aleación para soldadura por arco sumergido cubiertos por ANSI/AWS A5.23, Especificaciones para electrodos y fundentes de aceros al carbono de baja aleación, a fin de igualar las propiedades de resistencia a la fluencia del metal base.

## ***Metalurgia de la Soldadura***

Existen dos regiones de la junta soldada que son de importancia, denominadas, el metal base (MB) y la zona afectada por el calor, como se observa en la Figura 23.

### **Zona de Fusión (Cordón de Soldadura)**

Esta es la porción que se rellena de la unión, que hace la unión de los bordes. El cordón de soldadura exhibe una microestructura columnar similar a la estructura de colocada, la evolución de esta microestructura columnar es frecuentemente descrita como “crecimiento epitaxial”. El grano solidificado es una continuación del grano del metal base en el límite de fusión. El tamaño del grano columnar y su forma puede ser modificada alterando la forma del charco de soldadura.

### **Zona Afectada Térmicamente**

La zona afectada térmicamente (ZAT) o zona afectada por el calor (ZAC), es la región del metal base en donde la microestructura cambia mientras aumenta la temperatura durante la soldadura, pero permanece por debajo de la temperatura solidus. Cualquier cambio de microestructura depende de la aleación y de la condición inicial. Al pasarse desde la línea de fusión hacia la estructura de metal base original, distintas regiones pueden ser observadas dentro de la ZAT, dependiendo de la temperatura pico ( $T_P$ ) a la cual es calentado, Figura 22. Esto incluye la región de crecimiento de grano austenítico o de grano austenítico grueso, también denominada zona supercrítica de grano grueso (coarse-grained supercritical), cuya temperatura oscila entre 1300 – 1100 °C, la región de grano austenítico fino o supercrítico de grano fino (fine-grained supercritical), temperaturas entre 1100 -900 °C, la región parcialmente austenizada o intercrítico (900 – 700 °C) y la región templada o subcrítico (700 – 500 °C). Los rangos de temperatura son aproximados y debe tomarse en cuenta que la

clasificación en regiones utilizando el diagrama de fases de equilibrio no es apropiada y se debe tomar en consideración la cinética del proceso (BABU - 31)

La ZAT, especialmente en la región supercrítica de grano grueso, puede transformarse en martensita, lo cual podría degradar las propiedades de la soldadura por fragilización. La mayor diferencia entre la ZAT y el cordón de soldadura reposa en la estructura de grano austenítico y el gran contenido de inclusiones del cordón de soldadura.

### ***Electrodos y Fundentes de Acero al Carbono***

La especificación AWS A5.17 prescribe los requisitos que deben cumplir los electrodos y fundentes para soldadura por arco sumergido de aceros al carbono. Los electrodos sólidos se clasifican con base en su composición química (de fábrica), en tanto que los electrodos compuestos se clasifican según la química del depósito. Los fundentes se clasifican con base en las propiedades del metal de soldadura que se obtienen cuando se usan con electrodos específicos. Los fundentes se clasifican con base en la composición química y en las propiedades mecánicas del metal de soldadura depositado con un electrodo de una clasificación específica. La selección de los consumibles de SAW dependerá de las propiedades químicas y mecánicas que deba tener el componente que se fabrica, de la posición de soldadura y de la preparación que deba recibir la superficie del acero por soldar.

Los fabricantes de consumibles para SAW producen combinaciones de electrodo – fundente formuladas para satisfacer requisitos específicos de propiedades químicas y mecánicas y de condiciones de soldabilidad. Cabe señalar que la elección del electrodo influye de manera más importante sobre la química del metal de soldadura depositado, en tanto que la elección del fundente afecta más las propiedades de impacto Charpy en V y la soldabilidad global de la combinación electrodo/fundente. Al seleccionar los consumibles para SAW, conviene tener presentes los siguientes aspectos:

Conveniencia de escoger un fundente neutral o activo. Un fundente neutral añade pocos elementos de aleación, al depósito de soldadura, en tanto que un fundente activo agrega elementos de aleación al metal de soldadura depositado. Los fundentes activos suelen

preferirse para operaciones de soldadura de una sola pasada, su empleo en aplicaciones de múltiples pasadas puede estar limitado por las especificaciones de ingeniería, dada la posibilidad de que haya una acumulación excesiva de elementos de aleación en el metal de soldadura depositado. Los requisitos de propiedades mecánicas exigidos, incluyen las propiedades de impacto, resistencia mecánica y ductilidad del depósito resultante.

### ***Aceros de Baja Aleación y Alta Resistencia Mecánica (HSLA)***

Los aceros de alta resistencia y baja aleación, HSLA, son aceros con adiciones químicas relativamente bajas, por lo regular de menos de 1%, de Cr, Cu, Ni, Cb y V. estos aceros son generalmente de bajo carbono, 1,5 % Mn, microaleados con titanio, vanadio, niobio o aluminio, o una combinación de estos aleantes. (BAKKALOĞLU ADEM - 4) El fabricante por lo general suministra estos aceros en las condiciones recién laminadas, normalizadas o templadas, dependiendo de los requisitos de especificación del material. Los aceros que se soldan con consumibles de SAW cubiertos por ANSI/AWS A5.23 incluyen las especificaciones ASTM A242, A537 clases 1 y 2 entre otros. Cabe señalar que algunos de estos aceros también pueden soldarse con consumibles especificados en ANSI/AWS A5.17; la elección depende de los requisitos de las propiedades mecánicas. Muchos de los aceros de este tipo son denominados microaleados, cuando las cantidades de las microaleaciones son de menos de 0,1 % de boro, columbio y vanadio. Estos aceros microaleados soldables tienen resistencias de hasta 80 ksi (552 MPa).

Una de las características de estos aceros, además de su gran resistencia, es su tamaño de grano fino ( $< 6 \mu\text{m}$ ). En la actualidad, estos aceros son producidos combinando laminaciones termo –mecánicas con microaleaciones. El conocimiento de las características de la austenita a altas temperaturas y de la transformación de fase puede ayudar a mejorar las propiedades del acero. (GARDIOLA-14)

Como se introdujo en un principio, el contenido de distintos y variados elementos aleantes es una característica de este tipo de material, los cuales pueden formar varios tipos de precipitados.

Estos aceros HSLA, están siendo muy utilizados en la fabricación de varias estructuras tanto en aplicaciones críticas como en aplicaciones no críticas debido a que permiten diseños de esfuerzos económicos y amoldables, esto gracias al mejoramiento de la resistencia a la fluencia. La fabricación de dichas estructuras muchas veces involucra diferentes procesos de soldadura, donde el proceso de arco sumergido es muy utilizado para unir secciones de acero gruesas (GHOSH-15). Un uso exitoso y económico de aceros HSLA soldados depende en gran parte de la selección apropiada de los consumibles de soldadura y la posibilidad de utilizar procesos con gran energía aportada permitiendo grandes velocidades de deposición. El proceso de arco sumergido ha sido satisfactoriamente aplicado en muchas ocasiones en soldadura de multipases de planchas de acero gruesas, donde las propiedades del cordón de soldadura son significativamente gobernadas por la microestructura del depósito de soldadura. Además en estos aceros, variaciones de la energía aportada, aporte calórico, afecta la dureza, las propiedades de resistencia a la tracción, la velocidad de crecimiento de grietas a fatiga y la resistencia a la fractura.

Un incremento en el aporte calórico reduce la dureza, la resistencia última a la tracción y la resistencia a la fluencia, pero mejora la ductilidad del cordón. (GHOSH-9)

Gracias a que este tipo de acero presenta estas ventajas en sus propiedades mecánicas, su uso en la industria del transporte de fluidos se ha hecho importante. Una gran proporción de tuberías pasan por zonas de baja densidad poblacional, es decir, áreas rurales con distancias considerables entre zonas pobladas. Además estas tuberías, en grados de acero altos como los API 5L X65 y X80, son utilizadas para el transporte de gases específicos con cantidades importantes de azufre (que puede provocar corrosión por H<sub>2</sub>S). Bajo estas condiciones, existe una ventaja económica obtenida de utilizar tubos con gran resistencia. Los grados de acero antes descritos, X65 a X80, requieren que tengan tres características básicas, estas son:

1. Deben ser soldables con electrodos sin la necesidad de precalentamiento.
2. Deben contener segregaciones en el centro reducidas, especialmente para conservar la integridad en tubos de pequeño diámetro producidos de la zona central de la bobina.



## ***Soldadura de Aceros de Baja Aleación por SAW***

Los materiales de acero de baja aleación se sueldan con combinaciones de electrodo y fundente clasificadas según ANSI/AWS A5.23. Los aceros de baja aleación se dividen en muchos subgrupos y se utiliza la composición química y la resistencia a la fluencia de los aceros como criterios para determinar cuales consumibles de SAW conviene elegir para soldar las uniones. En muchos casos, es indispensable que la composición del metal de soldadura sea similar a la del metal base en términos de elementos de aleación, a fin de satisfacer los requerimientos de servicio. Esto tiene especial importancia en el caso de componentes que se usarán a temperaturas mayores que 345 °C, ya que aquí la resistencia a la oxidación y las propiedades de alta resistencia a la tensión son esenciales.

### ***Microestructura en Aceros HSLA***

Para alcanzar un alto grado de las propiedades mecánicas, los aceros HSLA debe poseer una microestructura bien definida y para lograr esto, en los últimos años se han desarrollados procesos de acería y laminación que permitan alcanzar satisfactoriamente dichos requerimientos. En este trabajo de investigación, trataremos de explicar de manera resumida la importancia de alcanzar, mediante laminación controlada termo–mecánicamente, una estructura predominantemente de ferrita acicular. Para esto se aclararan en primer lugar los conceptos básicos sobre las microestructuras características de los aceros.

### **Formación de la Ferrita Poligonal**

La ferrita alotriomórfica, llamada también ferrita proeutectoide, ferrita poligonal o ferrita de límite de grano, es el primer constituyente formado durante el enfriamiento de la austenita. El termino “alotriomórfica” significa que la fase es cristalina en su estructura interna, pero no exteriormente. La ferrita poligonal invariablemente nuclea a lo largo de los límites  $\gamma / \gamma$  y crece bajo un mecanismo de transformación difusional reconstructivo. Esto se observa en la Figura 24.

El crecimiento no es restringido por los límites de grano de la austenita. La difusión necesaria para obtener los cambios de la red cristalina se dan con un mínimo de deformación. Los núcleos de ferrita presentan contornos coherentes o semicoherentes con uno de los dos granos de austenita, esto implica que con el otro grano de ferrita adyacente, el contorno sea de tipo incoherente. Factores cinéticos frecuentemente previenen la transformación en condiciones por debajo del equilibrio. Un ejemplo es el cambio de fase, el cual es tan rápido que uno o más de los componentes no pueden redistribuirse. En los aceros, la difusividad de los intersticios y los elementos aleantes sustitucionales es muy distinta. Es posible entonces imaginar una condición donde la difusión del elemento sustitucional es tan lenta durante la transformación  $\gamma \rightarrow \alpha$  que los elementos aleantes sustitucionales no particiones, a pesar de que al carbón se le permita particionar. Este equilibrio forzado entre  $\alpha$  y  $\gamma$ , es denominado “Paraequilibrio”. La composición de la interfase esta dado por el lazo del diagrama de fase de paraequilibrio. Debido a las altas velocidades de enfriamiento involucradas, el crecimiento de la ferrita poligonal en soldadura puede ser asumida que ocurre por una transformación en paraequilibrio en donde en este caso dicha transformación es controlada por la difusión de carbono en la austenita al frente de la interfase.

### **Formación de la Ferrita Widmanstätten**

Se forma con placas con forma de cuña o peldaño delgado nucleando desde los límites de grano de la austenita. La ferrita Widmanstätten puede encontrarse como paquetes de placas. De acuerdo a JIAN-20, una unidad de ferrita puede presentar una morfología de cuña, siendo cada cuña constituida de dos placas adyacentes formadas cooperativamente de una manera mutuamente acomodadas. La forma de cuña surge en función de una pequeña diferencia en los índices del plano que cada placa toma de la austenita. Otra característica importante es la ausencia de carburos precipitados. Una segunda fase es observada entre las placas de ferrita la cual confiere este constituyente una semejanza con la bainita superior y proviene de la austenita que puede estar retenida durante el crecimiento de la ferrita. Dependiendo de la composición química y del ciclo térmico esta austenita puede permanecer estable a temperatura ambiente o transformarse en martensita o perlita.

## **Formación de la Bainita**

A una elevada velocidad de enfriamiento, la línea  $A_1$  del diagrama Fe-C (Fe-Fe<sub>3</sub>C) es descendida por debajo de 690 °C y el carbono tiene muy poco tiempo para difundir dentro de la austenita en forma de ferrita poligonal. En tanto, el carbono se concentra a lo largo de las agujas de avance de la ferrita poligonal y precipita entre ellos como carburo de hierro Fe<sub>3</sub>C. Este tipo de microestructura se conoce como bainita superior o bainita plumosa, agrupada bajo la categoría de ferrita con alineación M-A-C o AC (BABU - 5). Sin embargo, si algo de carbono difunde en el enfriamiento, listones de bainita se nuclearan y crecerán con un mecanismo similar al de la bainita superior, pero con cadenas de carburo más cortas. Esto es debido a que el carbono no puede difundir muy lejos a velocidades de enfriamiento muy rápidas. La bainita inferior es también agrupada bajo la categoría de AC.

## **Formación de la Ferrita Acicular (AF)**

Existen estudios intensivos sobre el desarrollo de la ferrita acicular en soldadura, referentes al efecto de los elementos aleantes, la velocidad de enfriamiento y otras variables de soldadura y su efecto sobre las propiedades. Se afirma la ferrita acicular da óptima resistencia y tenacidad debido a sus granos finos y a su naturaleza entrelazada, algunas veces referida como “estructura de tejido de canasta”. Es generalizadamente reconocido que la ferrita acicular tiene, en tres dimensiones, la forma de placas delgadas lenticulares, con gran densidad de dislocaciones.

Aparentemente las placas nuclean intragranularmente en inclusiones y están asociadas a grandes tamaños de grano austenítico, lo que justifica el hecho de ser un constituyente comúnmente observado en metales de soldadura ferríticos. La cantidad de ferrita acicular es influenciada por la presencia de Mn en el intervalo de 0,6 a 1,8 %. En este intervalo, la proporción de ferrita poligonal es reducida desde un 70 hasta un 20 %, mientras la AF se incrementa desde un 20 hasta un 70 % en el área de soldadura. La Figura 26 representa la forma característica de la ferrita acicular.

La ferrita acicular fina se encuentra asociada a bajas temperaturas de transformación. Debido a esto, deben diseñarse soldaduras que permitan que la máxima extensión de la transformación ocurra a bajas temperaturas. Esto puede lograrse incrementando la velocidad de enfriamiento de la soldadura o alterando la composición química de los elementos aleantes. Un acero con ferrita acicular fina muestra mejores características de tenacidad. En la práctica, las condiciones de soldar deben ser seleccionadas para que una pequeña cantidad de ferrita poligonal crezca antes de que se alcance la temperatura de comienzo de la transformación bainítica.

### **Formación de Martensita**

La martensita es producto de una transformación sin difusión. En soldaduras, se forma en pequeñas cantidades de austenita residual que permanece luego de la alta temperatura de fusión. La martensita en depósitos de soldadura de aceros de baja aleación ocurre solo en pequeñas cantidades, mayormente limitada a la región denominada microbases, las que a su vez contienen algo de austenita retenida. En algunas soldaduras de aceros de alta resistencia es posible observar microestructuras con grandes cantidades de martensita, pero la concentración de carbono debe mantenerse muy baja para evitar agrietamiento inducido por el hidrogeno (BABU -5).

### **Proceso de Laminación Controlada Termo-mecánicamente.**

La aplicación de microaleantes, laminación controlada y enfriamiento controlado ha sido uno de los más importantes logros en la industria metalúrgica en los últimos 30 años. La microestructura y las propiedades mecánicas de los aceros se han incrementado aplicando dichas tecnologías (BAKKALOĞLU - 4). Esta aplicación resulta en progresos significativos en la producción y aplicación de aceros de alta resistencia y baja aleación. Los aceros producidos por laminación termo – mecánica controlada, pueden satisfacer los requerimientos de aceros para tuberías, especialmente el requerimiento de alta tenacidad para el uso de baja temperaturas. (PENG - 30)

Estas propiedades mecánicas superiores, la baja cantidad de aleantes utilizados y costos de procesamiento hacen a estos aceros más atractivos que los aceros al carbono convencionales. Las propiedades mecánicas superiores de estos aceros son el resultado del bajo contenido de carbono, el refinamiento del grano de ferrita, el endurecimiento por precipitación, los bajos contenidos de aleantes y el control de la forma de las inclusiones (ZHAO - 34). El tamaño de grano fino resulta de suprimir el crecimiento del grano austenítico durante la laminación en caliente frenando el límite de grano con cualquier dispersión residual de precipitados. Su producción puede realizarse:

1. Añadiendo pequeñas cantidades de elementos formadores de nitruros o carburos fuertes (microaleantes).
2. Controlando la laminación.
3. Controlando el enfriamiento
4. Controlando la forma de las inclusiones.

Para obtener una buena combinación de tenacidad y resistencia, se requiere una estructura de grano fina. El tamaño de grano depende de (a) el tamaño de grano inicial y la temperatura de austenización y (b) las condiciones de conformado en caliente y enfriamiento subsiguiente. El proceso de laminación se ha convertido gradualmente en una operación mucho más controlada y se aplicado de forma incremental en aceros de baja aleación con composiciones bien definidas para proporcionar propiedades mecánicas óptimas cuando la deformación en caliente es completada. Uno de estos procesos, en el cual se controlan varias etapas de la laminación y la temperatura, la cantidad de reducción por cada pase es predeterminada y las temperaturas finales de laminación y enfriamiento son definidas de forma precisa, es denominado laminación controlada termo-mecánicamente, el cual es ahora de gran importancia en la obtención de buenas propiedades mecánicas en aceros para tuberías, puentes y otras aplicaciones ingenieriles. (BAKKALOĞLU - 6).

El propósito del procesamiento termo-mecánico de aceros microaleados es el obtener las propiedades mecánicas requeridas controlando la microestructura final. La microestructura final y las propiedades mecánicas dependen fuertemente de los programas de laminación y

enfriamiento de la plancha. (ERASMUS - 12) El proceso de control termo-mecánico, que incluye el recalentamiento de la plancha, laminación controlada y enfriamiento acelerado para la producción de aceros estructurales es de interés considerable tanto a nivel investigativo, como en la tecnología de manufactura y teniendo nosotros en este trabajo la oportunidad de mezclar estas dos tendencias, el desarrollo de estas líneas queda justificado.

La diferencia fundamental entre la laminación en caliente convencional y la laminación termomecánica es que el desbastado y los pasos finales son continuos y la nucleación de la ferrita ocurre principalmente en los límites de grano de la austenita en el proceso antiguo (Laminación convencional), mientras que en la laminación controlada termo-mecánicamente, existe un retraso entre el desbaste y las etapas finales y la nucleación de la ferrita ocurre tanto en interior del grano endurecido por deformación como en los límites de grano, resultando una estructura de grano más refinada.

## **Fundamentos de los Procesos de Laminación Termo-mecánica**

Los tratamientos termo-mecánicos son procesos que combinan la deformación plástica con el procesamiento a altas temperaturas o tratamiento térmico. Dicho tratamiento produce microestructuras y mejora propiedades que no pueden ser obtenidas por un tratamiento térmico convencional o en operaciones de conformado mecánico. Generalmente, se incrementos en la resistencia con mejoras en la ductilidad y la tenacidad son los objetivos del tratamiento termo-mecánico. Los tratamientos termo-mecánicos son aplicados a varios materiales metálicos para mejorar las propiedades mecánicas. La aplicación más importante del procesamiento termo-mecánico en uso es la laminación controlada de aceros microaleados HSLA, relacionado con el control del tamaño de grano. Las atractivas propiedades mecánicas son obtenidas como resultado de la combinación de un diseño metalúrgico avanzado y un procesamiento termo-mecánico apropiado en los aceros HSLA (BAKKALOĞLU - 6).

El objetivo primario de la laminación controlada de aceros HSLA es el conseguir un tamaño de grano ferrítico uniforme y muy fino, resultando un incremento en la resistencia a la fluencia y una mejora en la tenacidad debido al refinamiento de grano. El mecanismo primario de refinamiento de grano en laminación controlada es la recrystalización de la austenita durante la

deformación en caliente, conocida como recristalización dinámica. Este proceso es claramente influenciado por la temperatura y el grado de deformación que toma lugar durante cada pase por los laminadores.

Los procesos generales de laminación en caliente pueden clasificarse de acuerdo a la deformación que ocurre relativa a la transformación de fases. De acuerdo a esta clasificación, dichos procesos son divididos en los siguientes cuatro procesos generales: (a) laminación convencional, (b) laminación normalizada, (c) laminación termo-mecánica y (d) laminación termo-mecánica + enfriamiento acelerado. Estos procesos son mostrados en la Figura 27.

### **Relación entre los Parámetros del Proceso y Propiedades Mecánicas**

El niobio (Nb) en el acero, tiene gran influencia sobre el papel de la temperatura de comienzo de la laminación ( $T_s$ ) en controlar las propiedades mecánicas. En comparación con el Vanadio (V) y el Titanio (Ti) en el acero, la temperatura de formación de los carbonitruros de Nb se encuentran en un rango cercano a  $T_s$ . La temperatura de formación de los carbonitruros de titanio es mucho más elevada que  $T_s$ . De esta manera, un incremento de  $T_s$  colocará principalmente más Nb en solución, lo cual incrementa la resistencia a fluencia. Sin embargo con el incremento de  $T_s$  ocurre el crecimiento de los granos de austenita y del tamaño de grano de los aceros será grande después de la transformación, disminuyendo la elongación. En conclusión, con un incremento de la temperatura de comienzo de laminación, se incrementa la resistencia mientras la ductilidad decrece.

El rol de la temperatura final de laminación ( $T_f$ ) sobre las propiedades mecánicas en los aceros puede atribuirse a la rapidez de la transformación y al refinamiento del grano debido a la disminución de  $T_f$ .

El papel de la temperatura final de enfriamiento ( $T_c$ ) y la velocidad de enfriamiento ( $V_c$ ) se encuentra en el control de precipitados de carbunitruros, durante enfriamientos acelerados. Estos parámetros afectan el endurecimiento por precipitación y el refinamiento de grano de la microestructura. Especialmente cuando los contenidos de N en el acero (40 ppm), el efecto del Vanadio se incrementa. A temperatura por encima de los 500 °C, el carburo de V,  $V_3C_4$ , tiene

la más alta velocidad de nucleación y su contribución con el endurecimiento por precipitación es la más prominente. Por lo tanto dentro de ciertos rangos de temperatura por encima de los 500°, la disminución de  $T_C$  es beneficiosa tanto para la resistencia como para la ductilidad, Sin embargo,  $T_C$  no puede disminuir a valores muy bajos, ya que esto ira en decremento de la tenacidad, el enfriamiento acelerado puede a su vez controlar la precipitación de  $V_3C_4$  para obtener una microestructura más fina. (BAKKALOĞLU - 6).

## **Fundamentos Microestructurales**

La microestructura producida para diferentes tipos de laminaciones consiste de una matriz ferrítica con perlita o ferrita – bainita. A su vez, en la matriz existen partículas de carburo de niobio. (BAKKALOĞLU - 6).

Una microestructura optimizada es necesaria para alcanzar mejoras de resistencia y tenacidad de aceros para tuberías. Investigadores en los años 80 (ZHAO - 1) mostraron que para aceros de tuberías de alta resistencia y baja aleación, la microestructura dominante es ferrita acicular, la cual consiste en ferrita fina no-equiaxial dispersa con cementita e islas de martensita / austenita (M/A), teniendo estos aceros propiedades mecánicas idóneas.

