

# **ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TÍTULO DEL PROYECTO:**

**“ANÁLISIS Y EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS  
DE RESISTENCIA EN JUNTAS SOLDADAS BAJO EL PROCESO  
FCAW AFECTADAS POR ELEVADAS TEMPERATURAS  
(INCENDIOS), APLICANDO METODOS DE ULTRASONIDO Y  
ENSAYOS MECANICOS.”**

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

**REALIZADO POR:**

**SR. JUAN FERNANDO CARVAJAL SALVADOR.**

**SR. JUAN SEBASTIÁN ROMERO PROAÑO.**

**DIRECTOR: ING. EDWIN OCAÑA**

**CODIRECTOR: ING. PATRICIO QUEZADA**

**12 de Octubre de 2011**

**Sangolquí - Ecuador**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.**

El proyecto “ANÁLISIS Y EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE RESISTENCIA EN JUNTAS SOLDADAS BAJO EL PROCESO FCAW AFECTADAS POR ELEVADAS TEMPERATURAS (INCENDIOS), APLICANDO METODOS DE ULTRASONIDO Y ENSAYOS MECANICOS.” fue realizado en su totalidad por los señores Juan Fernando Carvajal Salvador y Juan Sebastián Romero Proaño, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Ing. Edwin Ocaña  
DIRECTOR

---

Ing. Patricio Quezada  
CODIRECTOR

Sangolquí, 12 de Octubre del 2011.

## LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.

“ANÁLISIS Y EVALUACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS DE RESISTENCIA EN JUNTAS SOLDADAS BAJO EL PROCESO FCAW AFECTADAS POR ELEVADAS TEMPERATURAS (INCENDIOS), APLICANDO METODOS DE ULTRASONIDO Y ENSAYOS MECANICOS.”

ELABORADO POR:

---

Sr. Fernando Carvajal

---

Sr. Juan Romero

CARRERA DE INGENIERIA MECANICA

---

COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Sangolquí, 12 de Octubre del 2011.

## **DEDICATORIA**

A personas como mis padres, hermanas y familia en general que han sido la base de mi vida que de no haber sido sólida no podría seguir desarrollándose; a Rosita que nos dejó su ejemplo de vida de amor incondicional, a Papá Anibal que fue un hombre justo y trabajador y a Dios que seguramente los tiene disfrutando de su gloria.

**Juan Fernando Carvajal Salvador**

## DEDICATORIA

A mi hija Camila, por todas las veces que no pude estar a su lado y no pudo tener un papá a tiempo completo.

A mis padres. A mi madre quien a pesar de todo siempre tuvo confianza en mí, y a mi padre por su valioso apoyo en todo momento.

A mis sobrinas, María Emilia y Valentina por ser una motivación que me impulsa a seguir adelante.

A mis hermanas y hermano por todo el apoyo que me brindaron durante mis estudios.

***Juan Sebastián Romero Proaño.***

## **AGRADECIMIENTO**

A quienes depositaron en mi persona su confianza, la sostienen y que mediante su esfuerzo han hecho posible el alcance de un objetivo que no es más que un punto en el camino de la vida, pero que sin duda será la base para los siguientes...y de alcanzarlos sabrán decir por sí mismos, que una vida no ha pasado en vano.

Agradezco también a mi compañero de tesis con quien el destino quiso que nuestros caminos se crucen en esta parte del trayecto y que aspiro se vuelvan a cruzar, y a todos mis amigos con los que supimos apoyarnos mutuamente cuando la ocasión ameritó, y que me han dado la confianza para poder decir que ese apoyo continuará y solo cambiara de sitio.

**Juan Fernando Carvajal Salvador**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, quien me dio la fortaleza necesaria para salir siempre adelante pese a las dificultades.

A mis abuelos. Enrique, Helen, Víctor y Elva por ser siempre un ejemplo de superación y por brindarme todo el apoyo cuando lo necesite.

A los Ingenieros Edwin Ocaña y Patricio Quezada por sus conocimientos y por el tiempo que dedicaron a la realización de este proyecto.

A mi compañero de Tesis y amigo Fernando por la paciencia y dedicación para sacar adelante este trabajo.

A mis familiares, profesores, compañeros, amigos y todos aquellos que hicieron posible la elaboración de este trabajo.

***Juan Sebastián Romero Proaño.***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	3
1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	4
1.4. OBJETIVOS .....	4
1.4.1. OBJETIVO GENERAL. ....	4
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
1.5. ALCANCE .....	5
1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	5

### CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. ACEROS .....	8
2.1.1. PROPIEDADES .....	8
2.2. ESTRUCTURAS DE ACERO.....	12
2.2.1. CÓDIGO AWS D1.1 .....	12
2.2.2. SOLDADURA DE ESTRUCTURAS DE ACERO PARA PUENTES VEHICULARES.....	14
2.2.2.1 CÓDIGO AASHTO/AWS D1.5 .....	14
2.2.3 SOLDADURA DE ESTRUCTURAS .....	17
2.2.3.1 FCAW.....	17
2.2.3.2 Soldadura a tope.....	22
2.2.3.3 Soldadura a filete .....	25
2.2.3.4 Defectos .....	28
2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.....	42
2.3.1 ULTRASONIDO. ....	44
2.3.1.1 Método convencional .....	46
2.3.1.2 Phased array .....	47
2.3.2 END PARA CÓDIGOS AWS.....	47
2.3.2.1 AWS D1.1 .....	47
2.3.2.2 AASHTO/AWS D1.5.....	51
2.3.3 TINTAS PENETRANTES .....	57
2.4 ENSAYOS METALOGRAFÍCOS.....	58

2.4.1 ENSAYOS MICROGRÁFICOS .....	58
2.4.2 ENSAYOS MACROGRÁFICOS .....	60
2.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS.....	61
2.5.1 TIPOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS .....	61
2.5.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN. ....	61
2.5.3 ENSAYOS DE IMPACTO.....	67
2.5.4 ENSAYOS DE DOBLEZ.....	70
2.5.5 ENSAYO DE ROTURA .....	73
2.6 MEDICIÓN DE DUREZA.....	74
2.6.1 DUREZA ROCKWELL .....	75
<b>CAPÍTULO 3: FABRICACIÓN DE PROBETAS</b>	
3.1 MATERIALES.....	77
3.1.1 MATERIAL BASE .....	77
3.1.2 ELECTRODOS.....	82
3.2 FABRICACION.....	85
3.2.1 EQUIPOS.