La precipitación de carbonitruros es un fenómeno importante que influencia la microestructura de aceros HSLA, teniendo entonces influencia sobre las propiedades mecánicas. (MISHRA - 5). El Mejoramiento de las propiedades mecánicas de estos aceros esta relacionada con la microestructura, la cual consiste en cierta cantidad de ferrita acicular. La ferrita acicular es conocida como el producto de la transformación de una difusión mixta y un modelo cizallante, el cual se lleva acabo en un rango de temperatura ligeramente superior que el que se da para que se forme bainita superior durante la laminación en caliente. El crecimiento de la ferrita acicular generalmente involucra la partición del carbono y el movimiento de interfases  $\gamma/\alpha$  coherentes y/o semicoherentes que obedecen la relación Nishiyama-wasserman (MW) o la relación Kurdjumov-Sachs. (ZHAO – 34)

La característica microestructural de la ferrita acicular difiere grandemente de las microestructuras convencionales tales como la perlita, la ferrita poligonal y la bainita superior



e inferior. En comparación con estas microestructuras, la ferrita acicular formada durante el procesamiento termomecánico es más compleja. La morfología de la ferrita acicular esta compuesta de una asociación de franjas de ferrita no paralela entrelazada con densidades de dislocación elevadas y con la precipitación de carbonitruros dispersos. Existen partículas ultrafinas o islas dentro de las franjas o agrupaciones de franjas, estas son islas de Martensita/Austerita enriquecidas en carbono, cuya formación puede atribuirse a la partición del carbono durante la transformación de ferrita acicular y la post-transformación de carbono enriquecido en austenita. Cuando el espécimen es deformado en la región de austenita no recristalizada, altas densidades de subestructuras y dislocaciones se formarán en la austenita, lo cual incrementa la velocidad de nucleación de ferrita acicular, impidiendo el crecimiento de interfases  $\gamma/\alpha$  coherentes y/o semicoherentes y acelerando la difusión de carbono en la interfase  $\gamma/\alpha$ .

Todo esto puede resultar en tener una austenita carbono - enriquecida debido a la partición del carbono. Durante el enfriamiento acelerado, seguido por un enfriamiento en el horno, parte de la austenita carbono – enriquecida se puede transformar en martensita y la austenita retenida coexistirá con esta martensita. Esta característica microestructural de ferrita acicular puede ser diferenciada de ferrita ya que es laminar, de ferrita poligonal ya que presenta una menor densidad de dislocaciones y de bainita superior e inferior en que generalmente posee una estructura tipo listón con precipitados de carburo o bien a lo largo de los límites de los listones o dentro de los mismos.

La resistencia y tenacidad de la ferrita acicular difiere de las microestructuras convencionales por su característica microestructural. La mayoría de los estudios de aceros de bajo carbono concuerdan en que la unidad estructural clave es el tamaño de la faceta de clivaje, por lo que la relación de esta con la microestructura es importante. El tamaño de la faceta de clivaje de la ferrita acicular, por ejemplo, el tamaño de grano efectivo, es su paquete de listones. Esto sugiere que la grieta de clivaje puede deflectarse en los límites de los listones, como se muestra de forma esquemática en la Figura 28.

Las buenas propiedades son atribuidas a la microestructura entrelazada y fina de la ferrita acicular, que dificulta la propagación de la grieta debido a la presencia de un gran número de

límites de grano de ferrita por unidad de longitud. Al mismo tiempo, tanto los precipitados de carbonitruro como las islas de martensita / austenita dentro de la ferrita acicular, juegan un papel importante en el mejoramiento de la resistencia y la tenacidad. Estas características microestructurales son lo suficientemente finas para inhibir la iniciación y propagación de la grieta. Mientras más ferrita acicular se encuentre en la microestructura mixta, mayor la propiedad mecánica obtenida. Esto demuestra que el procesamiento controlado para obtener ferrita acicular es importante y puede ser aplicado en la producción comercial para mejorar el desempeño de los tubos de acero.

Titanio (Ti), Niobio (Nb) y Vanadio (V) son comúnmente utilizados como elementos aleantes para la precipitación de carbonitruros e inducir el refinamiento de grano en estos aceros. Estos precipitados finos son efectivos en la prevención del crecimiento de grano, utilizando la laminación controlada, la recristalización es retardada durante los últimos pasos. Aparte, otros elementos como el Molibdeno (Mo), el Cobre (Cu) y el Níquel (Ni) son añadidos a estos aceros, haciendo un caldo químico complejo. El cobre es añadido para el endurecimiento por precipitación ya que tiene una fuerte afinidad con el carbono y el nitrógeno, formando carbonitruros. (SIMPSON-31)

Adiciones de cobre van acompañadas por adiciones proporcionales de níquel. La formación de compuestos intermetálicos, la precipitación de nitruros de aluminio y la presencia de Fe en la fase de carbonitruros, pueden influenciar la precipitación en aceros HSLA. Estudios realizados (MISHRA-27) han demostrado que los precipitados son de composición química compleja conteniendo una gran variedad de elementos aleantes en el subenrejado cationico. Debido al complicado comportamiento de precipitación de estos aceros, el diseño del tratamiento termomecánico debe tomar en consideración la influencia de dicho comportamiento. Además, este escenario tan complejo de adición de aleantes, puede influenciar la cinética de la transferencia de masa así como también el equilibrio de precipitación.

Por lo tanto, aceros de la misma composición química pueden presentar diferentes comportamientos de precipitación (MISHRA - 28)

Un tamaño de grano fino y uniforme de ferrita de 10  $\mu\text{m}$  es alcanzado en condiciones de proceso de laminación controlada termo-mecánicamente, con un significativo aumento en la tenacidad. Se ha establecido que el refinamiento del grano de ferrita es el resultado de la deformación de la austenita por debajo de la temperatura de recrystalización y del enfriamiento acelerado después de la deformación, ambos procesos incrementan la nucleación de la fase ferrítica.

La microestructura reportada en la literatura del acero X65 para tuberías consiste en ferrita proeutectoide (ferrita poligonal),  $\alpha$ , más perlita. (WANG - 32). Los límites de grano, límite entre dos granos de la misma fase (misma estructura cristalina) son angulosos y fin definidos, sin la presencia de carburos en el límite de grano. Para aceros de bajo carbono, menores a 0,02 %C, la perlita no se forma y con una velocidad de enfriamiento suficientemente lenta para prevenir que el C sea retenido en solución, todo el carbono formará carburos en los límites de la ferrita. Aún para velocidades de enfriamiento elevadas existe muy poco o ningún C en solución a temperatura ambiente. Velocidades todavía más elevadas tienen el efecto de incrementar el número de sitios nucleantes de carburos, haciendo los carburos más finos.

Para aceros ferríticos – perlíticos, la fuente de carbono para límites de grano  $\alpha/\alpha$  es el carbono en la austenita y el crecimiento subsecuente es dependiente de la difusión del carbono dentro de la ferrita hacia los límites de grano para ser absorbidos por los carburos del límite de grano. Enfriamientos rápidos suprimirán la transformación perlítica y la cantidad de C a precipitar se reducirá, resultando en carburos más finos.

### **Efecto Bauschinger en Aceros HSLA**

Generalmente, se requiere una tensión menor para invertir la dirección de deslizamiento sobre cierto plano que para continuar el deslizamiento en la dirección original. La direccionalidad del endurecimiento por deformación se denomina efecto Bauschinger. (DIETER-10) El efecto Bauschinger puede ser definido como el fenómeno por el cual la deformación plástica de un metal causa una pérdida de resistencia en la dirección opuesta a la deformación original. Este fenómeno ha sido estudiado en la ferrita de aceros al carbono, observándose que la pérdida de

resistencia se incrementa con el contenido de carbono y la deformación primaria (más allá del valor límite). Además la pérdida de resistencia es independiente de la resistencia a la fluencia.

La literatura nos indica, JAMIESON-19, que el efecto Bauschinger es de importancia práctica cuando los procesos de fabricación involucran una inversión de la deformación plástica. Uno de estos casos es la fabricación de tubos de grandes diámetros en donde la resistencia a la tracción del tubo es medida utilizando una probeta con dirección transversal enderezada en frío. La resistencia medida en la probeta es menor que la resistencia del material antes del conformado. Esta pérdida de resistencia es la manifestación de que ocurre el efecto Bauschinger.

Los ciclos de tensión experimentados por la plancha durante la manufactura son complejos y difíciles de simular. Además, estos varían a través de los espesores de la chapa. Por ejemplo, las fibras exteriores del tubo sometidas a ciclos de tensión – compresión – tensión durante la manufactura sumado a un ciclo de compresión – tensión adicional durante el ensayo mecánico. Resultados indican que la magnitud del efecto Bauschinger es controlada por: la deformación y los contenidos de manganeso y carbono. El tamaño de grano, el columbio y el vanadio no tienen efectos significativos.

Un modelo sencillo puede ser utilizado para racionalizar los resultados de forma cualitativa. Esto es asumir que el acero está compuesto de carburos duros no deformados embebidos en una matriz de ferrita dúctil. Cuando ocurre el endurecimiento, las dislocaciones se acumulan en la interfase Ferrita/ Carburos para conservar la continuidad entre la ferrita y los carburos. Las tensiones residuales por las dislocaciones ayudarán al proceso de revertir el flujo, contribuyendo de esta forma con el efecto Bauschinger. La magnitud del efecto Bauschinger dependerá del número de dislocaciones acumuladas en los carburos y se incrementará con el incremento de la deformación plástica y la fracción en volumen de carburos.

El efecto se incrementa con el contenido de carbono debido al incremento en la fracción volumétrica de perlita. El manganeso también incrementa la fracción en volumen de perlita disminuyendo el contenido de carbono del eutectoide y bajando la temperatura de transformación. Los carburos de columbio y vanadio representan una pequeña fracción del

contenido de carburo total y por esto no contribuye de forma significativa a la magnitud del efecto Bauschinger. A grandes deformaciones, el modelo señalado anteriormente no puede aplicarse debido a que la acumulación de dislocaciones alrededor de los carburos, se hace complejo y procesos alternativos como el “cross-slip” (deslizamiento cruzado) pueden ocurrir en las vecindades de los carburos. Debido a esto el efecto Bauschinger no se incrementará continuamente, con la deformación plástica, sino que se saturará.

## **Carbono Equivalente**

El riesgo de fractura en la soldadura de un acero dado, depende de la composición química del mismo así como de su templabilidad cuando es expuesto a ciclos térmicos, encontrados durante la soldadura. El carbono equivalente de un acero es la medida de su tendencia potencial a agrietarse durante la soldadura. La práctica ha venido demostrando que la soldadura de aceros al carbono no presenta dificultades cuando se contenido de este elemento es igual o inferior a 0,25 % (ARAYA - 3).

Tanto el carbono como el manganeso, que constituyen los principales elementos que determinan y definen sus características mecánicas, tienen una marcada influencia en el agrietamiento. Se ha comprobado que la tendencia a la fisuración crece rápidamente cuando aumenta el contenido de C, un aumento de Mn incrementa, aunque de forma más débil, la posibilidad de fisuras.

Así mismo, se ha estudiado la influencia de otros elementos químicos que normalmente tienen su origen en la chatarra utilizada en la fabricación de acero, afectándoles en un coeficiente de equivalencia en relación con el carbono.

El valor del carbono equivalente se calcula aplicando la formula que ampara los elementos que componen químicamente el acero con sus ponderados coeficientes de influencia en el agrietamiento durante la soldadura con relación al C. Del carbono equivalente existen tantas expresiones distintas como ingenieros metalúrgicos o Asociaciones han investigado sobre el tema. Para simplificar, vamos a trabajar con las recomendadas por la norma API (API-2). En

esta norma, existen dos formulas distintas para calcular el carbono equivalente, en función del contenido de C.

- a) Cuando el contenido de carbono es menor o igual a 0,12 %, el carbono equivalente debe ser calculado utilizando la siguiente formula para CE(Pcm):

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

Si el análisis de la colocada indica un contenido de boro menor a 0,001%, entonces no se hace necesario incluir boro, y el contenido de boro puede ser considerado como cero para el cálculo.

- b) Cuando el contenido de carbono es mayor al 0,12%, el contenido de carbono equivalente debe ser calculado usando la siguiente formula CE(IIW):

$$CE(Pcm) = C + \frac{Mn}{6} + \left( \frac{Cr + Mo + V}{5} \right) + \left( \frac{Ni + Cu}{15} \right)$$

El carbono equivalente no debe exceder los siguientes valores:

- a) Para tubos de acero grado API 5L X80, para todos los grados de acero en tuberías sin costura que tengan un espesor de pared mayor a 20,3 mm (0,800 pulg.) y para tubos designados (por el comprador del tubo) como tubos con alto carbono equivalente, el valor será tomado de mutuo acuerdo entre el comprador y el fabricante (API-2).
- b) Para tubos que no estén cubiertos en el ítem anterior el CE (Pcm) debe ser máximo 0,25% y el CE (IIW) debe ser de 0,43% máximo.

## Aporte Calórico

Se denomina aporte calórico al calor puesto en juego en el proceso de soldeo. Esta energía llamada también energía bruta aportada (GÓMEZ-16) o EBA, se expresa en función de los parámetros del arco, en julios, cómo:

$$EBA = U \times I \times t$$

Donde: U = tensión de la corriente de soldeo, en voltios.

I = intensidad de la corriente de soldeo, en amperios.

t = tiempo de fusión del electrodo durante el cual se aporta calor a la pieza, en segundos.

Expresando esta energía por unidad de longitud de soldadura, julios/cm., tenemos:

$$EBA = \frac{U \times I \times 60s}{v}$$

Donde: v = velocidad de avance de soldadura, en cm./min.

Como podemos observar la EBA es independiente del diámetro del electrodo. En realidad esta influencia va implícita en la intensidad de la corriente y el tiempo necesario para su fusión. (IGNOTO -18)

Además, la composición química del cordón de soldadura depositado depende de la composición química del acero HSLA y del aporte calórico o calor aportado. Esto se debe al porcentaje de dilución del metal base en el cordón depositado, ya que mientras mayor sea dicho porcentaje, mayor será la influencia del metal base en el cordón de soldadura.

## ¿Cómo Hacer Soldaduras en Tuberías con SAW?

La soldadura de cuerpos cilíndricos difiere de la soldadura de chapas planas en dos consideraciones importantes. La primera, ya explicada anteriormente, es la tendencia del

fundente fundido y el metal de soldadura de caerse de la junta a soldar. Según LINCOLN-21 Esta tendencia se evita de la siguiente forma:

1. Ajustando la posición del alambre.
2. Limitando el tamaño del cordón utilizando una corriente más baja, menor voltaje y/o mayor velocidad de avance.
3. Utilizando un soporte para mantener en posición el fundente perdido.

En la soldadura de cuerpos cilíndricos el charco de metal fundido y la escoria tiende a bajar o caer. De hecho, en algunos casos el metal puede salirse de la junta. En casos menos severos, el charco fundido comienza a correr, pero solidifica antes de caer. Esto resulta en un cordón con forma irregular.

### ***Efecto de la Posición del Alambre***

Para prevenir la caída o distorsión de la forma del cordón, el metal fundido debe solidificar mientras pasa sobre el centro vertical de la pieza. Esto significa que el alambre debe ser posicionado en frente o adelante del centro vertical. La Figura 29, tomada de LINCOLN-23, ilustra la forma del cordón de soldadura que resulta de distintas posiciones de alambre. Note además que el cordón en la Figura B presenta mayor penetración y más tendencia a la perforación que el cordón de la Figura A. Lo contrario sucede para la Figura C.

El alambre debe ser colocado aproximadamente perpendicular a la superficie de trabajo, particularmente para tuberías de diámetros pequeños. Posicionarlo en un ángulo de incidencia distinto puede resultar en un cordón distorsionado o en un arco pobre.

### ***Efecto de la Corriente y Velocidad de Avance***

Indiferentemente de la posición del alambre, si el metal fundido es muy grande para el diámetro de la tubería, el metal puede caerse simplemente porque no puede solidificar en una forma acelerada. El tamaño del cordón depende del amperaje y la velocidad de avance



utilizada. Reducir la corriente y/o incrementar la velocidad de avance reduce el tamaño del cordón. Disminuir el voltaje reduce el volumen de escoria.

### ***Recolección del Fundente***

Las soldaduras de tuberías frecuentemente involucran un proceso de soldadura largo y continuo, por lo que la recuperación de fundente sea hace fundamental. Mantener el fundente limpio de impurezas y humedad tiene grandes ventajas, ya que se producirán soldaduras sanas, cordones “lisos” y no obturarán el mecanismo de alimentación. Se debe tratar de recuperar el fundente antes de que alcance el suelo. Utilizando un sistema de recuperación para remover el polvo y un separador magnético para eliminar partículas magnéticas.

En resumen, con una buena puesta a punto, la soldadura de cuerpos cilíndricos puede ser tan fácil como la soldadura de chapas planas. Sin embargo para alcanzar la puesta a punto se deben tomar las siguientes consideraciones.

1. El tamaño del cordón, determinado por la corriente de soldadura y la velocidad de avance.
2. La posición del electrodo y el ángulo del mismo.
3. Soporte de fundente para piezas de pequeño diámetro.
4. Soporte de fundente para los extremos.
5. Remoción de escoria.
6. Sistema de limpieza y recuperación de fundente.
7. Colocación de la conexión a tierra.

# Evaluación de la Soldadura

## *Ensayos Destructivos*

### **Ensayo de Tracción**

El ensayo de tracción se emplea para obtener una información básica sobre la resistencia mecánica de los materiales y como ensayo de recepción para la especificación de los mismos, es decir mediante el ensayo podemos obtener una descripción básica del material.

Un ensayo de tracción nos permite obtener magnitudes de propiedades mecánicas importantes para el diseño y desarrollo de materiales. Entre ellas tenemos: módulo de elasticidad o módulo de Young (E), límite elástico, resistencia a la tracción, % de elongación, resiliencia, tenacidad, ductilidad y gracias a la curva de esfuerzo –deformación real, podemos a su vez reportar el coeficiente de endurecimiento del material. Por su parte la curva real presenta un comportamiento ligeramente diferente a la ingenieril, ya que la primera de estas toma en cuenta el área instantánea para el cálculo del esfuerzo, reflejándose la realidad de que el material continua endureciéndose hasta fractura, obteniéndose una curva ascendente más allá del  $\sigma_{UTS}$  del material.

La forma y las magnitudes de las curvas tensiones – deformaciones de un metal dependerán de su composición, tratamiento térmico, historia anterior de deformación plástica y velocidad de deformación.

La resistencia a la tracción es el valor citado con más frecuencia en los resultados de los ensayos de tracción. En realidad es un dato que carece prácticamente de significado con relación a la resistencia mecánica de un metal. La resistencia a la tracción debe ser considerada como una medida de la carga máxima que puede soportar un metal, bajo las muy restrictivas condiciones de carga monoaxial. Debido a su fácil determinación es una propiedad muy reproducible, es útil para las especificaciones y para el control de calidad de un producto.

El material y la tubería suministrada, deben cumplir con las propiedades mecánicas indicadas en la especificación API - 5L, capítulo 9, párrafo 9.3.1 o equivalente. La diferencia entre la resistencia última a la tensión y el esfuerzo de cedencia no deben ser mayores de 103,42 MPa (15.000 psi), del mínimo establecido para ambos. La relación límite elástico-resistencia última a la tensión, no debe ser mayor de 0.93.

### **Prueba de Dobleza en Soldadura**

El objetivo del ensayo de doblado es determinar la calidad y ductilidad de la soldadura. Se realiza doblando una probeta en forma de U para luego evaluar la superficie doblada. Las pruebas de dobleza en la soldadura deben estar de acuerdo con API-5L, capítulo 9, párrafos 9.3.3 y 9.3.4 o equivalente, pero en ningún caso el radio de curvatura del mandril debe exceder seis veces el espesor de pared nominal del tubo. Este ensayo es requerido para calificar procedimientos de soldadura, soldadores y operadores de máquinas de soldar.

### **Prueba de Impacto Charpy V**

Se deben efectuar pruebas de impacto Charpy “V” transversal, conforme al Requerimiento Suplementario SR-5 del API – 5L, ASTM E-370 y ASTM E-23 o equivalentes, tanto en metal base, como en soldadura y línea de fusión, de acuerdo al croquis de la Figura 30. La localización de las probetas de impacto deben corresponder a una zona entre la superficie externa y el centro, cuando el espesor de pared de la muestra lo permita, en caso contrario, a través de todo el espesor de pared. Los valores de la temperatura de prueba y de energía absorbida deben ser como mínimo los que indica la Tabla 4.

Tabla 3 - Temperatura de prueba y Energía Absorbida.

Temperatura de Prueba °C	Dimensiones de la probeta (mm)
0 °C	7,5 x 10 x 55

### ***Ensayos No Destructivos***

Son aquellos ensayos en los cuales no se realiza la destrucción del componente que se va analizar, se dividen en:

- Técnicas Radiográficas.
- Técnica de Líquidos Penetrantes.
- Técnica de Partículas Magnéticas.
- Técnica de Ultrasonido.

La inspección no destructiva de la tubería y los criterios de evaluación y aceptación, deben ser como mínimo los que indica la especificación API-5L. Los métodos de inspección que se deben aplicar de acuerdo al proceso de fabricación de tubería, debe ser como mínimo uno de los indicados en la Tabla 5.

Tabla 4 - Métodos de Inspección

Proceso de Fabricación de la Tubería	Método de Inspección
<b>Arco Sumergido</b>	<input type="checkbox"/> Inspección ultrasónica. <input type="checkbox"/> Inspección radiográfica. <input type="checkbox"/> Inspección fluoroscópica. <input type="checkbox"/> Inspección partículas magnéticas
<b>Resistencia Eléctrica</b>	<input type="checkbox"/> Inspección ultrasónica. <input type="checkbox"/> Inspección radiográfica.
<b>Sin Costura</b>	<input type="checkbox"/> Inspección ultrasónica. <input type="checkbox"/> Inspección electromagnética. <input type="checkbox"/> Inspección partículas magnéticas

Se ha establecido que para la tubería soldada, los sitios críticos para la iniciación de grietas están en la zona afectada por el calor (cerca de la soldadura) o en la zona de fusión (cordón de soldadura). Debido a esto, se debe aplicar un control riguroso durante y después de realizar el proceso de soldadura, para disminuir la aparición de fallas y controlar el proceso.

Generalmente, el proceso de control suele consistir de tres etapas:

1. Inspección por Rayos X, Fluoroscopia, al cien por ciento del cordón de soldadura, recién conformado el tubo.
2. Inspección por Ultrasonido Manual de los extremos del tubo, luego de la inspección visual.
3. Inspección por Rayos X, inspección por película, para examinar los bordes luego de la prueba hidrostática y verificar la presencia o no de defectos en el tubo.

## Inspección por Rayos X

La radiografía es un ensayo no destructivo que muestra la presencia y naturaleza de defectos macroscópicos u otras discontinuidades que existan en el interior de la soldadura.

Los Rayos X son emitidos por una fuente del mismo tipo que en el caso anterior, impresionando en este caso, una película fotosensible. Este método es muy sencillo y preciso.

### **Inspección Fluoroscópica**

El equipo está compuesto por un emisor de Rayos X, el cual tiene forma cilíndrica y se encuentra ubicado en el interior de la tubería, teniendo un movimiento circular y longitudinal. Los Rayos X pasan tras la pared soldada y proyectan la imagen en una pantalla fluoroscópica, con la ayuda de un intensificador de imagen.

## **Inspección por Ultrasonido**

La inspección por ultrasonido es un rápido y eficiente método no destructivo para detectar, localizar y medir defectos entre superficies, tanto en la soldadura como en el metal base. De esta forma, se pueden detectar la profundidad a la cual se hallan los defectos, así como sus tamaños. En la empresa IMOSA, Tuboacero Fabricación se trabaja con la Prueba de Ultrasonido Manual, para esto se debe preparar la zona donde se realizará la prueba. Se cubre el cordón de soldadura con Celulosa, para que las ondas se desplacen de mejor manera. Un operador de Ultrasonido calificado, utiliza un instrumento que consta de un palpador que posee una zapata, esta realiza contacto alrededor del cordón de soldadura, luego el operario debe realizar un movimiento en forma de zig-zag para obtener una imagen clara, la cual se reflejará en una gráfica de picos que se muestra en una pequeña pantalla que posee el instrumento, el operario está en capacidad de interpretar dichas señales y así reconocer alguna discontinuidad que se pueda presentar.

## ***Prueba Hidrostática***

Al finalizar el proceso de fabricación de la tubería, esta es sometida a una “Prueba Hidrostática”, que consiste en presurizar internamente el tubo con agua, hasta un cierto valor, durante un tiempo comprendido entre los 5 y los 10 segundos. La prueba se realiza con el fin de detectar los defectos mediante fugas que se originen en la tubería sometida a prueba. La presión a la que debe someterse la tubería, se determina mediante la ecuación:

$$P = E \cdot 2S \cdot \frac{t}{D}$$

Donde:

P = Presión interna de la tubería.

E = Constante, cuyo valor oscila entre 0,6 y 0,9

S = Resistencia a la fluencia del material.

t = Espesor nominal de pared.

D = Diámetro externo del tubo.

Los valores mínimos de la presión a que debe someterse la tubería y la duración de la prueba están establecidos por las normas API, en función de las dimensiones de la tubería. Para realizar la Prueba Hidrostática (PH), se traslada el tubo con el *Puente Grúa* hacia unos rieles que lo transporta hasta la zona de la PH, es recibido por dos (2) operarios, donde estos colocan un sellador de goma en cada extremo del tubo, seguidamente se monta un operario en la máquina de PH donde presionan los selladores con unas tapas, a través de las cuales se inyecta agua a altas presiones (660 Psi) por unos 15 seg., permitiendo detectar algún orificio con alguna fuga de agua, además de verificar si el tubo es capaz de soportar presiones mayores a las que estará sometido durante su uso.

Además la literatura indica que esta prueba representa un método para confirmar la integridad de tuberías con contengan colonias de grietas de corrosión bajo tensión. La prueba es usualmente llevada a cabo a presiones que corresponden a tensiones cercanas o superiores al límite de fluencia del acero. Las imperfecciones perjudiciales potenciales son removidas de la tubería.

Tuberías susceptibles son periódicamente re – ensayadas, siendo las pruebas basadas en el tiempo de vida de las imperfecciones subcríticas remanentes en la tubería. (BRONGERS - 7)



## CAPITULO II

### MARCO METODOLÓGICO

#### Descripción General del Trabajo y sus Etapas

La experimentación del presente trabajo, se encuentra estructurada en dos etapas o partes, planificadas para cumplir con los objetivos generales, desglosándose los mismos en el montaje y calibración de la máquina y el estudio de las propiedades mecánicas y caracterización de tuberías con costura helicoidal fabricadas de acero API 5L X<sub>65</sub>.

En la primera parte, se han evaluado las condiciones en que ha llegado la máquina para de esta forma determinar cual es el camino crítico del montaje, desarrollando la planificación del mismo. De esta forma se procede a ensamblar la máquina respetando cada uno de los módulos descritos en el marco teórico, siguiendo una serie de pasos que serán detallados en el desarrollo que viene a continuación.

En la segunda etapa, se estudian las propiedades mecánicas y se realiza la caracterización de probetas provenientes de tuberías con costura helicoidal. Se utiliza un acero en desarrollo por la empresa SIDOR, de especificación API 5L X<sub>65</sub>. Además se ha determinado el uso de tres combinaciones alambre/fundente en tres bobinas del acero antes mencionado. Se investigan las condiciones de soldeo (voltaje, intensidad, velocidad de avance). Se identifica en cada una de las soldaduras el metal de aporte empleado y se estudia la posible influencia del mismo en las propiedades mecánicas de la junta soldada. A su vez, debido a resultados obtenidos en la primera prueba, se ha establecido la necesidad de estudiar las propiedades mecánicas del metal base de un segundo grupo de bobinas (3), también suministradas por SIDOR, utilizando la combinación de material de aporte que ha resultado mejor en la primera prueba, para determinar si el metal base cumple con las especificaciones de la norma.

## **Montaje de la Máquina**

En el montaje de la máquina para fabricación de tuberías con costura helicoidal marca Wilson Byard, modelo 2000, se realizan una serie de acciones, las cuales se desarrollan a continuación.

Debido a la cantidad de componentes que conforman el bastidor de entrada y a la complejidad de los mismos, se ha establecido que el bastidor de entrada representa el camino crítico en cuanto al montaje, ya que este demandará la mayor cantidad de tiempo y debe ser el camino a seguir en el desarrollo.

## **Acondicionamiento del Terreno**

En el área destinada a ubicar la máquina, se han retirado una serie de carrileras y volcadores utilizados para el traslado de tuberías desde galpón cuatro (4) hasta galpón ocho (8) de planta 2 en la empresa IMOSA Tuboacero Fabricación C.A, así mismo se mueven una serie de rodillos que transportan los tubos hasta el área de despacho. Seguidamente se procede al llenado de diferentes fosas con el fin de lograr un terreno completamente uniforme en el área. Para el montaje de la máquina se requiere una extensión de terreno libre de cien (100) m<sup>2</sup>.

Al estar el área acondicionada se procede al marcaje del piso. Primero se representan los puntos pivot de la mesa de conformación, un pivot para concordar los anclajes del bastidor de salida y un segundo pivot para ubicar los diferentes arcos o rieles en función de sus radios, utilizados para suspender y deslizar el bastidor de entrada.

Luego se efectúa el marcaje de los arcos del bastidor de entrada y de los soportes del bastidor de salida, según lo mostrado en la Figura 31. Con la ayuda de un topógrafo se determina el desnivel del terreno en cada una de los puntos marcados en el piso.

## **Desarrollo del Montaje**

La máquina se transporta en tres contenedores y en tres módulos que vienen al descubierto. El esquema de la Figura 32 se utiliza de referencia para conocer la metodología utilizada para la identificación de cada componente en el montaje

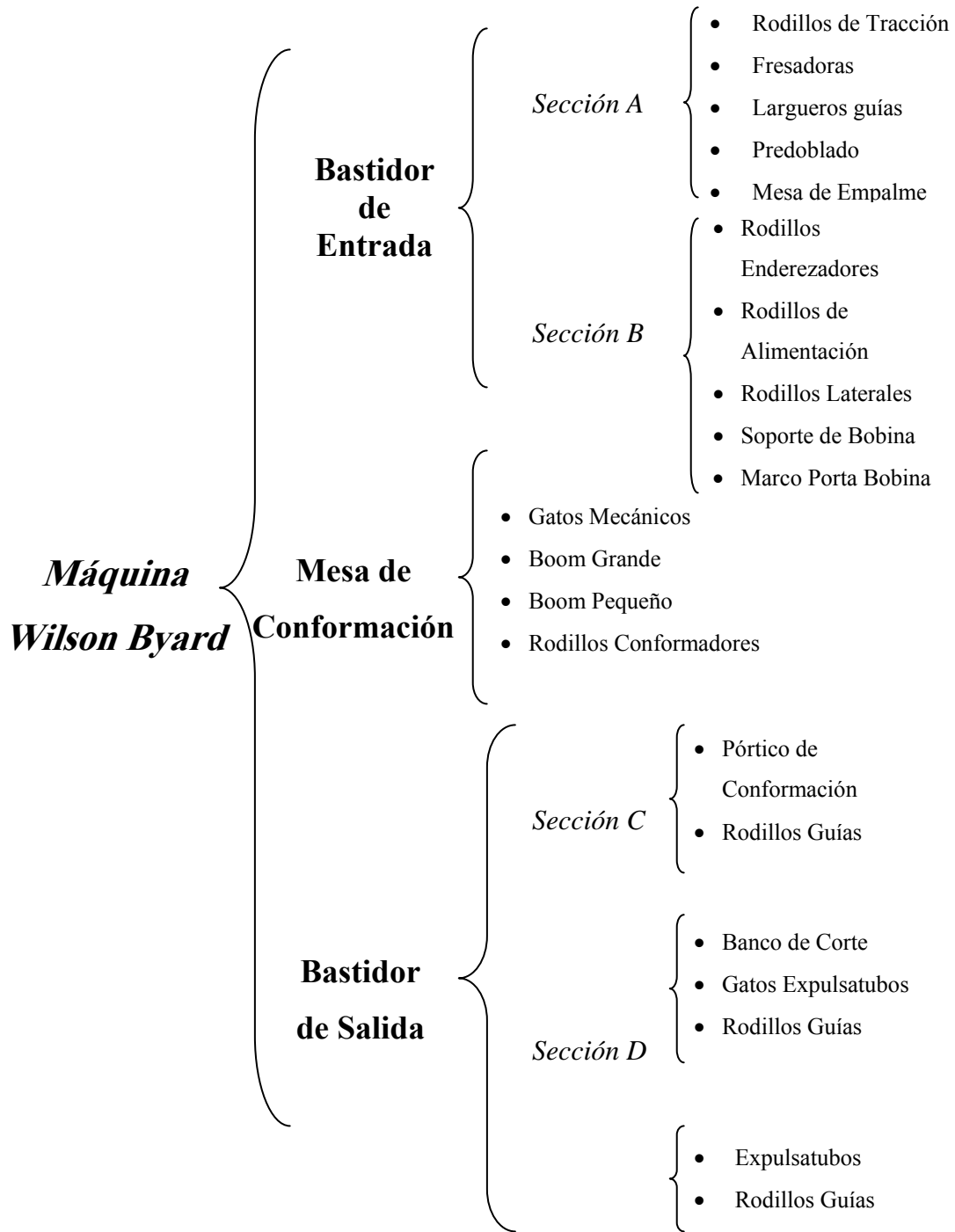


Figura 3 - Esquema que representa las partes de la máquina.

El procedimiento experimental para el montaje se elabora utilizando el método de planificación PERT – CPM, tomando en cuenta los tiempos de duración optimistas, pesimistas y tiempo estimado. Luego con el uso de una media ponderada que involucra estos tres tiempos, asignando un valor ponderado al tiempo estimado de 4, mientras que para los otros dos tiempos es 1. Para el cálculo del PERT y para realizar el diagrama de la metodología, se hizo uso del programa de computación Microsoft Project 2003. La Tabla 6 muestra los valores de duración, para de esta forma fijar el camino crítico.

Tabla 5 - Duración de cada etapa del montaje

Nombre de Tarea	Duración	optimista	esperada	pesimista
<b>A) Zona de Despacho</b>	<b>10,67 días</b>	8 días	9 días	20 días
1. Vía de Rodillos carrilera torno 2	3 días	2 días	3 días	4 días
Inspección final				
2. Recibidores Carrilera Torno 2	2 días	1 día	2 días	3 días
3. Topes Inspección Final	1,17 días	1 día	1 día	2 días
4. Volcadores Inpección Final	2,33 días	2 días	2 días	4 días
5. Giratubos Inspección Final	3,17 días	3 días	3 días	4 días
6. Vía de Rodillos Inpección Final	3,17 días	3 días	3 días	4 días
7. Topes Inspección Final - Despacho	1 día	1 día	1 día	1 día
8. Volcadores Despacho	2,17 días	2 días	2 días	3 días
9. Carrilera Despacho	1,83 días	1 día	2 días	2 días
10. Desmontar antiguo barnizado	1,17 días	1 día	1 día	2 días
11. Centralina y Red de Tuberías	3,83 días	2 días	4 días	5 días
1. Tablero Principal	2,17 días	2 días	2 días	3 días
2. Control de Mando (2)	2 días	1 día	2 días	3 días
<b>B) Nueva Máquina</b>	<b>21,33 días</b>	14 días	21 días	30 días
<b><u>1.1 Bastidor de Entrada</u></b>	<b>20,33 días</b>	12 días	21 días	26 días
1.1.1 Rieles	2 días	1 día	2 días	3 días
1.1.2 Nivelación	1,17 días	1 día	1 día	2 días
1.1.3 Fijación Módulo 1	12,5 días	8 días	13 días	15 días
1.1.4 Fijación Módulo 2	15,67 días	10 días	16 días	20 días
1.1.5 Centralina	3,17 días	2 días	3 días	5 días
<b><u>1.2 Mesa de Conformación</u></b>	<b>6,17 días</b>	5 días	6 días	8 días
1.2.1 Fijación	1,17 días	1 día	1 día	2 días

Nombre_de_tarea	Duración			
	optimista	esperada	pesimista	
1.2.2 Jackuators	1 día	1 día	1 día	1 día
<b><u>1.3 Bastidor de Salida</u></b>	<b>10,17 días</b>	5 días	11 días	12 días
1.3.1 Bases / Nivelación	2 días	1 día	2 días	3 días
1.3.2 Pórtico	3,17 días	2 días	3 días	5 días
1.3.3 Módulo 1	1,17 días	1 día	1 día	2 días
1.3.4 Módulo 2	1,17 días	1 día	1 día	2 días
1.3.5 Módulo 3	1,17 días	1 día	1 día	2 días
1.3.6 Centralina	1,83 días	1 día	2 días	2 días
2.1 Panel Principal	2,83 días	2 días	3 días	3 días
2.2 Panel de Control	3 días	2 días	3 días	4 días
2.3 Generadores / Transformadores	3 días	2 días	3 días	4 días
2.4 Cónsola	3,17 días	3 días	3 días	4 días
2.5 Cabezales de Soldadura	3 días	2 días	3 días	4 días
2.6 Motoreductores Tren de Enderezado	1,33 días	1 día	1 día	3 días
2.7 Motoreductores Tren de Tracción	2,17 días	1 día	1 día	8 días
<b>C) Vía de Rodillos entre Máquinas</b>	<b>14,17 días</b>	10 días	15 días	15 días
1.1 Instalar Rodillos (19)	7,33 días	4 días	5 días	20 días
1.2 Sistema de Limpieza del Tubo	8,67 días	4 días	7 días	20 días
2.1 Acometida Vía de Rodillos	4 días	3 días	4 días	5 días
2.2 Acometida Sist. Limpieza	3,5 días	3 días	3 días	6 días
<b>D) Vía de Rodillo Carrilera 2 - 6</b>	<b>16,67 días</b>	11 días	17 días	21 días
1.1 Instalar Rodillos (21)	5,33 días	4 días	5 días	8 días
1.2 Instalar Volcadores (02)	2 días	2 días	2 días	2 días
1.3 Instalar Recibidores (02)	2,17 días	2 días	2 días	3 días
1.4 Cambiar Sentido Carrilera 5	2 días	2 días	2 días	2 días
1.5 Instalar Giratubos (06)	2 días	1 día	2 días	3 días
1.6 Instalar Parrillas de Reparación (04)	3 días	2 días	3 días	4 días
1.7 Instalar Parrillas de Insp (02)	1,17 días	1 día	1 día	2 días
2.1 Acometida Vía de Rodillos	4 días	4 días	4 días	4 días
2.2 Paneles de Control (04)	4,17 días	4 días	4 días	5 días

Cabe destacar que aunque la planificación involucra varias tareas para lograr tener completamente operativa la línea helicoidal de la planta, el alcance de este trabajo se enfoca al desarrollo del montaje de la máquina, por lo que las otras tareas planificadas y realizadas no son extensamente expuestas.

Los valores reportados en la tabla ratifican el hecho de que el bastidor de entrada es el componente que demandará más tiempo por la cantidad de equipos a montar y por la precisión que se requiere para el montaje de muchos de ellos, ejemplo de estos es el tiempo que se debe dedicar para acoplar los motores reductores tanto del tren de enderezado como del tren de tracción.

De acuerdo a esto la metodología utilizada se ha plasmado en el siguiente diagrama de las Figuras 33, 34 y 35.

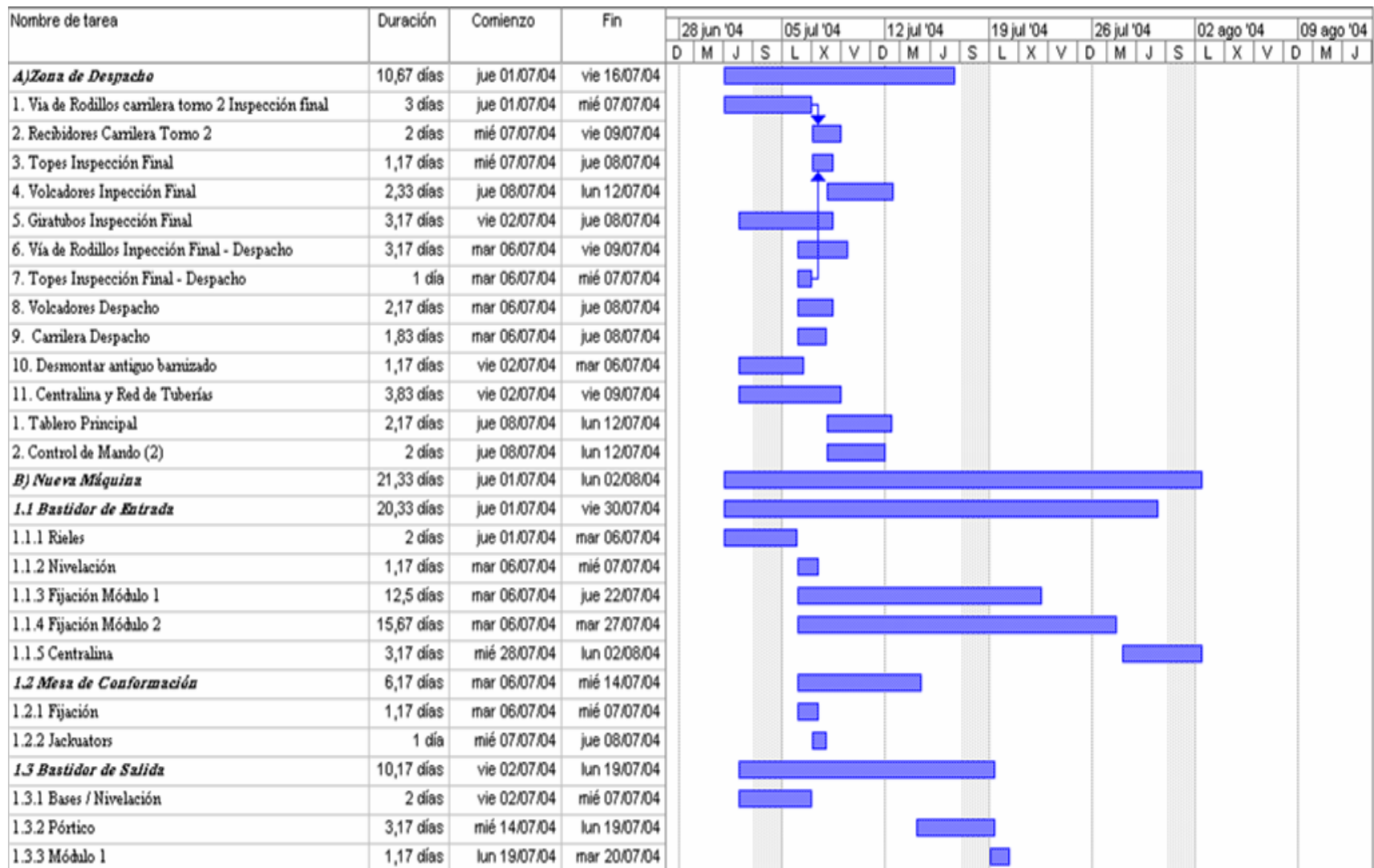


Figura 4 - Diagrama Esquemático de la programación realizada para el montaje de la máquina



Nombre de tarea	Duración	Comienzo	Fin	28 jun '04							05 jul '04							12 jul '04							19 jul '04							26 jul '04							02 ago '04							09 ago '04						
				D	M	J	S	L	X	V	D	M	J	S	L	X	V	D	M	J	S	L	X	V	D	M	J	S	L	X	V	D	M	J																		
1.3.3 Módulo 1	1,17 días	lun 19/07/04	mar 20/07/04																																																	
1.3.4 Módulo 2	1,17 días	mié 21/07/04	jue 22/07/04																																																	
1.3.5 Módulo 3	1,17 días	jue 22/07/04	vie 23/07/04																																																	
1.3.6 Centralina	1,83 días	lun 26/07/04	mié 28/07/04																																																	
2.1 Panel Principal	2,83 días	mié 07/07/04	lun 12/07/04																																																	
2.2 Panel de Control	3 días	vie 09/07/04	mié 14/07/04																																																	
2.3 Generadores / Transformadores	3 días	mié 14/07/04	lun 19/07/04																																																	
2.4 Cónsola	3,17 días	lun 19/07/04	jue 22/07/04																																																	
2.5 Cabezales de Soldadura	3 días	mié 21/07/04	lun 26/07/04																																																	
2.6 Motoreductores Tren de Enderezado	1,33 días	vie 23/07/04	lun 26/07/04																																																	
2.7 Motoreductores Tren de Tracción	2,17 días	lun 26/07/04	mié 28/07/04																																																	
<b>C) Vía de Rodillos entre Máquinas</b>	14,17 días	mar 06/07/04	lun 26/07/04																																																	
1.1 Instalar Rodillos (19)	7,33 días	mar 06/07/04	jue 15/07/04																																																	
1.2 Sistema de Limpieza del Tubo	8,67 días	jue 22/07/04	mar 03/08/04																																																	
2.1 Acometida Vía de Rodillos	4 días	lun 12/07/04	vie 16/07/04																																																	
2.2 Acometida Sist. Limpieza	3,5 días	lun 02/08/04	jue 05/08/04																																																	
<b>D) Vía de Rodillo Carrilera 2 - 6</b>	16,67 días	mar 13/07/04	mié 04/08/04																																																	
1.1 Instalar Rodillos (21)	5,33 días	mar 13/07/04	mar 20/07/04																																																	
1.2 Instalar Volcadores (02)	2 días	mar 20/07/04	jue 22/07/04																																																	
1.3 Instalar Recibidores (02)	2,17 días	jue 22/07/04	lun 26/07/04																																																	
1.4 Cambiar Sentido Carrilera 5	2 días	lun 26/07/04	mié 28/07/04																																																	
1.5 Instalar Giratubos (06)	2 días	mié 28/07/04	vie 30/07/04																																																	
1.6 Instalar Parrillas de Reparación (04)	3 días	vie 30/07/04	mié 04/08/04																																																	
1.7 Instalar Parrillas de Insp (02)	1,17 días	mié 04/08/04	jue 05/08/04																																																	
1.8 Centralina (02)	3 días	jue 05/08/04	mar 10/08/04																																																	
2.1 Acometida Vía de Rodillos	4 días	lun 19/07/04	vie 23/07/04																																																	
2.2 Paneles de Control (04)	4,17 días	lun 26/07/04	vie 30/07/04																																																	

Figura 5 - Continuación de la programación del Montaje

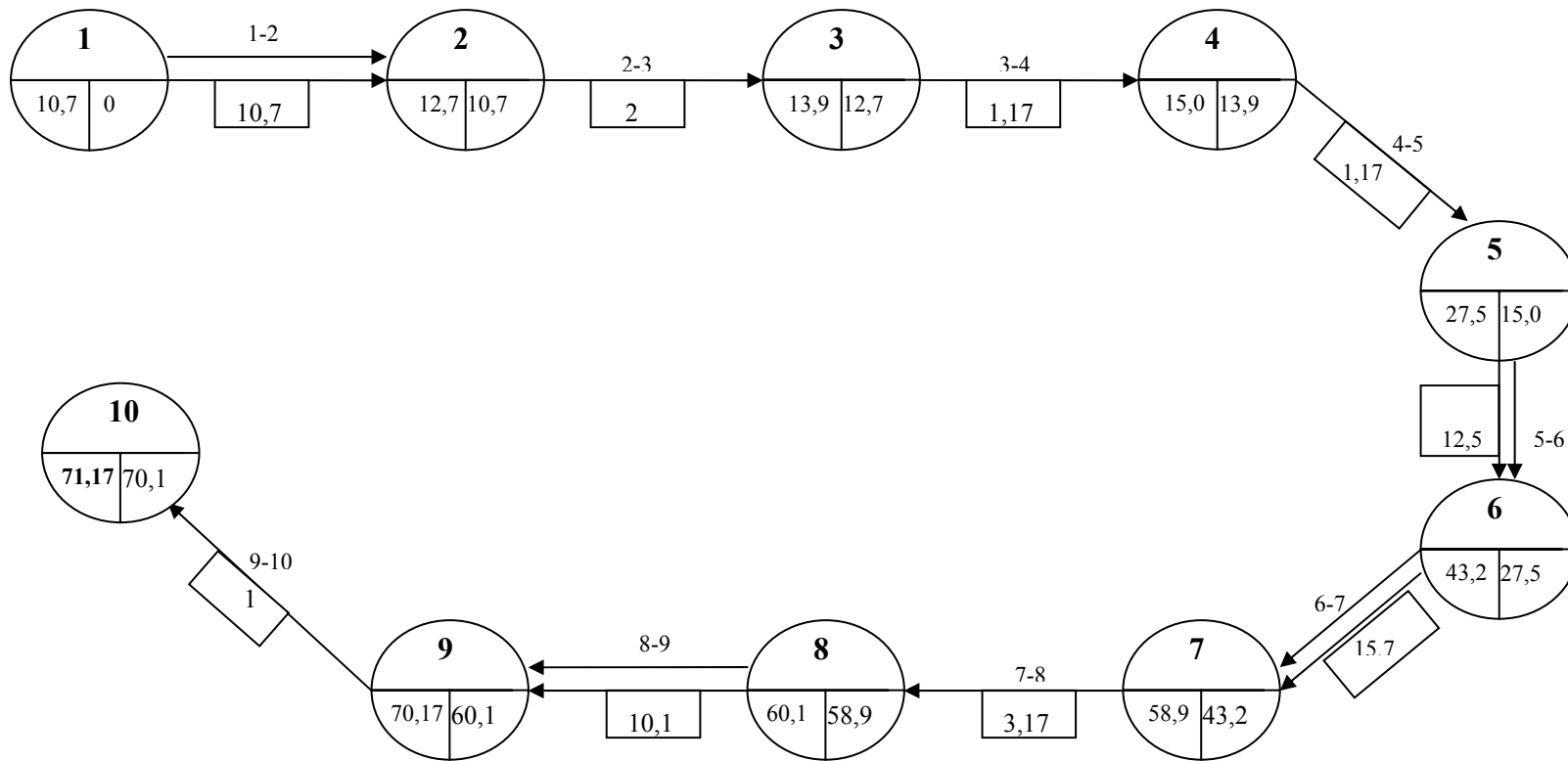


Figura 6 - Gráfica PERT

Tabla 6 - Actividades vs. Tiempos en el PERT

<b>ACTIVIDADES</b>	<b>TIEMPO (días)</b>
<b>1- Acondicionamiento del Terreno *</b>	<b>10.7</b>
<b>2- Fijación de Rieles</b>	<b>2</b>
<b>3- Fijación Mesa de Conformación</b>	<b>1.17</b>
<b>4- Nivelación</b>	<b>1.17</b>
<b>5- Fijación Modulo 1 (Sección A) *</b>	<b>12.5</b>
<b>6- Fijación Modulo 2 (Sección B) *</b>	<b>15.7</b>
<b>7- Instalación de Centralina</b>	<b>3.17</b>
<b>8- Fijación Bastidor de Salida *</b>	<b>10.17</b>
<b>9- Montaje de Jackuators</b>	<b>1</b>
<b>10- Final del Montaje</b>	

\* Acciones críticas

## **Calibración de la Máquina**

Para la calibración de la Máquina se conformaran tubos de 30” de diámetro utilizando como material base acero API 5L grado B con un ancho de banda de 1010 mm y 9,53 mm de espesor. Se utiliza como material de aporte Alambre ESAB K12 (EM12K) y Fundente 350 (F7A2). El objetivo es lograr la conformación de 18 tubos que cumplan con la norma API al momento de su liberación, además se analiza el funcionamiento de cada componente de la conformadora como los rodillos de tracción, rodillos de enderezamiento, sistema de fresado, rodillo inversor, sistema de alimentación de alambre Na3 y cualquier otro que resulte crítico para garantizar un funcionamiento óptimo de la máquina. Parte importante para poder conseguir el diámetro requerido depende de la facilidad que se tenga de ajustar y mantener el ángulo de conformación.

## **Materiales y Equipos**

- Tres bobinas de acero (SIDOR) de especificación API 5L Grado B
- Máquina conformadora de tubos mediante la utilización de soldadura helicoidal por arco sumergido (Marca Wilson Byard, Modelo 2000).
- Fundente ESAB 350 (F7A2) alambre ESAB K12 (EM12K)

Para realizar la conformación se utiliza el procedimiento de soldadura IMOSA WPS 028 Ver Anexo 1.

## ***Estudio de Propiedades Mecánicas en Tuberías de Acero API 5L X65 Soldadas por SAW***

### **Determinación de la Mejor Combinación de Material de Aporte. Comprobación de Propiedades Mecánicas del Metal Base**

El presente estudio es motivado a la realización de tubos con costura helicoidal por el proceso de arco sumergido utilizando un acero en desarrollo por la empresa SIDOR. Dichos tubos formarán parte de un proyecto desarrollado por PDVSA, denominado proyecto ICO, el cual comprende una importante longitud de terreno.

### **Materiales y Equipos**

- Seis bobinas de acero (SIDOR) de especificación API 5L X65
- Máquina conformadora de tubos mediante la utilización de soldadura helicoidal por arco sumergido (Marca Wilson Byard, Modelo 2000T).
- Tres combinaciones de material de aporte.
- Máquina de Tracción y Doble, modelo MOHR & FEDERHAFFFAG.
- Un microscopio óptico digital Olympus modelo BX60. Metal Base X65
- Durómetro, marca OTTO WOLPERT- WERKE
- Máquina para ensayo Charpy máquina marca: TINIUS OLSEN WILLOW GROVE

El metal base a utilizar para la fabricación de tubos, es el acero API 5L X65, cuya composición química, dada por la norma API<sup>1</sup> esta dada en las Tablas 8 y 9.

---

<sup>1</sup> Especificación: Specification For Linepipe. API Specification 5L 42<sup>nd</sup> Edition, January 2000.

Tabla 7 - Composición química de Aceros a soldar según API 5L PSL 1<sup>2</sup>

<b>Grado</b>	<b>Carbono</b>	<b>Manganeso</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Azufre</b>	<b>Otros</b>
	<b>Máximo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b> <b>Máximo</b>	<b>Máximo</b>	
X65	0,26	1,45	0,030	0,030	Nb+V+Ti < 0,15 %

Tabla 8 - Composición Química de Aceros para soldar según API 5L PSL 2

<b>Grado</b>	<b>Carbono</b>	<b>Manganeso</b>	<b>Fósforo</b>	<b>Azufre</b>	<b>Otros</b>
	<b>Máximo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Máximo</b>	
X65	0,22	1,45	0,025	0,015	Nb+V+Ti < 0,15 %

La identificación dada por la empresa SIDOR a cada una de las bobinas suministradas, en la que se especifican las dimensiones, el peso y el tipo de material, se observan de manera ilustrativa en la siguiente Tabla 10:

---

<sup>2</sup> PSL: Nivel de especificación para el producto (de las siglas en inglés **Product specification level**), PSL 1 es una especificación que establece menor rigurosidad que PSL 2

Tabla.9 - Datos de las Bobinas Suministradas por SIDOR

<b>Material</b>	<b>Colada</b>	<b>Bobina</b>	<b>Ancho</b>	<b>Peso</b>	<b>Espesor</b>	<b>Diámetro</b>
	<b>Nro</b>	<b>Nro</b>	<b>(mm)</b>	<b>Neto (Kg)</b>	<b>(mm)</b>	<b>Interior (mm)</b>
X65	541529	631579	1050,0	16892	11,91	760
X65	541529	622517	1050,0	15813	11,91	760
X65	048006	607192	1050,0	15550	11,91	760
X65	542688	665260	1050,0	16221	11,91	760
X65	542688	665262	1050,0	15682	11,91	760
X65	542688	666119	1050,0	16085	11,91	760

Las tres últimas bobinas, colocadas con letras azules en la Tabla 10, se utilizan en la segunda parte de este mismo estudio, enfocándose en la revisión de las propiedades mecánicas del metal base. De igual forma, las propiedades mecánicas mínimas necesarias son especificadas en las normas y se dan en la Tabla 11.

Tabla 10 - Propiedades mecánicas requeridas por la especificación API 5L X65.

<b>PSL 1</b>							
	<b>Fluencia</b>				<b>Tracción</b>		
<b>Acero</b>	<b>(mínimo)</b>				<b>(mínimo)</b>		
	psi	Mpa			psi	Mpa	
X65	65.000	(448)			77.000	(531)	

<b>PSL 2</b>								
	<b>Fluencia</b>		<b>Fluencia</b>		<b>Tracción</b>		<b>Tracción</b>	
<b>Acero</b>	<b>(mínimo)</b>		<b>(máxima)</b>		<b>(mínimo)</b>		<b>(máxima)</b>	
	psi	Mpa	psi	Mpa	psi	Mpa	psi	Mpa
X65	65.000	(448)	87.000	(600)	77.000	(531)	110.000	(758)

## Material de Aporte

Cada una de las tres combinaciones de metal de aporte a utilizar posee características diferentes, cuya selección y combinación se evalúan para que cumplan con las especificaciones del material, siguiendo además recomendaciones del fabricante. Dichas combinaciones se muestran a continuación en la Tabla 12. El tamaño de cada electrodo es de 3/32" (4,0 mm).

Tabla 11 - Combinaciones de Material de aporte utilizado.

<b>Fundente</b>	<b>Alambre</b>	<b>Característica</b>	<b>Fabricante</b>
<b>(Nombre Comercial/AWS)</b>	<b>(Nombre Comercial/AWS)</b>	<b>Fundente</b>	
780/F7A2	L-61/EM12K	Activo	LINCOLN
350/F7A2	K12/EM12K	Activo	ESAB
997/F8A0	L-70/EA1-G	Neutro	LINCOLN

Por su parte, la composición química de los electrodos y de cada uno de los fundentes se muestra en las Tablas 13 y 14, dichas combinaciones fueron sacadas de ESAB-11 y LINCOLN-22.

Tabla 12 - Composición química de los tres tipos de alambres.

<b>Alambre</b>	<b>AWS/ASME</b>	<b>%C</b>	<b>%Mn</b>	<b>%Si</b>	<b>%Mo</b>
L-61	EM12K	0,05-0,15	0,80-1,25	0,10-0,35	---
L-70	EA1-G	0,07-0,17	0,65-1,00	0,20	0,45-0,65
K12	EM12K	0,05-0,15	0,80-1,25	0,10-0,35	---



Tabla 13 - Composición química del fundente

<b>Fundente</b>	<b>Composición Química</b>			
ESAB 350	SiO <sub>2</sub> + TiO <sub>2</sub> = 40%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO= 20%	CaO + MgO= 25%	Fluoruros = 5%
LINCOLN 780	SiO <sub>2</sub> + TiO <sub>2</sub> < 10%	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MnO= 55%	CaO + MgO < 5%	Fluoruros = 5 %
LINCOLN 997	NO SUMINISTRADO POR EL FABRICANTE			

## Fabricación de Tuberías

Primero se realiza el diseño de junta para la soldadura por doble arco sumergido (interno-externo) de los bordes de las bobinas. El bisel se diseña como una junta a tope en V donde la cara de raíz mide 6 mm y el espesor nominal de la chapa es de 12 mm, tal como se muestra en la siguiente Figura 36.

Para un primer estudio se utilizan tres bobinas de acero API X 65. Las bobinas suministradas por SIDOR provienen de diferentes coladas, donde las bobinas uno (1) y dos (2), provienen de la colada (541529), mientras que la designada con el número tres (3) proviene de la colada (048006). Se procede a la calibración de la máquina Wilson Byard, para producir tubería con un diámetro nominal de treinta (30) pulgadas. Para esto se toman en cuenta el ancho nominal de la banda y se hace uso de la Formula para hallar el ángulo de conformación. Luego se procede a calcular la cantidad de tubos a fabricar por bobina, para esto se hace uso de la siguiente relación:

$$CT = \frac{PB}{PT}$$

Donde

$$PT = (\phi - Esp)Esp \cdot \pi \cdot Pesp \cdot 100cm \cdot LT$$

Donde

CT = Cantidad de Tubos

PB = Peso Neto de la Bobina (Kg)

PT = Peso del Tubo (Kg)

Ø = Diámetro de la Tubería (cm.)

Esp = Espesor de la Bobina (cm.)

Pesp = Peso Específico del Acero (0,00785 Kg/cm<sup>3</sup>)

LT = Longitud del Tubo (m)

Culminado el proceso de calibración se realiza la conformación de la bobina numero uno (1), donde se utiliza como material de soldadura el fundente 780 (F7A2) de carácter activo y el alambre L61 (EM12K).

Seguidamente al culminarse la primera bobina, se realiza al montaje de la segunda, donde se ejecuta el cambio de material de aporte por el fundente 350 de carácter activo (F7A2) y alambre K12 (EM12K).

Luego se procede al montaje de la ultima bobina (3), donde se ejecuta el cambio de material de aporte por el 997 (F8A0) de carácter neutro y alambre L70 (EA1-G). Los parámetros de soldadura<sup>3</sup> que se han utilizados para cada una de las combinaciones se presenta en la siguiente Tabla 15.

---

<sup>3</sup> Estos parámetros pueden ser modificados para ajustar el procedimiento.

Tabla 14 - Parámetros de Soldadura utilizados.

<b>Parámetros de Soldadura</b>							
<b>Combinación</b>	<b>Soldadura Interna</b>			<b>Soldadura Externa</b>			<b>Velocidad de Soldadura</b>
<b>Alambre Fundente</b>	<b>Voltaje V</b>	<b>Corriente A</b>	<b>Velocidad Alambre (pulg./min)</b>	<b>Voltaje V</b>	<b>Corriente A</b>	<b>Velocidad Alambre (pulg./min.)</b>	<b>Velocidad de Avance cm./min.</b>
L61(EM12K) 780 (F7A2)	33	775	65	33	830	73	65
K12(EM12K) 350 (F7A2)	33	680	54	33	760	64	65
L70 (EA1-G) 997 (F8A0)	33	758	63	33	815	70	65

Los parámetros de soldadura utilizados para cada una de las combinaciones de material de aporte, se fijan gracias al manejo de catálogos de productos utilizados para la soldadura, donde en los mismos se muestran valores referenciales de los parámetros utilizados con las diferentes combinaciones de alambre fundente en función del espesor de la junta a soldar y la velocidad de soldadura.

Sin embargo, al utilizar la información de dichos catálogos, puede que se observe diversos defectos de soldadura, por lo que pueden existir variaciones en los parámetros del proceso.

Por esta razón se implementan diversos ensayos no destructivos como ultrasonido, fluoroscopia y/o radiografía, así mismo se realiza un análisis visual donde se toman secciones transversales del cordón para verificar la calidad, forma y penetración de ambos (superior-inferior) cordones.

Después de obtener la cantidad de tubos para las primeras tres bobinas, se tomarán talones para fabricar las probetas de ensayos mecánicos de los primeros tubos de cada bobina. Se extraen talones de los extremos de cada tubo y por requerimientos de la empresa PDVSA, al tubo de la bobina 2 se adiciona un talón del centro del mismo. El esquema se muestra en la Figura 37.

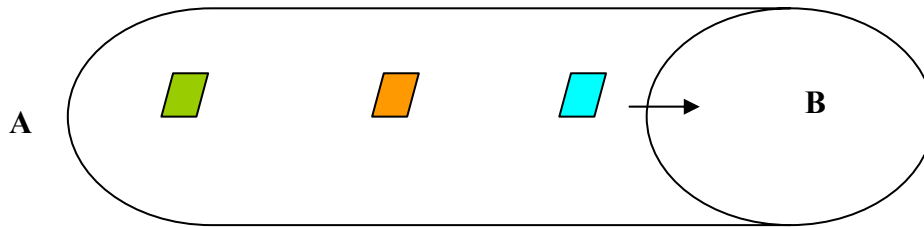


Figura 7 - Representación de cada zona de extracción de los talones en los tubos

De cada talón se extrajeron las siguientes probetas:

Tracción Metal Base: 2

Tracción Soldadura: 2

Doblado (Cara-Raíz): 2

Impacto: Cara de soldadura 3; Material Base 3; Zona Afecta por el Calor 3

Dureza: 1

Luego se procede a realizar los siguientes ensayos:

- Análisis Químico.
- Ensayos de Tracción.
- Dobleza.
- Dureza.
- Impacto.
- Metalografía.

Así para la verificación de los resultados obtenidos en el laboratorio de ensayos mecánicos de la empresa IMOSA, se realizaron una serie de pruebas en los laboratorios de Arco Metal empresa ubicada en Maracay estado Aragua. Luego de determinar la combinación de material de aporte que se ajusta tanto a los requerimientos del material X65, como a los exigencias de la empresa IMOSA Tuboacero Fabricación, se realiza el proceso de conformación de las últimas tres bobinas mostradas en la Tabla 16, donde el análisis se concentra en el estudio de las propiedades del material base.

Tabla 15 - Bobinas utilizadas en el estudio del metal base

<b>Bobinas</b>	<b>N° Bobina</b>
4	665260
5	665262
6	666119

Se toman probetas tanto del material conformado como de las bobinas sin conformar. De las bobinas 5 y 6 se toman muestras de la punta y la cola, mientras en la bobina 4 se extrae un talón adicional del centro, siendo en la punta y la cola donde se realiza el final e inicio del embobinado en los procesos de fabricación de bobinas en las acerías, mientras que del material conformado se sigue el mismo patrón utilizado para las pruebas anteriores. Se verifican los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de estas pruebas, para esto se hacen ensayos de tracción e impacto en los laboratorios de ensayos mecánicos de INTEVEP, y ensayos mecánicos de probetas tomadas de los tubos que se realizan en la empresa SIDOR.

## **Ensayos Mecánicos y Metalográficos**

### **Corte de Probetas**

El corte del tubo, para la preparación de las probetas para ensayos mecánicos y metalográficos, se ha efectuado de acuerdo al trazado de la Figura 39. A esta probeta tomada del tubo se le denomina talón, cuyas medidas son de 450 mm x 400 mm. De dicho talón se sacan las probetas necesarias para los ensayos. En la Figura 38 se tiene el talón de soldadura.

Las probetas de tracción, impacto, doblado y dureza se toman del talón como la muestra la siguiente Figura 40. Cabe destacar que la probeta de dureza es luego utilizada para análisis químico y metalografía.

Para el estudio del metal base, además de tomar las probetas de la forma acostumbrada por la empresa, para los ensayos de tracción se han fabricado probetas tomadas de talones cortados tanto en el sentido longitudinal, paralelo, a la laminación como en el sentido transversal (90°) con respecto al eje de la tubería.

También se ha tomado probetas de las bobinas antes del conformado, tanto en sentido longitudinal como transversal a la laminación de la bobina. Las Figuras 41 y 42 muestran la forma de tomar las muestras.

### ***Ensayo de Tracción***

Se realizan probetas de acuerdo a las normas ASTM A370 y API Spec 5L, según la Figura 43, para el cordón de soldadura y el metal base y las mismas se han ensayado en una máquina marca: MOHR & FEDERHAFFFAG con un rango carga de 0 a 60000 kg.

### ***Ensayo Charpy***

Se realiza el ensayo en una máquina marca: TINIUS OLSEN WILLOW GROVE. CARGA: 0 – 264 Libras/Pies, sobre probetas elaboradas de acuerdo a la norma ASTM A370, Métodos y Definiciones de Ensayos Mecánicos para Productos de Acero, con medidas Sub-Standard como se muestra en la Figura 44. A su vez, en la Tabla 17, se ve los valores referenciados en las normas, tanto el valor promedio como el individual.

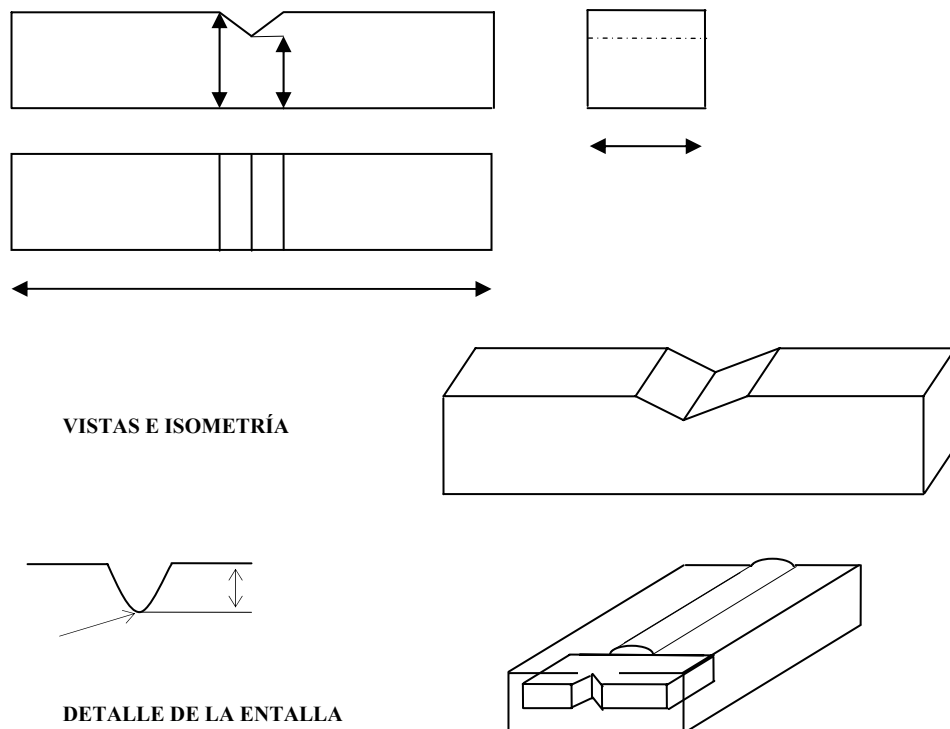


DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE LA POSICIÓN RELATIVA DE LA PROBETA

Figura 8 - Probeta Charpy. Los dibujos no están a escala, las medidas son las referenciadas en la norma

Tabla 16 - Valores de referencia utilizados en la empresa

Dimensiones de Probeta (mm)	Material Base					Centro de Soldadura										
	V. Individual		V. Promedio			V. Individual		V. Promedio								
10 x 10 x 55	22	Lb-Ft	30	J	30	Lb-Ft	41	J	17	Lb-Ft	23	J	22	Lb-Ft	30	J
7,5 x 10 x 55	16,5	Lb-Ft	22	J	23	Lb-Ft	31	J	12,8	Lb-Ft	17	J	17	Lb-Ft	22	J
6,7 x 10 x 55	14,7	Lb-Ft	20	J	20,1	Lb-Ft	27	J	11,4	Lb-Ft	15	J	14,7	Lb-Ft	20	J



## Ensayo de Dureza

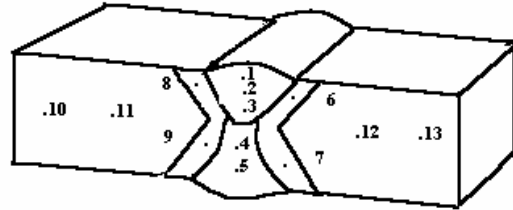


Figura 9 - Representación de los puntos donde se aplica la carga

El ensayo de dureza se realiza sobre la superficie de un corte transversal de la soldadura previamente desbastado y pulido. En este ensayo se ha efectuado un barrido de dureza en la probeta. Cada barrido consta de 13 registros, avanzando desde el cordón de soldadura externa, bajando al interno, para luego indentar en el metal base a la izquierda del cordón, finalizando en la zona a la derecha del cordón del mismo metal base, un diagrama representativo puede verse en la Figura 45. La escala utilizada fue Vickers con una carga de 30 Kg. durante un tiempo de 10 seg. El equipo utilizado es un durómetro, marca OTTO WOLPERT- WERKE con capacidad de carga entre B0 –B90, Vickers, Rockwell: 0 – 100, con un penetrador piramidal. Esto de acuerdo a la Especificación Spec. 1010-90-T01-ESP-021 Rev. 1 Pto. 4,5 IMOSA-GEAC-6-18 de la empresa, siguiendo las pautas de la especificación de PDVSA EM-18-00/03 Rev. 1Pto. 4,2.2.

Tabla 17 - Valores de dureza basados en la norma o referencia.

Material	Centro de Soldadura.	Zona Afectada por el Calor
Base.		
250 HV30	250 HV30	250 HV30

### ***Ensayo de Doblado***

En soldadura se exige un ángulo de doblado de 180°. Se deben obtener cuatro probetas a las que se aplique la carga, dos por la superficie interna (probeta de raíz) y dos por la superficie externa (probeta de cara). No se permite ningún agrietamiento. La localización de las muestras para la prueba debe ser igual a la utilizada para calificar el proceso de la soldadura

### ***Análisis Químico y Metalográfico***

Utilizando la probeta del ensayo de dureza, se procede al desbaste grueso de una de las caras, la serie de lijas utilizadas fue 80-150-250-400-500-600-1200, luego se procede al pulido comenzando con la lona y alúmina 1  $\mu\text{m}$ , luego el paño billard color verde con alúmina 0,3  $\mu\text{m}$  y para alcanzar una imagen especular de la cara utilizando un paño de billard color rojo con alúmina 0,05  $\mu\text{m}$ . Para este trabajo se han utilizado las instalaciones del Laboratorio de Metalografía de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Los Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Se realiza un ataque con Nital al 3%, el cual ha revelado de manera satisfactoria las macro y microestructuras.

El análisis químico al metal base ha sido realizado por el SIDOR, antes de despachar la bobina, además se enviaron 3 probetas de dureza a la empresa CONDUVEN, donde se utilizó el método de absorción química para re-certificar los valores suministrados por SIDOR.

## CAPITULO III

### RESULTADOS

#### Calibración

#### Cálculo del Ángulo de Conformación

$$\begin{aligned} \cos \phi &= \frac{Ab}{\pi \cdot D} = \frac{990mm}{\pi \cdot 762mm} = \\ \phi &= 65,57 = 66^\circ \end{aligned}$$

Tabla 18 - Parámetros de Calibración para la Fabricación de Tuberías de 30'' de diámetro.

<b>Parámetros de Calibración</b>	
<i>Díámetro de Tubería</i>	30''
<i>Ángulo de Máquina</i>	66°
<i>Ancho Nominal de Banda</i>	990 mm

#### Cantidad de Tubos a Fabricar

Se calcula de acuerdo al peso de cada bobina con la siguiente formula

$$PT = (\phi - Esp)Esp \cdot \pi \cdot Pesp \cdot 100cm \cdot LT$$

$$PT = (76,2cm - 0,953cm)0,953cm \cdot \pi \cdot 0,00785 \frac{Kg}{cm^3} \cdot 100cm \cdot 12m$$

$$PT = 2122,18Kg$$

$$CT = \frac{17990Kg}{2122,18Kg} = 8,4$$

Para tres bobinas, se alcanza la cantidad de 22 Tubos, tomando en cuenta un 10 % de pérdidas de material, cantidad que es mayor a los 18 Tubos requeridos.

## **Estudio de las Propiedades Mecánicas de Tubos de Acero API 5L X65**

### **Cálculo del Ángulo de Conformación**

$$\cos \phi = \frac{Ab}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \text{ mm}}{\pi \cdot 762 \text{ mm}} = 0,4177$$

$$\phi = \arccos(0,4177)$$

$$\phi = 65,31^\circ \approx 65^\circ$$

Tabla 19 - Parámetros de Calibración para la fabricación de tuberías de 30" de diámetro

<b>Parámetros de Calibración</b>	
<i>Diámetro de Tubería</i>	30"
<i>Ángulo de Conformación</i>	65°
<i>Ancho Nominal de Banda</i>	1000 mm

### **Cantidad de Tubos a Fabricar**

Se calcula de acuerdo al peso de cada bobina con la siguiente formula, tomando en cuenta un 10 % de pérdidas de material.

$$PT = (\phi - Esp)Esp \cdot \pi \cdot Pesp \cdot 100cm \cdot LT$$

$$PT = (76,2cm - 1,191cm)1,191cm \cdot \pi \cdot 0,00785 \frac{Kg}{cm^3} \cdot 100cm \cdot 12m$$












$$PT = 2663,44Kg$$

$$CT = \frac{16892Kg}{2663,44Kg} = 6,34$$

Tabla 20 -Descripción de la Materia Prima y Cantidad de Tubos Producidos por Bobina Conformada

<b>Bobina</b>	<b>Ancho</b>	<b>Peso</b>	<b>Espesor</b>	<b>Longitud</b>	<b>Peso</b>	<b>Cantidad de</b>
<b>Nro</b>	<b>(mm)</b>	<b>Neto (PB) (Kg)</b>	<b>(mm)</b>	<b>Tubo (m)</b>	<b>Tubo (PT)</b>	<b>Tubos (CT)</b>
631579	1050,0	16892	11,91	12	2663,44	6
622517	1050,0	15813	11,91	12	2663,44	5
607192	1050,0	15550	11,91	12	2663,44	5
665260	1050,0	16221	11,91	12	2663,44	6
665262	1050,0	15682	11,91	12	2663,44	5
666119	1050,0	16085	11,91	12	2663,44	5
<b>TOTAL</b>						32

Tomando en cuenta que para la conformación de la máquina se utiliza un tubo de la primera bobina, el cual no se contabiliza en la cantidad de tubos finales y además, se ha conformado dos veces ya que el estudio se realiza en dos partes, por lo que la cantidad de tubos a fabricar es 30. A continuación se representa el número de tubo y la zona de donde se extraen los cupones de pruebas (se utiliza como ayuda de referencia el Gráfico 37).

Tubo N° 2 y 3:	(Bobina 1)	
Tubo N°7:	(Bobina 2)	
Tubo N°13:	(Bobina 3)	  
Tubo N° 17	(Bobina 4)	 
Tubo N° 23	(Bobina 5)	 
Tubo N° 29	(Bobina 6)	 

Con la primera combinación se fabrican 5 tubos, mientras que con la combinación de fundente 350 de carácter activo (F7A2) y alambre K12 (EM12K) se logran producir un número de seis (6) tubos mientras que con la combinación de fundente 997 (F8A0) de carácter neutro y alambre L70 (EA1-G), se alcanza la producción de cinco (5) tubos.

Seguidamente se muestra el registro de números de tubos por bobina y combinación alambre fundente.

Tabla 21 - Combinaciones Utilizadas en el Estudio de los Materiales de Aporte.

Bobina	Combinación Alambre (Comercial/AWS); Fundente (Comercial/AWS)	N° Tubos
1	L-61/EM12K ; 780/F7A2	1,2,3,4,5
2	K12/EM12K ; 350/F7A2	6,7,8,9,10,11
3	L-70/EA1-G ; 997/F8A0	12,13,14,15,16

### **Bobina 1, Fundente 780 (F7A2)/Alambre L61 (EM12K) Lincoln**

#### **Aporte Calórico**

De acuerdo a la formula se calcula el aporte calórico para los parámetros finales

$$EBA = \frac{U \times I \times 60s}{v}$$

SI

$$EBA = \frac{33v \cdot 775A \cdot 60s}{65cm / min} = 23.607,69J / cm = 23,61KJ / cm$$

Tabla 22 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°1

Soldadura	Combinación	Voltaje (V)	Corriente (I)	Velocidad Avance (cm./min.)	EBA (KJ/cm.)
Interna	L61 (EM12K) 780 (F7A2)	33	775	65	23,6076
Externa	L61 (EM12K) 780 (F7A2)	33	830	65	25,2831

#### **Ensayo de Tracción**

Tabla 23 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N° 2

Numero de Tubo (Extremo del Tubo)	Combinación	Esfuerzo (Psi)	
		Esfuerzo Máximo $\sigma_{UTS}$	$\sigma_{UTS}$ Prom
2	Fundente 780 ; Alambre L 61	85.120,92	84.879,18
2	Fundente 780 ; Alambre L 61	84.637,44	

## Ensayo de Impacto

Tabla 24 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°2

Ensayo de Impacto Charpy – V (Lbx Ft) Dimen. 7,5x10x55 mm. Temp. 0 °C												
Numero de Tubo	Centro de Soldadura				ZAC				Material Base			
	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom
2	50	24	43	39	108	118	115	114	93	76	91	87

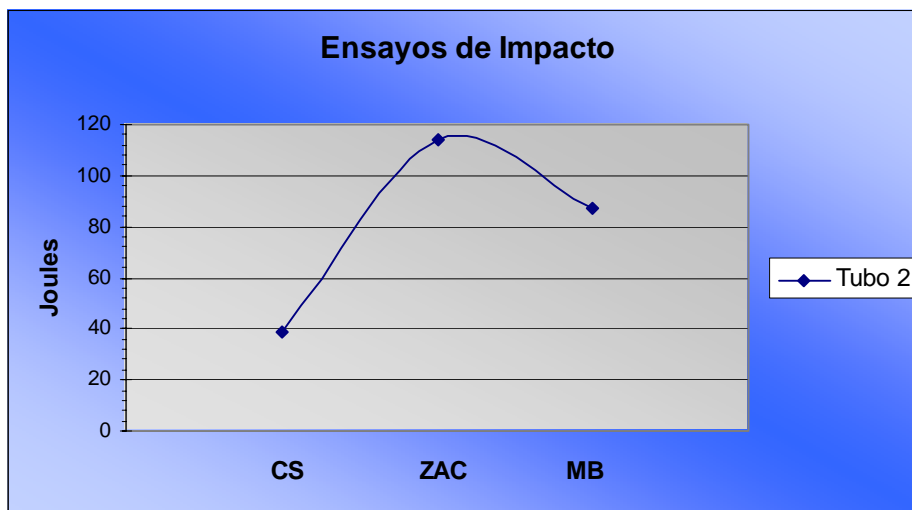


Figura 10 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 2.

## Ensayo de Dureza

Tabla 25 -Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 2

Ensayo de Dureza HV 30													
Numero de Tubo	Centro de Soldadura					Z.A.C.				Material Base			
	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7	Pos 8	Pos 9	Pos 10	Pos 11	Pos 12	Pos 13
2	223	206	214	214	214	198	177	198	177	171	171	171	165

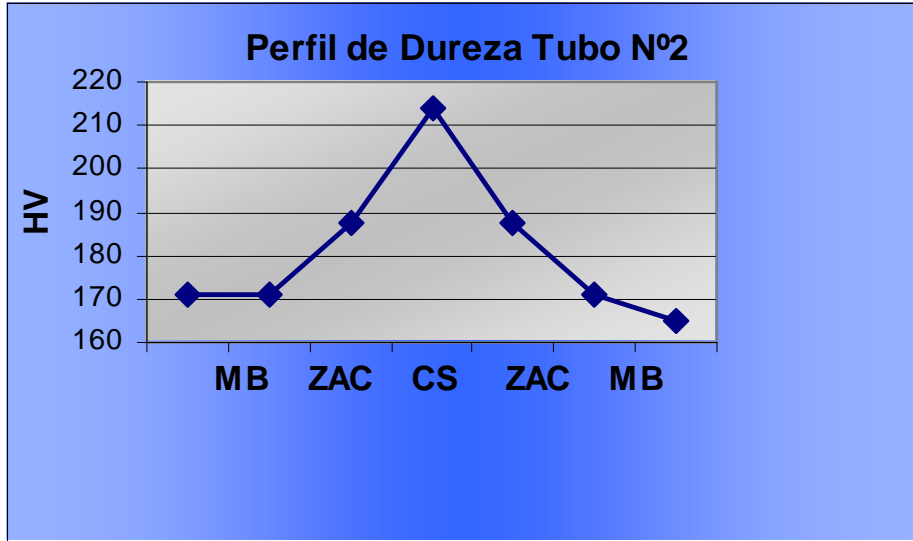


Figura 11 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 2

## Ensayo de Doblez

Tabla 26 - Resultados del Ensayo de Doblez Realizado al Tubo N° 2

<b>Tubo</b>	<b>Doblado De Cara</b>	<b>Doblado De Raíz</b>
2	OK	OK
2	OK	OK



## Bobina 2, Fundente 350 (F7A2)/Alambre K12 (EM12K) ESAB

### Aporte Calórico

Tabla 27 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°2

Soldadura	Combinación	Voltaje (V)	Corriente (I)	Velocidad (cm./min.)	EBA (KJ/cm.)
Interna	K12 (EM12K) 350 (F7A2)	33	680	65	20,714
Externa	K12 (EM12K) 350 (F7A2)	33	760	65	23,151

### Ensayo de Tracción

Tabla 28 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N°7

Numero de Tubo (Extremo del Tubo)	Combinación	Esfuerzo Rotura (Psi)	
		Esfuerzo Máximo $\sigma_{UTS}$	$\sigma_{UTS}$ Prom
7	Fundente 350 ; Alambre K12	94.676,76	94.740,75
7	Fundente 350 ; Alambre K12	94.804,74	

### Ensayo de Impacto

Tabla 29 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°7

Ensayo de Impacto Charpy – V (Lbx Ft) Dimen. 7,5x10x55 mm. Temp. 0 °C												
Numero de Tubo	Centro de Soldadura				Z.A.C.				Material Base			
	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom
7	21	10	18	16	114	102	114	110	153	160	162	158

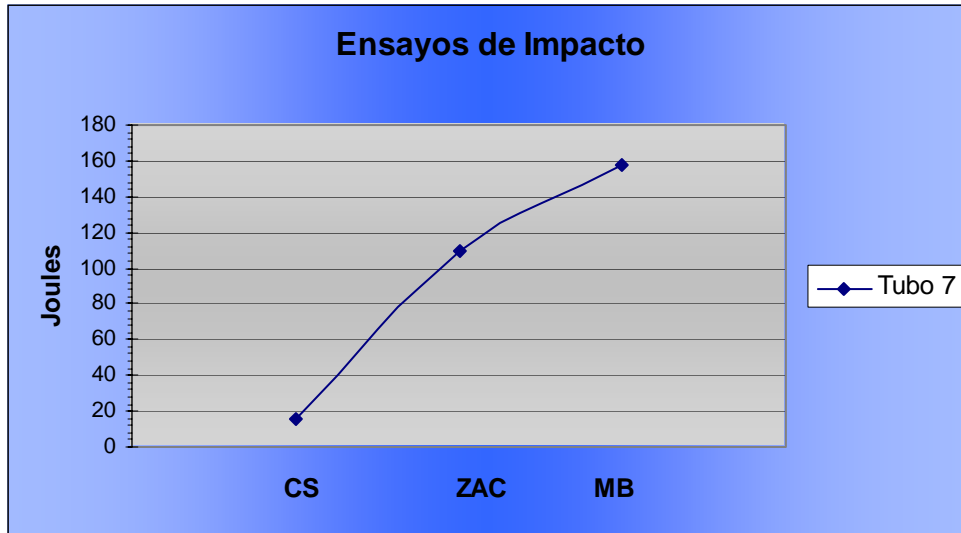


Figura 12 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 7

## Ensayos de Dureza

Tabla 30 - Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 7

Ensayo de Dureza HV 30													
Numero de Tubo	Centro de Soldadura					Z.A.C.				Material Base			
	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7	Pos 8	Pos 9	Pos 10	Pos 11	Pos 12	Pos 13
7	223	223	206	214	214	214	206	206	191	184	184	181	184

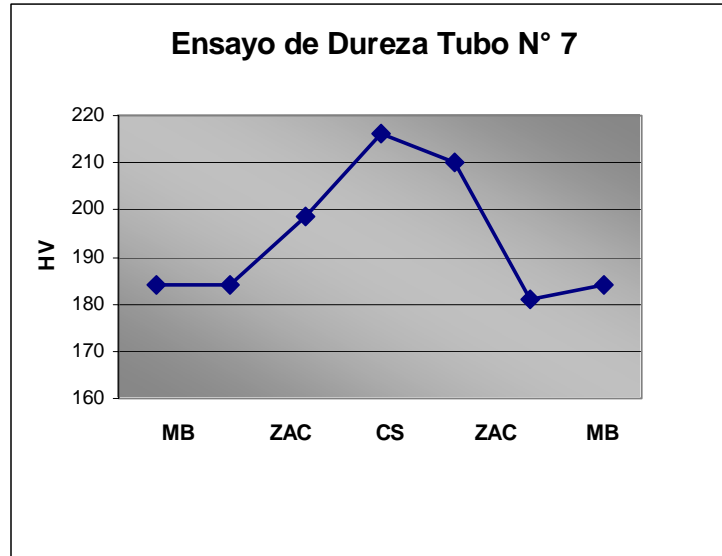


Figura 13 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 7

## Ensayo de Doblez

Tabla 31 - Resultados del Ensayo de Doblez Realizado al Tubo N° 7

Tubo	Doblado De Cara	Doblado De Raíz
7	OK	OK
7	OK	OK

## Bobina 3, Fundente 997 (F7A2)/Alambre L-70 (EM12K) Lincoln

### Aporte Calórico

Tabla 32 - Parámetros de Soldadura y Aporte calórico Utilizados en la Bobina N°3

Soldadura	Combinación	Voltaje (V)	Corriente (I)	Velocidad (cm./min.)	EBA (KJ/cm.)
Interna	L70 (EA1-G) 997 (F8A0)	33	758	65	23,089
Externa	L70 (EA1-G) 997 (F8A0)	33	815	65	24,826

## Ensayo de Tracción

Tabla 33 - Resultados del Ensayo de Tracción del Tubo N°13

Numero de Tubo (Extremo del Tubo)	Combinación	Esfuerzo (Psi)	Esfuerzo Máximo $\sigma_{UTS}$ Prom	
			$\sigma_{UTS}$	Prom
13 (EST)	Fundente 997 ; Alambre L70	85.789,26		86.872,35
13 (EST)	Fundente 997 ; Alambre L70	86.215,86		
13 (CEN)	Fundente 997 ; Alambre L70	86.713,56		
13 (CEN)	Fundente 997 ; Alambre L70	89.358,48		
13 (OPU)	Fundente 997 ; Alambre L70	85.931,46		
13 (OPU)	Fundente 997 ; Alambre L70	87.225,48		

## Ensayo de Impacto

Tabla 34 - Resultados del Ensayo de Impacto del Tubo N°13

Ensayo de Impacto Charpy – V (Lbx Ft) Dimen. 7,5x10x55 mm. Temp. 0 °C												
Numero de Tubo	Centro de Soldadura				Z.A.C.				Material Base			
	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom	N°1	N°2	N°3	Prom
13 (EST)	22	33	27	27	120	129	118	122	96	104	108	103
13 (CEN)	18	22	22	21	133	124	136	131	89	62	94	82
13 (OPU)	28	33	15	25	131	132	130	131	149	140	160	150

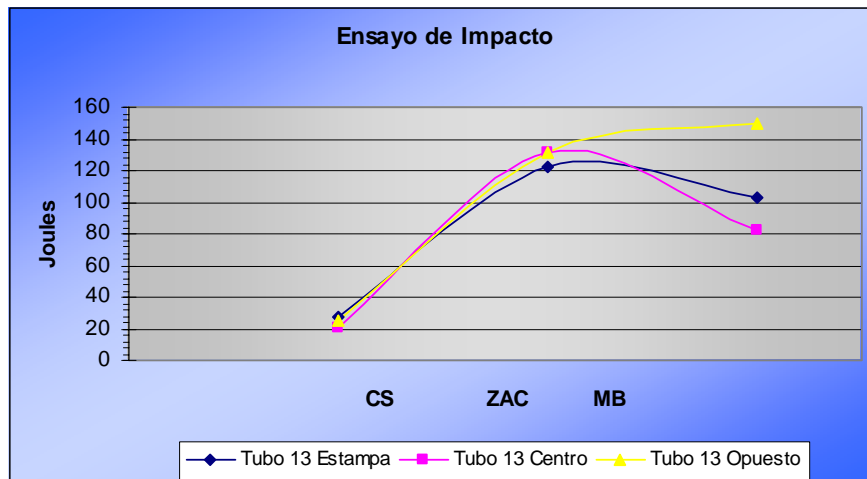


Figura 14 - Resultado del Ensayo de Impacto Realizado al Tubo N° 13

## Ensayos de Dureza

Tabla 35 - Resultados del Ensayo de Dureza Realizado al Tubo N° 13

Ensayo de Dureza HV 30													
Numero de Tubo	Centro de Soldadura					Z.A.C.				Material Base			
	Pos 1	Pos 2	Pos 3	Pos 4	Pos 5	Pos 6	Pos 7	Pos 8	Pos 9	Pos 10	Pos 11	Pos 12	Pos 13
13 (EST)	214	214	223	232	232	206	214	206	184	177	177	181	177
13 (CEN)	223	214	206	223	232	202	202	206	206	171	171	171	171
13 (CEN)	214	214	214	223	223	184	202	191	202	177	177	177	184

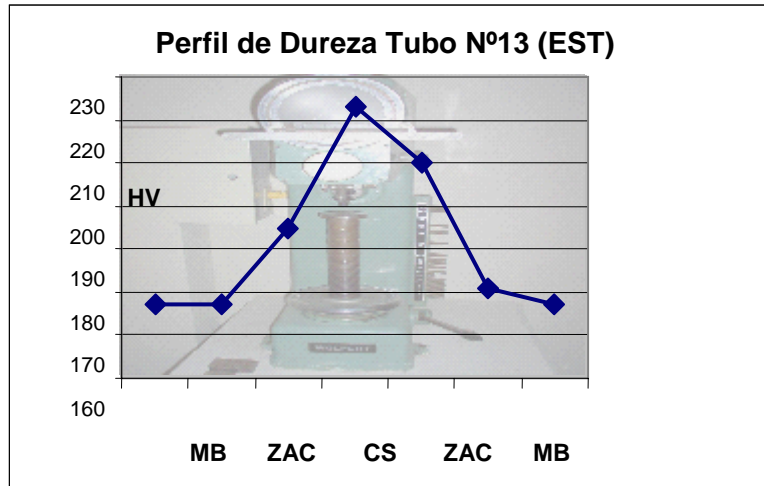


Figura 15 - Perfil de Dureza Tubo N° 13

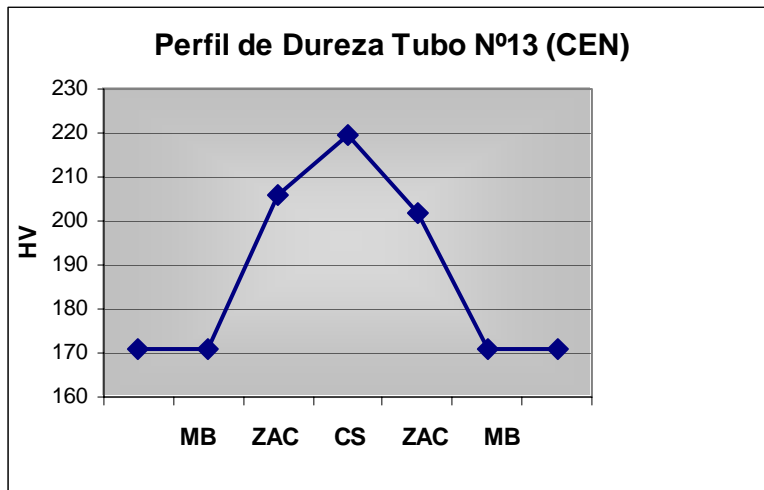


Figura 16 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado en el Centro del Tubo N° 13

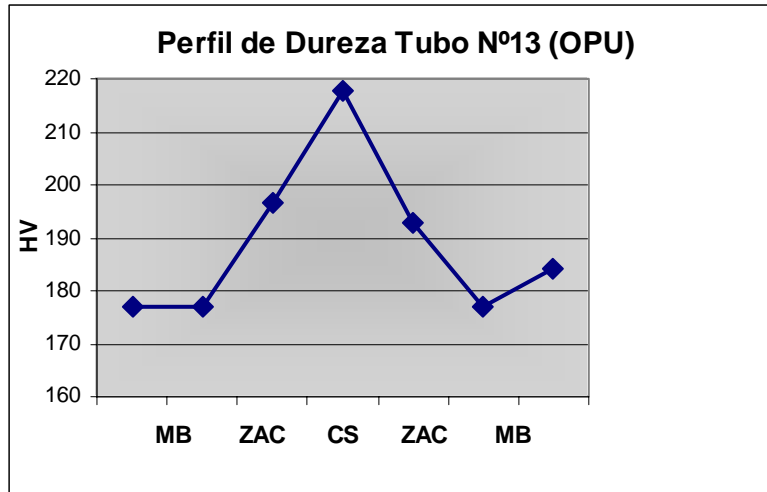


Figura 17 - Representación del Ensayo de Dureza Realizado en el opuesto del Tubo N° 13

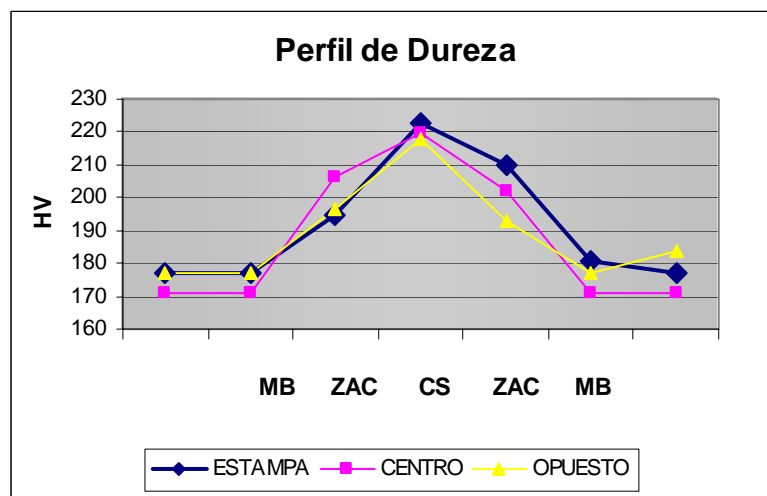


Figura 18 - Representación del Ensayo de Dureza del Tubo N° 13

## Ensayo de Doblez

Tabla 36 - Resultados del Ensayo de Doblez Realizado al Tubo N° 13

<b>Tubo</b>	<b>Doblado De Cara</b>	<b>Doblado De Raíz</b>
13 (EST)	OK	OK
13 (EST)	OK	OK
13 (CEN)	OK	OK
13 (CEN)	OK	OK
13 (OPU)	OK	FALLÓ
13 (OPU)	OK	OK

## Gráficas Combinadas

### Ensayo de Tracción

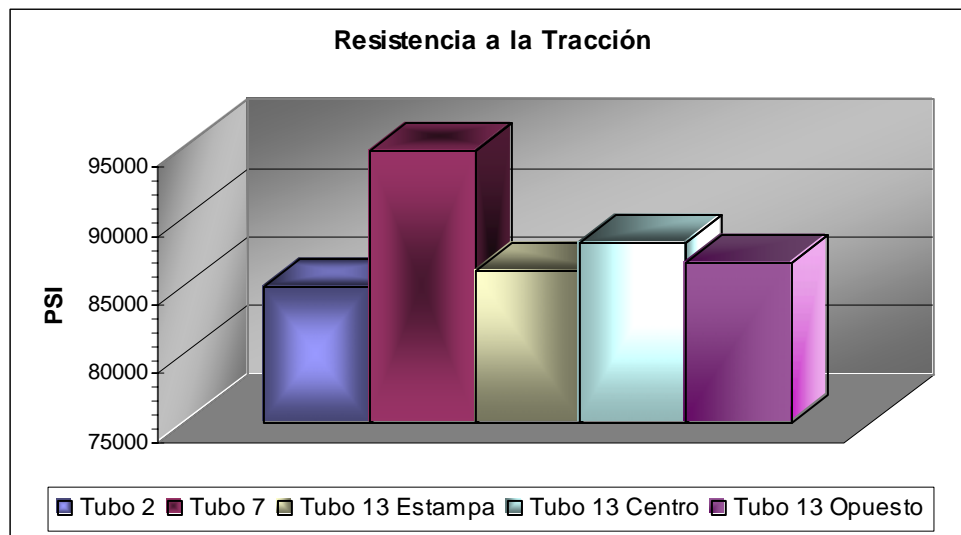


Figura 19 - Resultados Máxima a la Tracción de los Tubos N° 2,7, 13.



## Ensayo de Impacto

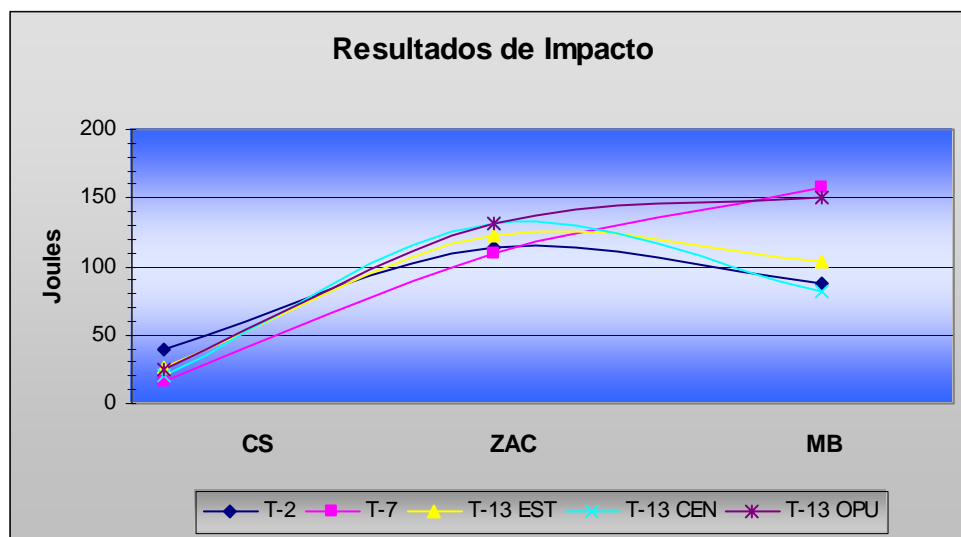


Figura 20 - Resultados de Impacto en bobinas 1,2 y 3.

## Metal Base

### Análisis Químico

El análisis químico se ha realizado en los laboratorios de control de calidad de la empresa CONDUVEN ubicada en la Victoria estado Aragua. De esta forma se comparan los valores reportados por la acería (SIDOR). Dichos resultados se muestran en la Tabla 38.

Tabla 37 - Análisis Químico Material Base

Composición Química Material Base. (SIDOR)															
Colada	Esp.	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Cu	Ti	B	Mo	Cr	Ni
048006	Bob	0.11	1.21	.009	.002	0.214	0.034	0.036	0.041	0.03	----	----	0.001	----	0.014
541529	Bob	0.11	1.25	0.01	.001	0.220	0.031	0.062	0.046	.006	0.013	.0003	0.001	0.023	0.005
048006	Col	0.11	1.22	0.01	.003	0.215	0.034	0.04	0.044	.031	----	----	0.003	----	0.013

541529	Col	0.12	1.24	.009	.001	0.225	0.035	0.056	0.045	.005	0.013	.0002	0.001	0.009	0.004
<b>Composición Química Material Base. (CONDUVEN)</b>															
Colada	N°	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	V	Cu	Ti	B	Mo	Cr	Ni
	Bob														
541529	1	0.08	1.29	0.01	0.001	0.24	0.038	0.029	0.053	0.02	0.001	0.003	0.011	0.001	0.089
541529	2	0.09	1.29	0.01	0.01	0.24	0.04	0.029	0.05	0.02	0.001	0.001	0.007	0.001	0.087
048006	3	0.09	1.26	0.01	0.01	0.24	0.042	0.023	0.044	0.03	0.001	0.001	0.005	0.001	0.09

Donde:

Bob: Análisis realizado al producto, en este caso bobinas de acero.

Col: Análisis realizado a la colada.

De acuerdo a lo estipulado en el marco teórico, el carbono equivalente se calcula con la siguiente fórmula

$$CE(Pcm) = 0,12 + \frac{0,215}{30} + \frac{1,22}{20} + \frac{0,03}{20} + \frac{0,087}{60} + \frac{0,001}{20} + \frac{0,007}{15} + \frac{0,05}{10} + 5(0,001)$$

$$CE(Pcm) = 0,20$$

A continuación, se observa la nomenclatura utilizada para denominar las probetas de ensayo a utilizar.

**Legendas:**

- B4 (PL): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado punta.
- B4 (PT): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado punta.
- B4 (ML): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado medio.
- B4 (MT): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado medio.
- B4 (CT): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado cola.
- B4 (CL): Bobina N° 665260, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado cola.
- Sold 17-A: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 17 (Primer Tubo de la Bobina N° 665260), extremo A.
- MB 17-A: Probeta ensayada al material base del tubo N° 17 (Primer Tubo de la Bobina N° 665260), extremo A.
- Sold 17-B: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 17 (Primer Tubo de la Bobina N° 665260), extremo B.
- MB 17-B: Probeta ensayada al material base del tubo N° 17 (Primer Tubo de la Bobina N° 665260), extremo B.
- B5 (PL): Bobina N° 665262-G, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado punta.
- B5 (PT): Bobina N° 665262-G, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado punta.
- B5 (CT): Bobina N° 665262-G, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado cola.
- B5 (CL): Bobina N° 665262-G, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado cola.

Sold 29-A: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 29 (Primer Tubo de la Bobina N° 665262-G), extremo A.  
MB 29-A: Probeta ensayada al material base del tubo N° 29 (Primer Tubo de la Bobina N° 665262-G), extremo A.  
Sold 29-B: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 29 (Primer Tubo de la Bobina N° 665262-G), extremo B.  
MB 29-B: Probeta ensayada al material base del tubo N° 29 (Primer Tubo de la Bobina N° 665262-G), extremo B.  
B6 (PL): Bobina N° 666119, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado punta.  
B6 (PT): Bobina N° 666119, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado punta.  
B6 (CT): Bobina N° 666119, Probeta ensayada en sentido transversal al de laminación de la bobina lado cola.  
B6 (CL): Bobina N° 666119, Probeta ensayada en sentido paralelo al de laminación de la bobina lado cola.  
Sold 23-A: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 23 (Primer Tubo de la Bobina N° 666119), extremo A.  
MB 23-A: Probeta ensayada al material base del tubo N° 23 (Primer Tubo de la Bobina N° 666119), extremo A.  
Sold 23-B: Probeta ensayada a la soldadura del tubo N° 23 (Primer Tubo de la Bobina N° 666119), extremo B.  
MB 23-B: Probeta ensayada al material base del tubo N° 23 (Primer Tubo de la Bobina N° 666119), extremo B.

## Ensayo de Tracción

Los resultados de los ensayos de tracción para el metal base se muestran en las Tablas 39 y 40.

Tabla 38 - Resultado de Ensayos de Tracción de las bobinas 1,2 y 3

Probeta	Bobina Nro	Tubo Número	Resistencia	
			(Psi)	
			Fluencia	Tracción
B1	541529	2	61.316,64	75.437,10
B1	541529	2	60.918,48	75.892,14
B1	541529	3	58.629,06	75.152,70
B1	541529	3	58.940,90	75.067,38
B2	541529	7	66.037,68	85.604,40
B2	541529	7	70.701,84	87.239,70
B2	541529	7	65.326,68	83.855,34
B3	48006	13 (Estampa)	62.852,40	80.300,34
B3	48006	13 (Estampa)	58.998,78	80.215,02
B3	48006	13 (Centro)	66.549,60	80.044,38
B3	48006	13 (Centro)	65.682,18	79.973,28
B3	48006	13 (Opuesto)	63.606,06	79.205,40
B3	48006	13 (Opuesto)	62.553,78	79.105,86

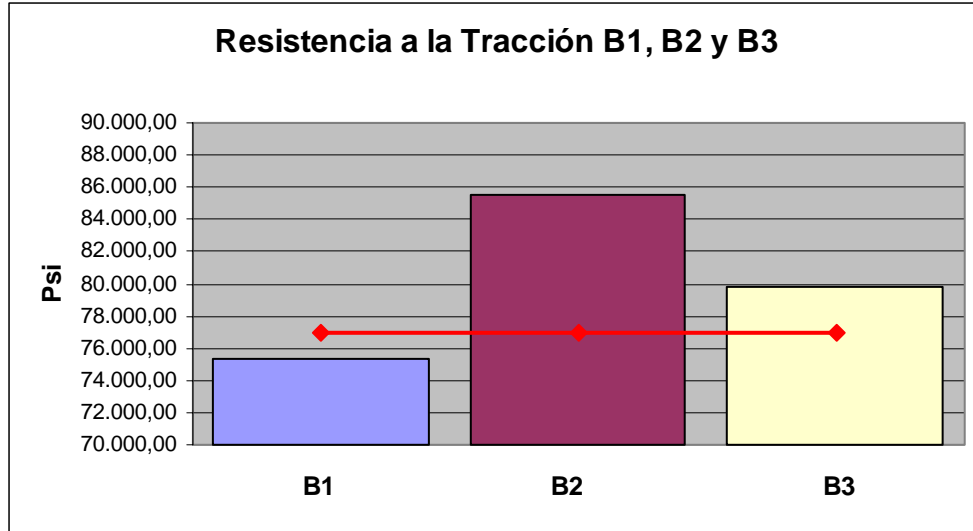


Figura 21 - Comparación de los valores de rotura con los requeridos por la norma API 5L

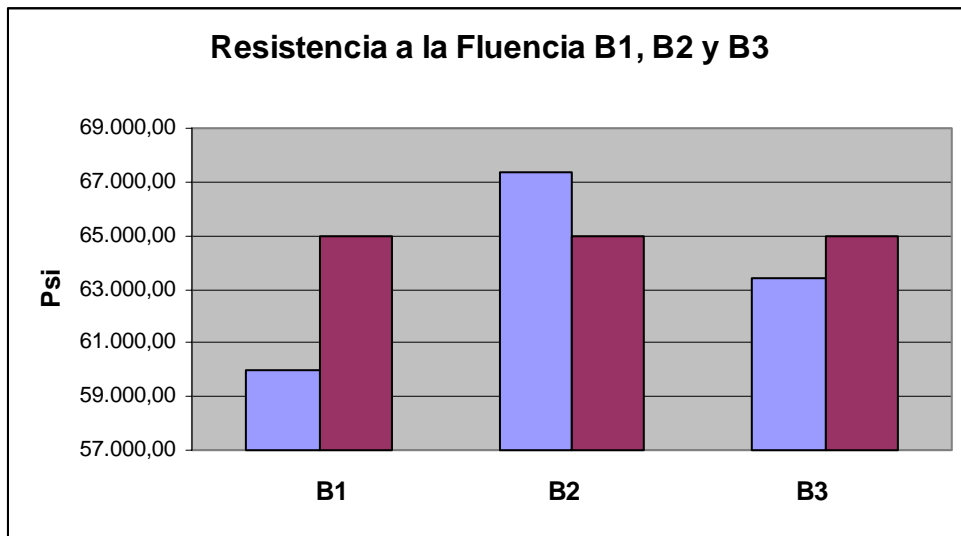


Figura 22 - Comparación de los Niveles de Fluencia con los requeridos por la norma API 5L

Tabla 39 - Resultado de Ensayos de Tracción de las bobinas 4,5 y 6

PROBETA	BOBINA	Resistencia	Resistencia	ALARG	% DE
		Fluencia	Tracción	mm	ALARG
		PSI	PSI		En Base a 2"
B4 (PL)	665260	75636,72	92537,46	69,95	37,7
B4 (PT)	665260	83491,98	97148,87	69,6	37,01
B4 (ML)	665260	71124,96	89140,97	69,9	37,6
B4 (MT)	665260	76053,48	89906,12	70,05	37,89
B4 (CT)	665260	75125,25	95111,57	68	33,86
B4 (CL)	665260	73081,58	91886	70,45	38,68
MB 17-A	665260	71922,63	89385,43	71,1	39,96
MB 17-B	665260	69888,87	87506,16	69,75	37,3
B5 (PL)	665262-G	72039,9	89934,12	70,2	38,19
B5 (PT)	665262-G	77260,63	91026,46	70	37,8
B5 (CT)	665262-G	75319,13	91935,76	69,2	36,22
B5 (CL)	665262-G	72968,37	90934,56	70,2	38,19
MB 29-A	665262-G	71126,7	87064,94	71,2	40,16
MB 29-B	665262-G	77644,56	91435,02	69,95	37,7
B6 (PL)	666119	77433,12	92202,35	70,55	38,88
B6 (PT)	666119	82186,78	96056,92	69,05	35,93
B6 (CT)	666119	70260,72	89036,3	69,5	36,81
B6 (CL)	666119	66099,24	86747,76	70,5	38,78
MB 23-A	666119	71981,18	88338,09	69,35	36,52

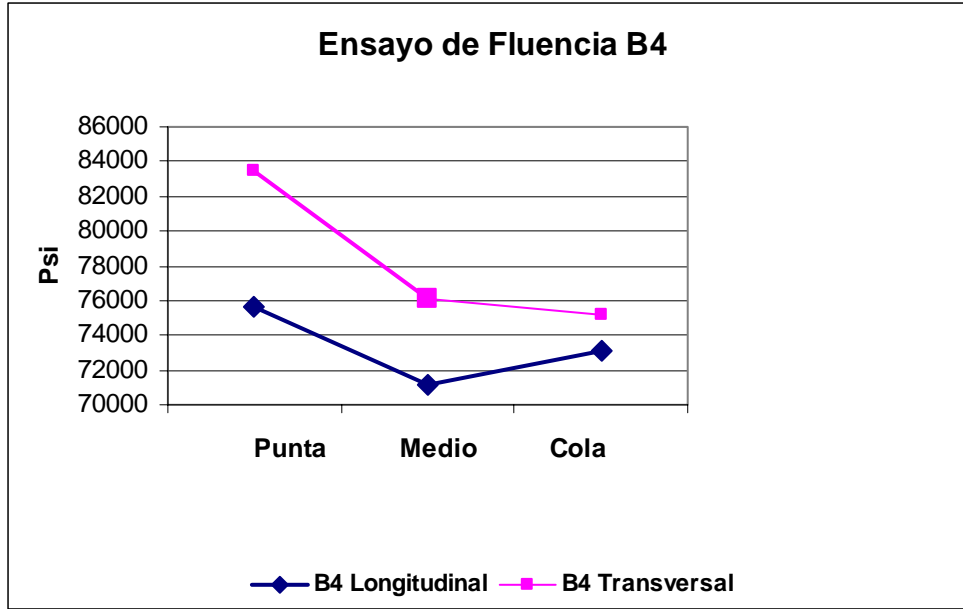


Figura 23 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 4

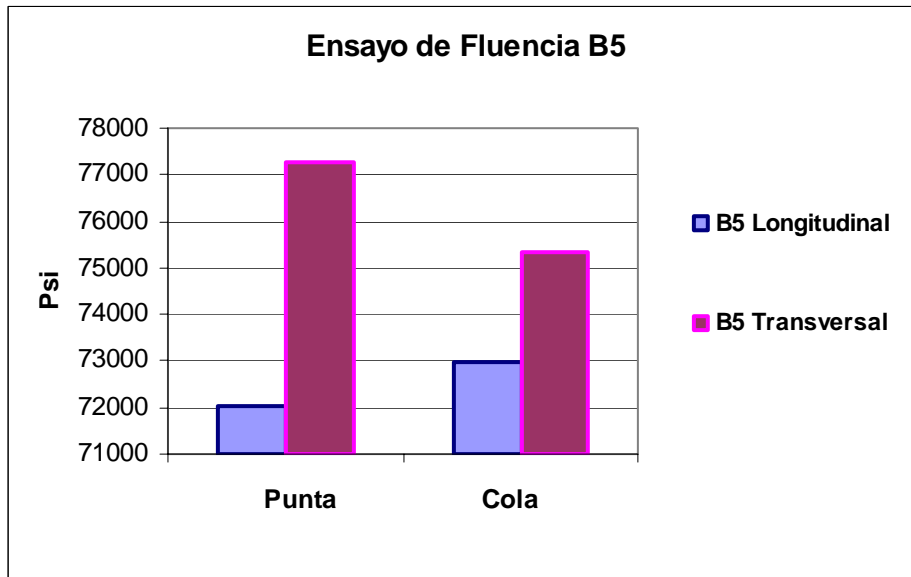


Figura 24 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 5

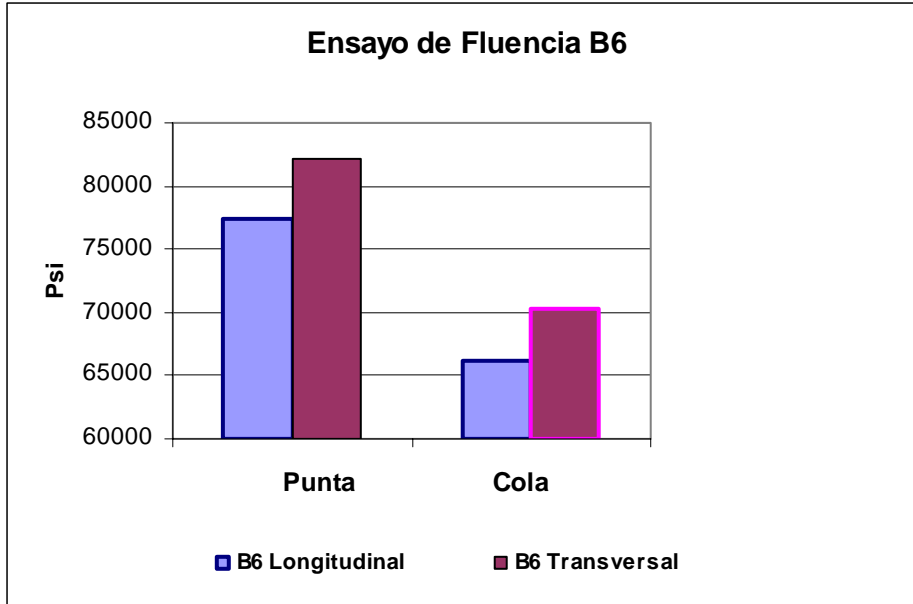


Figura 25 - Resultados de Fluencia Tomando las Probetas en zonas y Sentidos Diferentes de la Bobina N° 6

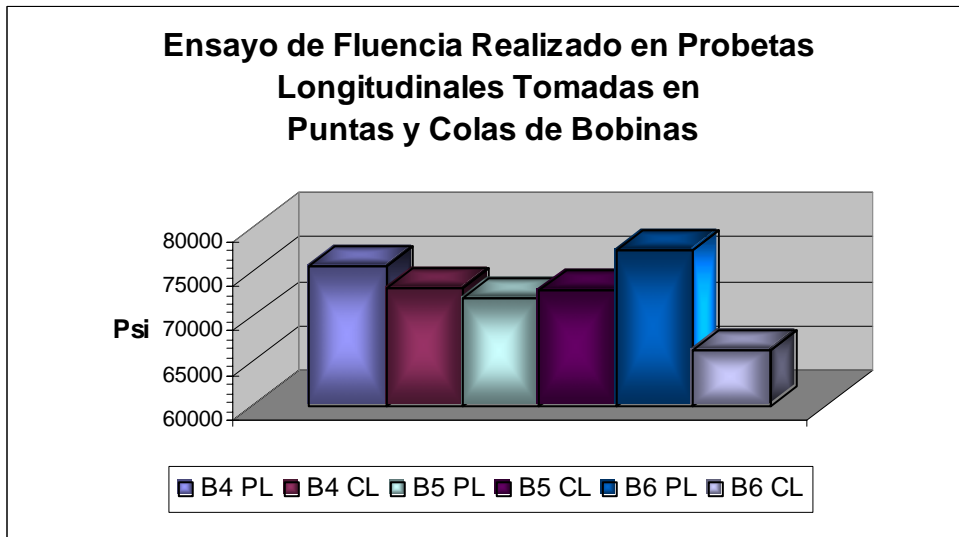


Figura 26 - Comparación de los Resultados de Fluencia en sentido longitudinal de las Bobinas 4,5 y6



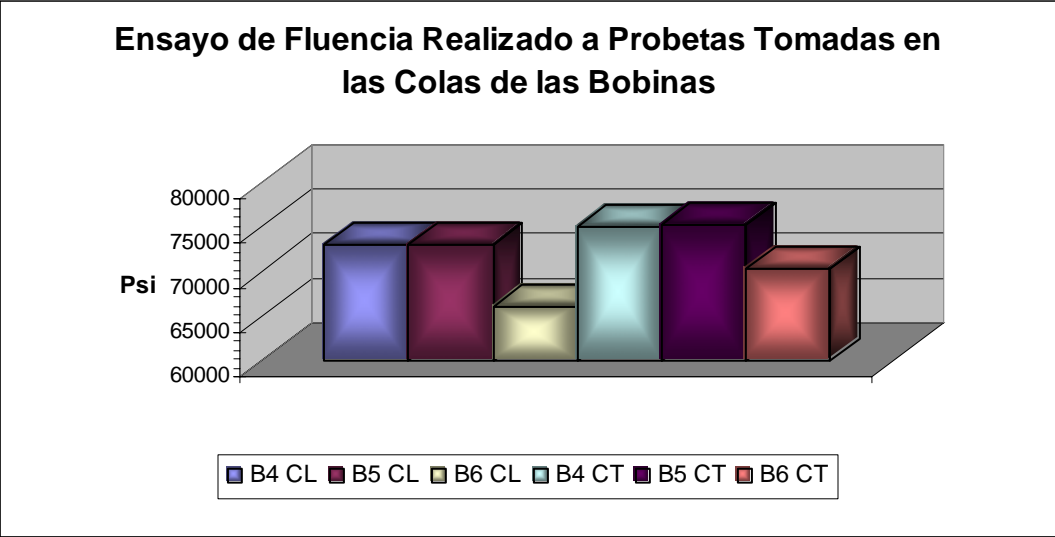


Figura 27 - Resultados de Fluencia en Sentido Longitudinal y Transversal de las Bobinas 4,5 y 6

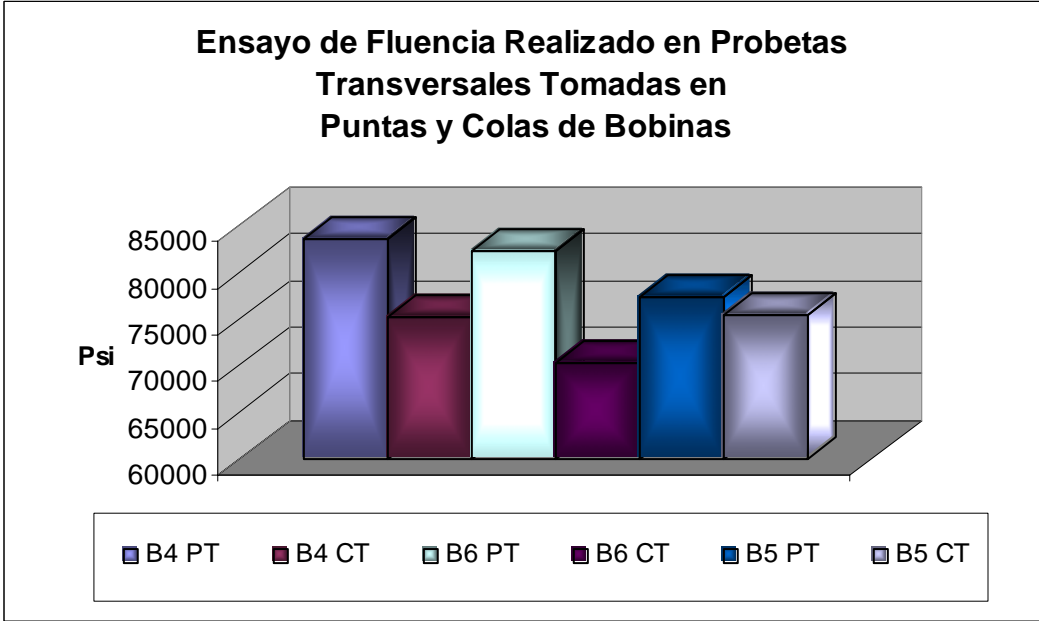


Figura 28 - Comparación de los Resultados de Fluencia en Sentido Transversal de las Bobinas 4,5 y 6

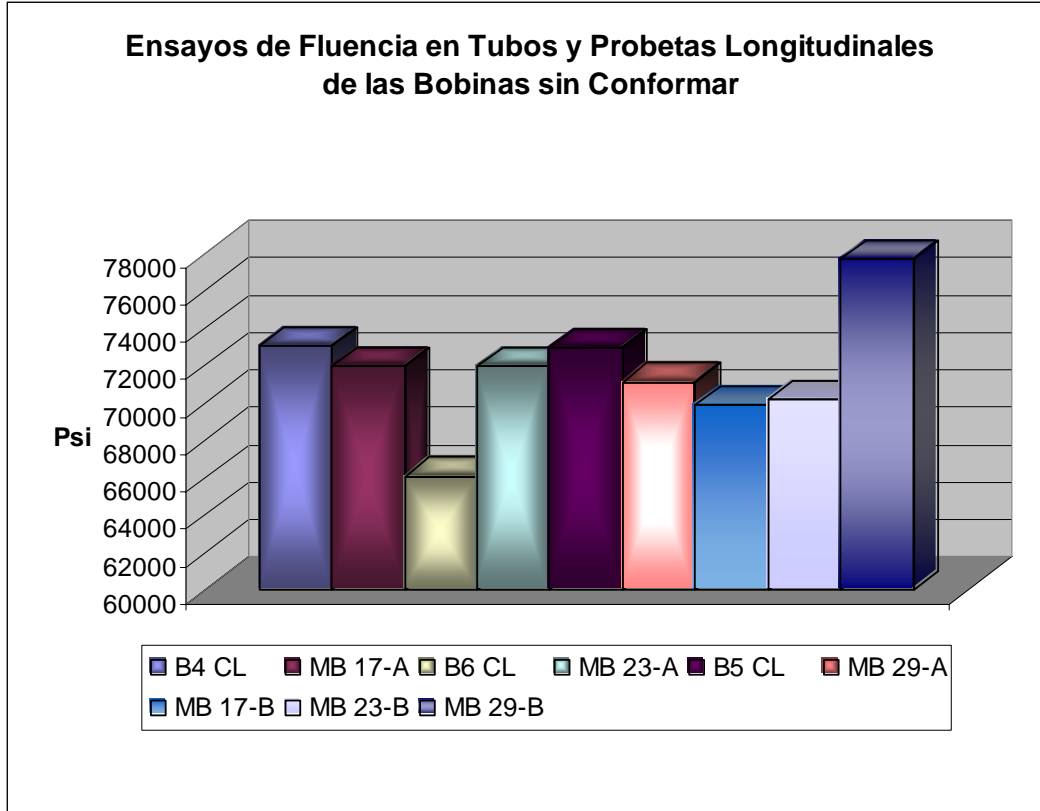


Figura 29 - Comparación de los Resultados de Fluencia en Sentido Longitudinal de Bobinas y Tubos

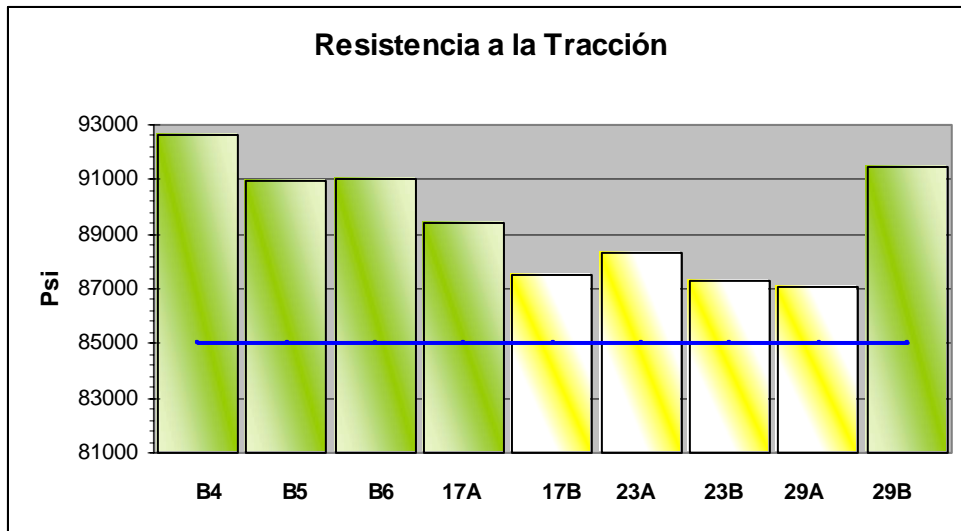


Figura 30 - Comparación de los Resultados de Fluencia de las Bobinas 4, 5, 6 y Tubos 17, 23, 29

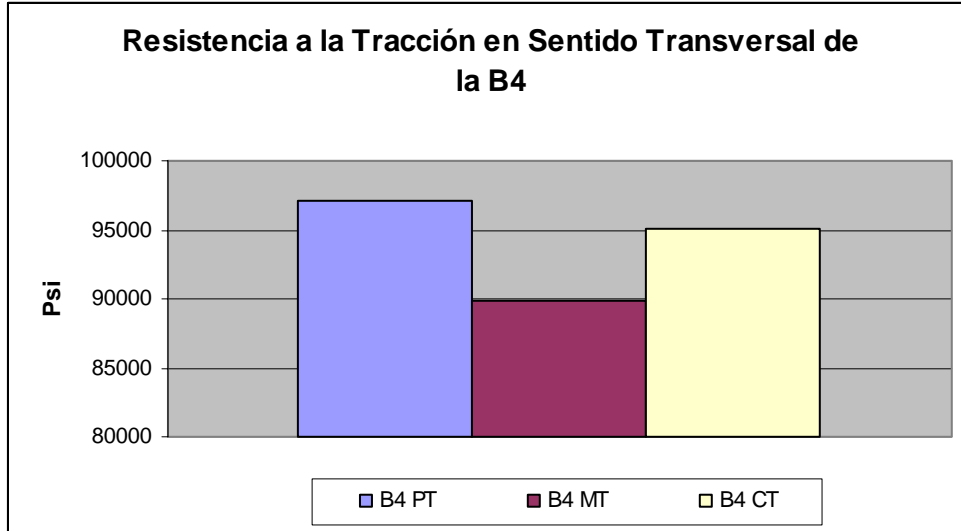


Figura 31 - Resultado de Resistencia a la fractura en Sentido Transversal de la bobina N° 4

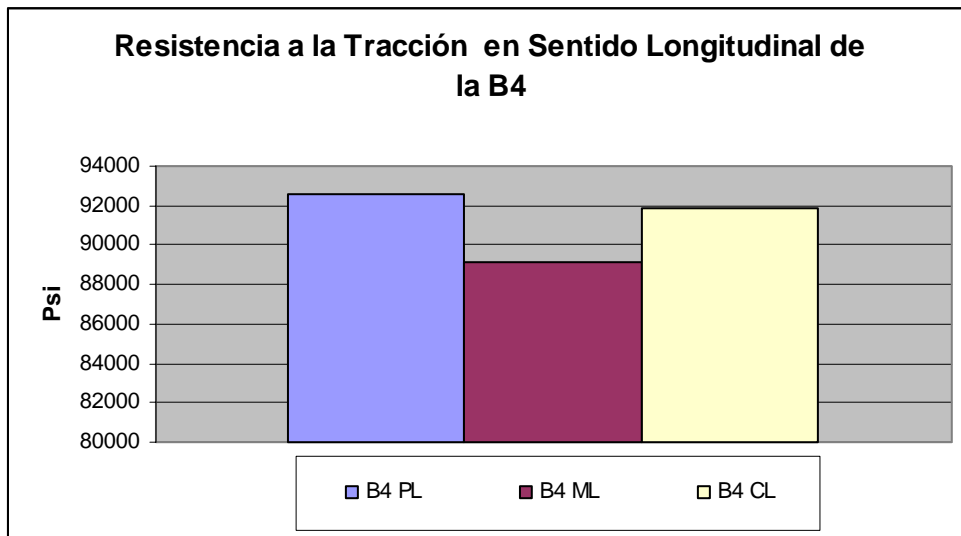


Figura 32 - Resultado de Resistencia a la fractura en Sentido Longitudinal de la bobina N°4

## CAPITULO V

### DISCUSIÓN DE RESULTADOS

#### ***Montaje de la Máquina***

Se puede afirmar que se ha alcanzado el objetivo propuesto, ya que la máquina Wilson Byard modelo 2000T se ha instalado en la empresa IMOSA TUBOACERO FABRICACIÓN C.A., y se a logrado conformar para la fabricación, como primera orden de trabajo, una serie (18) de tubos con diámetro de 30” utilizando acero API 5L Grado B, orden de trabajo que responde al número 442 de la empresa.

Como se ha explicado a lo largo del desarrollo del trabajo, el montaje y calibración de la máquina se ha realizado en base al método de planificación escogido. Cabe destacar que se cumple con los pasos establecidos en la programación tipo PERT de forma global, habiendo en algunos casos la necesidad de tomar decisiones que han involucrado cambios en dicha planificación, siendo estos casos productos de la dinámica de producción, logística y adquisición de insumos típicas de toda empresa.

La planificación del montaje ha permitido tener una idea clara de los componentes que conforman la máquina y de la secuencia en la que deben ser montados, a fin de facilitar la supervisión y uso del personal en un área específica para la cual este calificado, permitiendo además optimizar el proceso de producción.

El montaje de la máquina significó cambios en la planta física de la empresa, esto puede verse en el cronograma de actividades, por lo que para poder alcanzar el objetivo final, hubo que realizar, en conjunto con gerentes de la empresa, el estudio y ejecución de obras que abarcaron el desmontaje de todo lo que era la zona de inspección final, reubicándola en un galpón adyacente, la colocación de tres vías de rodillos para transportar los tubos a lo largo de las estaciones de trabajo y disminuir de esta forma la dependencia del puente grúa, y el mandar a realizar un replanteo topográfico del área de ubicación de la conformadora. Enfocándonos en el montaje de la máquina, se afirma que el bastidor de entrada ha requerido más ajustes, tomo

mayor tiempo su ensamble, presentado las mayores dificultades. Esto implica, que el haber sido señalado como camino crítico en la metodología, ha sido un acierto.

Para la ubicación de la mesa de conformación, se utiliza el marcaje previo del suelo y se colocan unos suplementos que permitan su nivelación, ya que el suelo presenta cierto desnivel que se elimina para poder asegurar que la zona donde se conforma el tubo se encuentre alineada.

El estudio topográfico de la zona donde va a trabajar el bastidor de salida, ha revelado que el mismo presenta una buena nivelación, por lo que una vez acondicionado el terreno, se procede a colocar los rieles en donde van apoyadas las ruedas del bastidor, que permitirán su movimiento radial en función del ángulo de conformación.

Se ubica la mesa de conformación, ya que en ella se encuentran los centros, pivots, tanto del bastidor de entrada como del bastidor de salida, para lograr una buena calibración.

En el bastidor de entrada, el acoplamiento de los rodillos de alimentación, ha sido una tarea en la que se ha trabajado con cuidado, ya que los mismos deben quedar perfectamente alineados y paralelos al suelo, para dar la tracción a la parte inicial de la bobina. Los rodillos de alimentación se colocan introduciéndolos verticalmente hasta llegar a las guías del mismo, para luego acoplar el reductor a una base.

Los rodillos enderezadores, se han ensamblado a la máquina rápidamente, esta estructura se acopla a una cavidad existente en la sección B, lográndose un posicionamiento apto dentro de la máquina. Sin embargo, estos rodillos son accionados, para subir o bajar, con el uso de gatos que trabajan de forma hidráulica, pero en la conformadora en cuestión los mismos fueron suplantados por rodillos mecánicos, lo cual representa una desventaja tanto para la puesta a punto, como para la conformación en general, ya que su función de enderezar se ve comprometida, limitando su eficiencia.

El montaje de los rodillos de tracción se convierte en el punto neurálgico del montaje, ya que el mismo duró dos semanas, 10 días, debido a que realizan una función crítica en la máquina que es la de imprimir el movimiento de la banda a lo largo de la conformadora. Al haber

desmontado los mismos de su posición original, su posterior montaje ha significado un trabajo riguroso y metódico, cuidando que los reductores que van a cada lado de la máquina, queden perfectamente perpendiculares al suelo, evitando que trabajen de manera forzada. Los rodillos de tracción se colocan horizontalmente uno sobre el otro, para luego conectarle sus respectivos reductores o motores reductores, cuidando su alineación. Aquí se encuentra otra modificación de la máquina que la diferencia de cómo sale de fábrica, ya que el reductor de la izquierda (vista desde el frente del bastidor de entrada, donde se alimenta la bobina), se acopla al rodillo de tracción superior, siendo el rodillo inferior en donde se ubican originalmente ambos reductores. Esto también afecta la calibración y conformación de la máquina.

Las fresadoras se centran en su posición correspondiente (ubicando las mismas a una distancia perpendicular equidistante con relación al centro de la máquina), para lograr que se desplacen la misma distancia a la hora de preparar la junta en los bordes de las bobinas. Esta operación ha tomado tiempo debido a la cantidad de soldadura que hay que utilizar para sujetar de forma efectiva las fresas.

El montaje de la mesa de empalme, la cual viene apoyada sobre dos rieles soldados a la sección A con la finalidad de lograr el desplazamiento de dicha mesa en una misma dirección con relación al desplazamiento de la bobina, se hace de forma sencilla, siendo en la puesta a punto donde se debe prestar atención en los sistemas de oxicorte y soldadura, los cuales se encuentran en mal estado y mal distribuidos en la zona.

En la instalación de los gatos hidráulicos y mecánicos que controlan los rodillos guías laterales, el predoblado y los largueros guías no existe mayor complicación.

Cuando el bastidor de entrada ya este instalado se procede con el montaje del bastidor de salida, que viene dividido en la sección C, que va conectada a la mesa de conformación y donde se ubica la jaula o pórtico de salida, la sección D, donde se encuentra el corte de plasma y los expulsa tubos, la sección E que resulta en un extensión del bastidor para permitir fabricar tubos de hasta 18 metros de longitud.

Para el montaje del bastidor de salida también se ha hecho uso de los resultados arrojados del análisis topográfico, utilizándose además información de la diferencia de alturas entre la mesa y el bastidor, para asegurar que el tubo recién formado salga sobre el plano horizontal.

La sección C, se conecta a la mesa de conformación y se ubica el pórtico de salida, la sección D, donde se encuentra el corte de plasma y los expulsores, la sección E que resulta en una extensión del bastidor para permitir fabricar tubos de hasta 18 metros de longitud. La sección D, se conecta a la sección C por medio de ajuste de tornillería, en el mismo se instala el banco de corte por plasma y los gatos expulsores al sistema hidráulico. La sección E, se acopla con la sección D por el mismo modo que el caso anterior sobre el cual se conectan dos brazos expulsores.

## ***Calibración***

Los resultados del montaje de la máquina son evaluados al realizar la conformación de la misma para fabricar tuberías de 30" de diámetro. Esto permite la calibración o puesta a punto de la máquina, teniendo cuidado con el comportamiento de partes esenciales de la misma y a la graduación de las variables de soldadura.

Las tuberías soldadas conservan el diámetro a lo largo de su desarrollo, conservando la alineación tanto en la soldadura interna como en la soldadura externa. Los 18 tubos fabricados presentaron ciertos defectos siendo la mayoría de ellos perforaciones y falta de penetración. Esto se debe al hecho de que existen operadores en entrenamiento que además se encuentran conociendo la nueva máquina. Cabe destacar que la mayoría de estos defectos se presentan en cada parada de la máquina, por lo que se deben controlar los parámetros de soldadura cada vez que se inicia la operatividad de la máquina, ya que la velocidad de inicio de la máquina se incrementa paulatinamente.

Estos defectos se van resolviendo a medida que la máquina va trabajando, ya que con el tiempo se optimizan los detalles de cada componente y se familiariza el operador con la nueva conformadora.

La conformación de la máquina demostró que la ubicación del bastidor de entrada en el ángulo de 65° se hace de forma sencilla, siendo igualmente sencillo colocar todos los rodillos de la máquina en dicho ángulo de conformación.

Al momento de utilizar los rodillos enderezadores se aprecia la dificultad de utilizar los gatos manuales, ya que para poder colocar cada rodillo en posición, con su altura específica, el operador de banda se debe mover de un lado a otro del bastidor cargando una bomba de acción manual. Esto además de aumentar el tiempo de conformación, puede provocar una mala calibración.

El montaje de los rodillos de tracción se ha realizado de forma confiable, ya que la banda pasa por el mismo en forma horizontal, pudiéndose subir y bajar el rodillo superior. Sin embargo, la acción de elevar el rodillo superior para que la banda pase entre los dos rodillos involucra levantar el reductor acoplado a dicho rodillo a la altura de la chapa a conformar, para permitir que dicho motor funcione sin sufrir esfuerzos distintos a los propios de su funcionamiento. Esto se debe a una modificación hecha en esta máquina que la distingue de la otra máquina helicoidal en su calibración.

La capacidad de desbaste de las fresadoras instaladas en esta máquina es de hasta una pulgada (25,4 mm) por lado, sin embargo al refrentar 10 mm por cada lado, para alcanzar un ancho de banda nominal de 990 mm, la banda presenta mucha rebaba o astillas de metal, lo cual se debe a que las fresas no poseen todos los insertos o herramientas de corte de viruta.

La conformación de la máquina involucra colocar tanto los rodillos de contrafuerzas, rodillos de entradas y rodillos del Boom a distancias específicas sobre la mesa de conformación, ya que estos tres grupos de rodillos, junto con el rodillo inversor, son los encargados de hacer la deformación que resulta en la conformación del tubo. El rodillo inversor, funciona como soporte de soldadura que debe colocarse paralelo a la banda entrante y de manera que la soldadura interior se realice sobre el centro de dicho rodillo.

Este rodillo inversor puede subirse o bajarse mediante la acción de un gato, pero el pistón de dicho gato no se encuentra en las mejores condiciones, haciéndose necesaria la utilización de suplementos por debajo del inversor, que permitan que el mismo logre una altura mayor para



poder dominar el metal al conformarlo. Esto representa otra demora en el proceso, ya que muchas veces se tiene que moldear un suplemento cuadrado, que debe cortarse con oxicorte y luego esmerilarse, perdiéndose tiempo de conformado y de producción.

La puesta a punto para fabricar la tubería de 30" involucra colocar las bases del pórtico a una altura específica, colocando los rodillos superiores de dicha estructura a una distancia horizontal que permita amarrar el tubo a su salida para conservar el primer tubo en posición y mantener el diámetro. Otro punto a evaluar es el gato que mueve el bastidor a la derecha o a la izquierda, el cual debe tener la misma carrera a cada lado. El ajuste del fin de carrera permite cortar la tubería a los 12 metros de longitud.

Tanto la soldadura interna como la externa y el empalme o soldadura transversal utilizan un alimentador de alambre marca LINCOLN modelo Na3, en el cual se varía tanto el voltaje como el amperaje, siendo ellos entre sí interdependientes de forma directamente proporcional.

La velocidad del alambre es una variable dependiente del amperaje, pudiendo calcularse con el uso de gráficos. Este sistema ha traído problemas en la soldadura interna, ya que cada vez que se interrumpe el proceso, se queda pegado el alambre a la chapa, tomándose tiempo en arreglar este inconveniente y poner a punto el cabezal nuevamente.

La mira láser es colocada en la soldadura externa, facilitando la alineación antes de realizar la soldadura. La velocidad de avance de la chapa se ha controlado para evitar perforaciones, ya que debido a la baja calidad de refrentado de las fresas por falta de insertos, cada vez que pasa por la soldadura interna la rebaba se forma una especie de hueco o "mordida" que hace perforar tanto al soldador interno como al operador de la soldadura externa. Este último sin embargo, al ver que se perfora en la interna tiene la opción de cambiar los valores de amperaje y voltaje, pero esto a su vez puede repercutir en falta de material o falta de penetración en una zona de la tubería que se está fabricando.

El procedimiento de soldadura se ha seleccionado tomando en cuenta el espesor de la chapa a soldar, el tipo de acero, el bisel o refrentado y es especificado por la empresa IMOSA como "Especificación del Procedimiento de Soldadura". Este procedimiento fija el voltaje y el amperaje de soldadura, pero el mismo es ratificado utilizando tablas y gráficos.

## ***Pruebas Acero API 5L X65.***

La discusión se desarrolla tomando en cuenta los resultados mecánicos obtenidos en las diferentes probetas tomadas siguiendo lo estipulado en la metodología. Por su parte el estudio de la variación en las propiedades mecánicas del material base o de la materia prima, bobina, que se utiliza en la fabricación de tuberías, se realiza tomando en cuenta los fundamentos teóricos que se encuentran en este trabajo.

Las tuberías fabricadas con el acero API 5L X65 se puede observar que presentan buenas propiedades dimensionales tanto en diámetro, geometría y tamaño del tubo. Cada Tubo cumple con la prueba hidrostática, a la que son sometidos de acuerdo a la especificación API 5L. La calibración del ángulo de conformación permite obtener tubos con esta característica y la fórmula para el cálculo de cantidad de tubos a obtener por peso de bobina, hace una buena estimación siempre y cuando se tome en cuenta el margen de seguridad por pérdidas de material.

## **Análisis del Material de Aporte**

### ***Comparación de Propiedades Mecánicas***

Por observarse múltiples problemas de soldadura con los parámetros establecidos para la combinación del material de aporte LINCOLN 780/L61, se procedió al ajuste de los parámetros del proceso, hasta conseguir condiciones donde la soldadura no presente defectos como socavaduras, perforación, High-Low, escorias, poros o falta de penetración. En función de obtener la sanidad del cordón, se utiliza como parámetros de soldadura interna una corriente de 710 amperios, 33,2 voltios y una velocidad de varilla de 0,60 pulg./min., mientras que en la soldadura externa se utiliza 33 voltios, una velocidad de alimentación de varilla de 0,75 pulg./min. y una velocidad de avance de la máquina de 0,65 m/min. El aporte calórico en la soldadura es el estándar, tomando en cuenta que el proceso SAW es de alto aporte calórico, por lo que los parámetros son los adecuados para obtener una zona afectada por el calor no muy ancha, la cual pueda afectar la zona cercana al cordón ya que la energía almacenada será

menor, Tabla 23. El resultado de resistencia última a la tracción, para esta combinación se encuentra dentro de los parámetros mínimos y máximos requeridos para cumplir con la norma API 5L. Los valores de resistencia al impacto, Tabla 25, también se encuentran por encima de los requeridos por la norma. Ver Anexo 2.

Comparando los resultados obtenidos para cada combinación, Figura 76, además de las Tablas y Figuras correspondientes a cada material de aporte de forma individual arroja que la combinación usada en la Bobina 2, material de aporte ESAB, presenta el mayor valor en resistencia a la tracción, lo que arroja una idea de la tenacidad. Sin embargo, la tenacidad de una aleación depende de una combinación de la resistencia y la ductilidad. En la resistencia tenemos involucradas tanto la resistencia última a la tracción como la resistencia a la fluencia y dentro de la ductilidad tenemos el porcentaje de alargamiento a rotura. La relación fluencia/rotura de todas las combinaciones se encuentran entre 0,77 y 0,81, siendo muy similares y el material que se presenta con el menor porcentaje de alargamiento es el soldado con la combinación ESAB, por lo que a pesar de tener una gran resistencia, la baja ductilidad compromete la tenacidad del par soldado.

Se conoce que la energía absorbida por el impacto, se puede relacionar con la tenacidad del material, esperándose entonces que materiales que posean una relación alta de esfuerzo de fluencia y esfuerzo máximo de tracción, presenten a su vez elevada energía absorbida por el impacto. Los resultados de impacto de las probetas de la bobina 2, muestran valores en el cordón de soldadura por debajo de los requeridos en la norma, Ver Tabla 17, lo que ratifica el hecho de que la tenacidad de este material no es apta, por lo menos con los parámetros de soldadura establecidos.

Los resultados del ensayo de dureza, Tablas 26, 31, 36 y Figuras 68, 70, 72,73, 74 y 75 para cada combinación muestran valores similares en magnitud. Los resultados concuerdan con los resultados esperados, ya que, el metal base presentó una menor dureza que la zona afectada térmicamente y ésta a su vez, con el cordón de soldadura.

Aunque las combinaciones cumplen con lo requerido en la norma AWS, la composición nunca es igual al metal base, pudiendo establecerse inclusiones no metálicas o segregaciones de

partículas de segundas fases tanto en el cordón como en la zona afectada. Estos factores pueden entonces modificar las propiedades de la sección, pudiendo alejarse de los valores teóricos. El menor aporte calórico se suministro con la combinación ESAB, la cual además presenta el mejor aspecto visual, con gran facilidad de despegue de la escoria y facilidad de soldeo.

Con relación a los cupones de soldadura, se puede observar que en todas las combinaciones se apreciaron niveles aceptables de Resistencia Última a la Tracción, lo que indica, que todos los materiales de aporte clasifican para la soldadura de estos aceros, siempre y cuando se tome en cuenta solo el aporte de resistencia al cordón. Sin embargo la Tenacidad observada en las tres combinaciones alambre-fundente, sí arroja discrepancias, ya que la junta soldada con el material K12 (EM12K)/ 350 (F7A2) de marca comercial ESAB, no cumple con los niveles de tenacidad requeridos en el cordón de soldadura según las exigencias de la norma API 5L, siendo esta la combinación que presentó menores niveles de Tenacidad de las tres combinaciones de material de aporte utilizados, de esta manera, se puede afirmar que es factible la desestimación del uso de este material para la soldadura de tuberías fabricadas con aceros API 5L X65, o en dado caso realizar una revisión de los parámetros de soldadura utilizados durante la ejecución del proceso de soldadura con el fin de mejorar las propiedades de tenacidad del cordón.

Los resultados de dureza no presentan una variante muy significativa entre ellos, esto indica que los distintos materiales de aporte que se utilizan para el proceso de soldadura del acero no difieren en gran forma los niveles de dureza obtenidos después del proceso de soldadura.

Al comparar la combinación L61/ 780 con la combinación L70/997, se observa que las dos dan resultados que satisfacen las normas para el acero API 5L X65. Sin embargo, cabe destacar que el fundente 780 es un fundente activo, que ayuda gracias al Si y el Mn a desarrollar una composición química adecuada del cordón. Además el fundente 997 es recomendado para soldadura de dos o más alambres, ya que su velocidad de enfriamiento es alta, lo que garantiza el escape de los gases entre cada pasada. A su vez, la apariencia del cordón de soldadura obtenido por la combinación L61/780 es cualitativamente superior al par L70/997.

Observando las propiedades mecánicas obtenidas en las soldaduras realizadas con las combinaciones de material de alambre-fundente, se determina que la mejor combinación de material para la soldadura de acero API 5L X65, en la fabricación de tuberías, es el par L61/780, ya que este presenta niveles aceptables de resistencia a la fractura, a la tenacidad y de dureza, tanto en el cordón de soldadura como en la zona afectada por el calor, donde en esta se presentan menores valores a los obtenidos en las demás combinaciones, no queriendo decir con esto que las demás combinaciones de alambre y fundente, no califiquen para la soldadura de tuberías de acero API 5L X65, sino que en el estudio realizado en este trabajo las mejores propiedades metalúrgicas y de soldadura, la presento la combinación ya mencionada, pero una revisión o ajuste de los parámetros podrían dar resultados iguales o superiores a los de la combinación seleccionada.

En los ensayos mecánicos realizados a las probetas provenientes de las bobinas 1,2 y 3 se puede observar que en las probetas de material base no respondió con los requerimientos exigidos por la especificación API 5L, ya que presentan niveles más bajos de resistencia a la fluencia que debe tener un acero API 5L X65. Esto se puede ver en la Tabla 39 y en las Figuras 89 y 90. Esto ha motivado el estudio del metal base, utilizando las bobinas 4, 5 y 6, bobinas suministradas por SIDOR, una vez ajustado su proceso de acería y colada. La discusión más detallada se muestra en este mismo capítulo en las páginas subsiguientes.

## **Microestructura**

Con respecto a la microestructura observadas, el cordón de soldadura presenta una estructura columnar similar a una estructura de colada. El elevado aporte calórico del proceso ha dado como resultado, en las tres combinaciones utilizadas, una microestructura mixta de ferrita proeutectoide, ferrita de contorno de grano y poligonal, además de la característica ferrita acicular y perlita. La presencia de ferrita acicular da la gran tenacidad del material, ya que el crecimiento produce los segregados de carburos, formando carburo entre sus placas. En la Figura 79 se puede observar la presencia de placas no uniformes u ordenadas, típicas de la ferrita acicular, que deben crecer gracias a los carburos formados por los elementos aleantes en este tipo de acero HSLA. Se observa además la presencia de ferrita poligonal, que se ve con

gran tamaño y en color blanco, que es el primer constituyente formado durante el enfriamiento de la austenita. El termino “alotriomórfica” significa que la fase es cristalina en su estructura interna, pero no exteriormente. La ferrita poligonal nuclea a lo largo de los límites  $\gamma / \gamma$  y crece bajo un mecanismo de transformación difusional reconstructivo. El crecimiento no es restringido por los límites de grano de la austenita. La difusión necesaria para obtener los cambios de la red cristalina se dan con un mínimo de deformación.

Debido a las altas velocidades de enfriamiento involucradas, el crecimiento de la ferrita poligonal en soldadura puede ser asumida que ocurre por una transformación en para equilibrio en donde en este caso dicha transformación es controlada por la difusión de carbono en la austenita al frente de la interfase.

Esta microestructura se repite en grandes rasgos en las tres microestructuras tomadas al cordón de soldadura de cada una de las combinaciones Figuras 79, 80 y 85, aunque la presencia de ferrita poligonal en la Figura 85 no es apreciable, lo cual puede deberse a la zona escogida para tomar la micrografía.

Las micrografías del cordón de soldadura interna, cordón que es el primero en soldarse, presenta una microestructura un poco más refinada, producto del recalentamiento que se da al dar el pase de la soldadura externa, que disminuye la velocidad de enfriamiento del material, permitiendo la transformación del material. Es una microestructura comparable a la zona intercrítica de ZAC, es decir, un grano refinado con presencia de ferrita primaria y perlita. Esto es representado en las Figuras 79 y 82, sin embargo en la Figura 85, perteneciente a la tercera combinación alambre fundente (Lincoln 997 – L70), puede observarse la presencia de ferrita poligonal, siendo esta zona el comienzo del cordón de soldadura, en el que el grano no pudo ser refinado completamente.

En las tres combinaciones pueden observarse las diferencias de microestructuras de la zona afectada térmicamente, el cordón de soldadura externo y el cordón de soldadura interno (Figuras 81, 84, 87 y 88).

Se afirma que el estudio por microscopía óptica no muestra diferencias apreciables en cuanto a la microestructura de cada cordón de soldadura, sin embargo este si revela las características

microestructurales que se esperan para este tipo de acero, pudiendo apreciarse sus constituyentes principales.

## **Material Base**

Con respecto al material base observado en las tres (3) primeras bobinas, se pudo observar que existen ciertas discrepancia entre los resultados de los análisis químicos arrojados por CONDUVEN y los enviados por SIDOR, Tabla 38, donde se observa una significativa diferencia en los elementos Ti, Cu y Ni, elementos que son fundamentales en la elaboración de estos aceros al Mn o aceros HSLA. Otros aspectos que influyen en las propiedades mecánicas que presentan estos aceros, son la temperatura de comienzo de laminación ( $T_s$ ), la temperatura final de laminación ( $T_f$ ), final de enfriamiento ( $T_c$ ), como las velocidad de enfriamiento ( $V_C$ ) que se presentan en los procesos de embobinado. El valor de carbono equivalente se ajusta al mínimo exigido por la norma, por lo que se espera que la soldabilidad del metal base sea satisfactoria.

La empresa SIDOR, encargada de fabricar dichas bobinas realizó una serie de cambios en las variables descritas en el párrafo anterior, logrando incrementar las propiedades mecánicas de las bobinas enumeradas como 4, 5 y 6, lográndose obtener un incremento en los niveles de resistencia a la fluencia de hasta 83.000 Psi, valor que supera ampliamente lo requerido por la especificación API 5L para el acero en cuestión. Se ha intentado obtener la información sobre los cambios realizados en el proceso de embobinado pero no ha sido posible ya que SIDOR nunca respondió la solicitud de la información requerida. Con respecto a los tubos conformados con estas bobinas se puede afirmar que los mismos superaron ampliamente las exigencias de la norma API 5L ya que los mismos presentaron propiedades de un acero API 5L X70.

Sin embargo por la información descrita en el marco teórico de este trabajo, específicamente la sección titulada “Relación entre los parámetros y las propiedades mecánicas”, donde se puede deducir teóricamente, los siguientes cambios en las variables de fabricación de bobinas, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas de las bobinas (ver Tabla 41).

Tabla 40 - Forma de variar los parámetros y mejorar las propiedades mecánicas

<b>Parámetro</b>		<b>Cambio</b>
$T_s$	↑	Aumentar
$T_f$	↓	Disminuir
$T_c$	↓	Disminuir
$V_c$	↑	Aumentar

En la Figura 89, Tabla 39 se aprecia que los resultados que las bobinas denominadas B1, B2 y B3 presentan valores de resistencia a la tracción con límite marginal con respecto al valor mínimo de la norma API, encontrándose que la B1 no alcanza el valor de los 77.000 Psi y la B3, aunque muestra valores por encima de dicho límite, el valor no resulta confiable debido a que la deformación asociada a la transformación del producto puede resultar en una disminución de las propiedades (Ejemplo: Efecto Bauschinger).

Con las pruebas de las bobinas B4, B5 y B6, donde se realiza el estudio del material base, se puede determinar que las probetas tomadas en forma longitudinal al sentido de laminación, presentan menores niveles de resistencia a la fluencia que las tomadas de forma transversal, siendo este resultado discordante a lo señalado por la literatura Figuras 91 y 93 de los resultados. También se puede apreciar las diferencias en los valores de resistencias en las puntas y colas de dichas bobina Figura 92, 94, lo que es atribuido a las distintas velocidades de enfriamiento que presentan las diferentes zonas de la bobina durante el proceso de embobinado. Los extremos denominados como cola, extremo interno de la bobina, presentaron niveles menores de resistencia a la fluencia, ya que esta es la zona de la bobina donde el enfriamiento es más lento y permite un mayor crecimiento de grano, disminuyendo de esta manera la resistencia a la fluencia del material en esta zona. Por su parte en la punta, extremo externo de la bobina, se presentan los mayores niveles de fluencia, esto es atribuido a que en este sector de la bobina se presenta las mayores velocidades de enfriamiento, produciendo un aumento en la resistencia a la fluencia del material originado por efecto del refinamiento de



grano. Se puede apreciar en los resultados que el comportamiento fue similar tanto para la resistencia a la fluencia como para la resistencia máxima a la tracción.

Con el estudio de la materia prima sin conformar y después de conformada, Figura 97, se observa una disminución en las propiedades obtenidas después de la conformación del tubo, esto es debido al fenómeno conocido como efecto BAUSCHINGER, ya mencionado en el marco teórico de este trabajo. Esto se debe a que el material es primero desbobinado, pasando por los rodillos enderezadores de la máquina, luego en la mesa de conformación adquieren la forma de tubería, para posteriormente ser enderezados en la dirección contraria a la hora de formar la probeta. Todo esto hace una curva de histéresis que disminuyen la resistencia del material.

Tomando en cuenta esta serie de observaciones se debe resaltar que SIDOR emite los certificados de las propiedades de las bobinas, tomando las probetas del sector denominado como punta de bobina, en sentido transversal a la laminación, donde estas presentan mejores propiedades a diferencia de otras zonas. Según los resultados observados las bobinas deben presentar un mínimo de 78000 Psi, como valor de certificación de colada, con el fin de que dichas bobinas cumplan con las propiedades de un X65 a lo largo del material. La microestructura del metal base es típica de aceros C-Mn de bajo contenido de carbono, donde se puede observar la orientación de los granos productos del proceso de laminación. Las propiedades mecánicas de esta zona se ven afectadas por los cambios microestructurales ocurridos en el metal base en la zona cercana al cordón de soldadura, donde podrían crecer las grietas nucleadas en la intercara metal de aporte/metal base o zona afectada por el calor (ZAC o ZAT), la cual es subdividida en subzonas dependientes de la temperatura a la que son sometidas en el proceso de soldadura. La formación de ferrita Widmanstätten en la ZAC se encuentra asociada a procesos de elevado aporte calórico, como el SAW, y lentas velocidades de enfriamiento. La formación de ferrita proeutectoide en soldaduras con alto aporte calórico comienza a partir de los límites de grano de la austenita previa. La perlita es encontrada en asociación con la ferrita proeutectoide en soldaduras de alto aporte calórico. La microscopía óptica no permite observar la presencia de los elementos aleantes, aunque en la Figura 88 se aprecian carburos dentro de los granos de ferrita.

## CONCLUSIONES

- Se logró la instalación de la máquina Wilson Byard utilizando el método de planificación PERT-CPM.
- Se pueden conformar tubos de 30” de diámetro por soldadura de arco sumergido, SAW.
- La planificación del montaje es un procedimiento adecuado para determinar la forma de trabajo.
- El camino crítico del montaje de la máquina Wilson Byard, es el montaje del bastidor de entrada.
- Los cabezales de soldadura se deben montar una vez colocada la chapa a conformar sobre la mesa de conformación.
- El resultado de la calibración fue satisfactorio. Las tuberías soldadas conservan el diámetro y la alineación tanto en la soldadura interna como en la soldadura externa.
- Se requieren setenta y dos (71) días para realizar el montaje de la máquina Wilson Byard modelo 2000 T.
- La máquina se encuentra operativa.
- Las tuberías fabricadas con el acero API 5L X65 presentan buenas propiedades dimensionales tanto en diámetro, geometría y tamaño del tubo.
- La calibración del ángulo de conformación permite obtener tubos con el diámetro requerido.
- El aporte calórico en la soldadura es el estándar, por lo que los parámetros son los adecuados para obtener una zona afectada por el calor no muy ancha.

- Las propiedades mecánicas obtenidas en la combinación L61/780 se encuentran en los rangos establecidos por la norma API 5L.
- El proceso de soldadura y las características del metal base propician la formación de microestructuras como la ferrita acicular, ferrita poligonal y elevan la densidad de carburos en la ZAC.
- La combinación de alambre/fundente a utilizar para la fabricación de tuberías con el acero API 5L X65 por el método SAW, es la denominada L61/780.
- El metal base presenta orientación microestructural en sentido a la laminación.
- Las bobinas de acero API 5L X65, B1, B2 y B3, fabricadas por SIDOR, no presentan propiedades mecánicas uniformes a lo largo de su prolongación.
- Debido al efecto BAUSCHINGER, existe una disminución en las propiedades mecánicas de las tuberías soldadas en comparación a las obtenidas en la bobina.
- Para garantizar la obtención de tuberías, con las propiedades requeridas de metal base, se debe utilizar dicho material con un excedente en su resistencia a la fluencia.
- Las bobinas B4, B5 y B6 presentan valores de resistencia a la fluencia y a la tracción muchos mayores a las requeridas en la norma para el acero API 5L X65.
- En las bobinas de acero API X65 las propiedades de tracción son mayores en sentido transversal que en longitudinal.
- Las propiedades de la bobina varían a lo largo de su extensión, disminuyendo desde la punta hasta la cola de la misma.
- Para asegurarse que una bobina SIDOR, cumpla a lo largo de su prolongación con las especificaciones de un acero API 5L X65, el certificado de la colada debe ser no menor a 78000 Psi.

- Es de suma importancia el manejo adecuado de las variables en el proceso de laminación controlada termomecánicamente, como las temperaturas de inicio y final de embobinado, velocidad de enfriamiento y temperatura de enfriamiento, ya que estas son las que rigen las propiedades mecánicas de las bobinas de acero.
- Mientras se aumente la Temperatura de comienzo de laminación, velocidad de enfriamiento y se disminuya la temperatura final de laminación, temperatura final de enfriamiento; se provocará un aumento en la propiedad de fluencia de los aceros microaleados HSLA.
- Los parámetros ajustados al equipo permiten realizar soldadura por SAW que cumplen con la norma API 5L.
- La microestructura del metal base es típica de ferrita – perlita con precipitados de carburos.

## RECOMENDACIONES

- Tratar en lo posible, a la hora de desacoplar la máquina en la localidad de origen, de no caer en un desarme exagerado, ya que la mentalidad que se debe llevar es separar la máquina por módulos, para así realizar un montaje mucho más sencillo y rápido.
- Exigir en la medida de lo posible las piezas originales de la máquina, de lo contrario pedir la razón del porque el cambio de dichas piezas.
- Observar cuidadosamente el funcionamiento de cada una de las secciones de la máquina antes de desacoplarla, ya que con esto se puede apreciar las diferentes modificaciones y formas de operación de las secciones que conforman la máquina.
- Apresurar el despeje del área donde se va colocar la máquina, ya que esto provoca una disminución en la duración del montaje de la misma.
- Se recomienda hacer estudio de la materia prima antes del conformado. Esto para evitar la mala calidad de los productos y poder hacer reclamos.
- Mejorar el sistema de los rodillos enderezadores, poniendo operativo los gatos hidráulicos.
- Se recomienda la reubicación de los puentes grúas de 10 y 40 toneladas, para tener un mejor desempeño de los mismos y que el segundo interfiera el trabajo del primero.
- Adaptar el container que se encuentra en el Galpón 8 como un depósito de fundente caliente, para acelerar el proceso.
- Aplicar una política de comedor por turnos, para disminuir las paradas de máquina.
- Se recomienda utilizar soldadura en Tamdem, para aumentar la velocidad de producción.

- Utilizar políticas de identificación del trabajador con la empresa, para lograr un compromiso del mismo hacia su trabajo. Que el trabajador se sienta parte importante del proceso y que es tomado en cuenta.
- Se recomienda realizar microscopia de barrido en combinación con técnicas de difracción de rayos X o de transmisión, para establecer la presencia de inclusiones y el índice de poros que se presentan con la utilización de diferentes combinaciones de material de aporte.
- Realizar un estudio comparativo de tuberías soldadas helicoidal y longitudinalmente utilizando planchas y bobinas provenientes de una misma colada o de un mismo material.
- Realizar pruebas de resistencia a la corrosión por H<sub>2</sub>S, presente en el gas nacional.
- Comparar las propiedades mecánicas que presentan las tuberías soldadas con el método de arco sumergido, en comparación con otros métodos utilizados en la fabricación de tuberías.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. AHMSA: <http://www.ahmsa.com/ahmsa/acero1/acero-ahmsa/placa-y-rollo/api-5l-x-65-rollo.htm> Consultado 25/04/2004.
2. API: **Specification for line pipe, Spec 5L**, 42<sup>nd</sup> Edición, Año 2000.
3. ARAYA, L.V: **Efecto del aporte calórico de los distintos procesos industriales de soldadura en la microestructura y propiedades mecánicas de un acero API Spec 5L grado B**. Caracas, UCV, 1997.
4. AWS: **Manual de Soldadura Tomo I**. Prentice – Hall Hispanoamericana S.A. Octava edición.
5. BABU,S.S: **Acicular ferrite a bainite in Fe – Cr – C welds deposits**, Darwing College, Cambridge, 1991.
6. BAKKALOĞLU, Adem: **Effect of different rolling schedules on the mechanical properties and microstructures of X60 type HSLA steel**, Zeitschrift Fur METALLKUNDE, 2001, Vol 92, pp 355 – 360.
7. BRONGERS, M.P.H: **Effect of hydrostatic testing on ductile tearing of X-65 line pipe steel with stress corrosion cracks**; Corrosion, 2000, Vol 56, pp. 1050 – 1058.
8. CHUEN-TAO, L: **Aplicaciones prácticas del PERT y CPM**; Bilbao, 3<sup>era</sup> Edición, Ediciones Deusto, 1969.
9. CROWN HOLLANDER INC: **Wilson Byard 2000 Spiral Weld Pipe Mill**.
10. DIETER, G: **Metalurgia mecánica**; 2 edición, Ediciones Aguilar, Madrid, 1967.
11. ESAB: **Consumibles para soldadura**.

12. ERASMUS, L. **HSLA Steel; processing, properties and applications**; Journal of the Iron and Steel Institute, Vol 12, 1996, pp. 1043
13. FREDERICK S: **Introducción a la Investigación de Operaciones**, Quinta edición, Edit. McGraw Hill, México 1993.
14. GARDIOLA, B: **Determination and prediction of the inherited ferrite texture in a HSLA steel produced by compact strip production**; Material Science & Engineering A, 2001, Vol 303, pp 60 – 69.
15. GHOSH, P.K: **Fracture properties of multipass submerged arc weld of HSLA steel produced by using flux cored filler metal**, ISIJ International, 1998, Vol 38, pp. 1379 – 1386.
16. GÓMEZ, R: **Soldadura de los aceros – Aplicaciones**; Gráficas Lormo. 2<sup>da</sup> Edición, Madrid, 1988.
17. ICHASO, A: **Análisis comparativo de propiedades mecánicas entre tuberías soldadas longitudinalmente y helicoidalmente**; Caracas, UCV, 1982.
18. IGNOTO, V: **Soldadura para ingenieros**; Caracas, CVS, 2003.
19. JAMIESON, R.M: **Bauschinger Effect in High – Strength Low – Alloy Steels**; Journal of the Iron and Steel Institute, January 1971
20. JIAN, G.C: **The existence of intragranular ferrite plates and nucleating inclusions in the heat affected zone of x-60 pipe steel**; Journal of Materials Science, 1997, Vol 32, pp. 2985 – 2989.
21. LINCOLN ELECTRIC Co: **Cómo hacer soldaduras por arco sumergido**, manual S604-S.
22. LINCOLN ELECTRIC Co: **Fundentes y Electrodo Lincoln para Arco Sumergido**; manual S 210 – S, 1980.



23. LINCOLN ELECTRIC Co: **How to make circumferential welds**, manual C5.630.
24. LINCOLN ELECTRIC Co: **Na-5R, A versatile automatic welding system.**
25. LINCOLN ELECTRIC Co: **Submerged arc welding guide.**
26. MARTIN, E: **A professional's guide to systems analysis**, 2<sup>nd</sup> Ed. Mc Graw Hill, 1996.
27. MISHRA, S.K: **Precipitation in high strength low alloy (HSLA) steel: a TEM study**; Material Science & Engineering A, 2002, Vol 323, pp 285 – 292.
28. MISHRA, S.K: **Investigation on precipitation characteristics in high strength low alloy (HSLA) steel**; Scripta Materialia, 1998, Vol 39, pp 253 – 259.
29. NETMBA: <http://www.netmba.com/operations/project/pert> Consultado el 12/06/2004.
30. PENG, Yun: **Study of high toughness ferrite wire for submerged arc welding of pipeline steel**; Material Characterization, 2001, Vol 47, pp 67 – 73.
31. SIMPSON, I.D: **Steel cleanness requirements for X65 to X80 electric resistance welded linepipe steels**; Ironmaking & Steelmaking, 2003, Vol 30, pp. 158 – 164.
32. WANG, J.Q: **Boundary characterization of X65 pipeline steel using analytical electron microscopy**; Journal of Materials Science, 1999, Vol 34, pp. 1711 – 1719.
33. WILSON BYARD 2000: **Operating/ Setting procedure for byard 2000 series spiral pipe mill.**

34. ZHAO, Ming: **The effects of thermo – mechanical control process on microstructures and mechanical properties of a commercial pipeline steel;** Material Science & Engineering A, 2002, Vol 335, pp 14 – 20.



Figura 1 - Imagen de la bobina montada en el Porta Bobina



Figura 2 - A. Rodillos de Alimentación. B. Sección de Enderezamiento



Figura 3 - Imagen de una de las Fresadoras



Figura 4 – Sección del Boom

## ***Montaje de la Máquina***



Figura 5 - Vista de la Zona donde se montará la máquina. (Antes del Acondicionamiento).



Figura 6 - Zona de despacho antes de iniciar el acondicionamiento.





Figura 7 - Arribo de la Máquina a la Planta



Figura 8 - Bastidor de Entrada. Sección B



Figura 9 - Llegada de los Rodillos Enderezadores.



Figura 10 - Fresadoras Desmontadas.



Figura 11 - Montaje de los Rieles del Bastidor de Entrada



Figura 12 - Montaje de la Mesa de Conformación y de la Sección A del Bastidor de Entrada



Figura 13 - Montaje de la sección B del Bastidor de Entrada





Figura 14 - Bastidor de Entrada



Figura 15 - Foto de la Máquina donde se Puede ver la Sección C del Bastidor de Salida.



Figura 16 - Montaje de los Rodillos de Tracción en la Sección B del Bastidor de Entrada.



Figura 17 - Detalle del Montaje del Pórtico sobre la Sección C del Bastidor de Salida.



Figura 18 - Rodillos de Alimentación ya instalados.





Figura 19 - Montaje de los Reductores de los Rodillos de Tracción



Figura 20 - Vista del Bastidor de Entrada.



Figura 21 - Imagen de las Secciones D y E del Bastidor de Salida.



Figura 22 - Vista general de la Máquina recién montada.



Figura 23 - Detalle de la Fresadora instalada en la Sección A del Bastidor de Entrada.



Figura 24 - Mesa de Empalme colocada sobre la Sección A del Bastidor de Entrada.





Figura 25 - Detalle del Galpón 8 de la planta actualmente.



Figura 26 - Tubos de 30" fabricados durante la calibración.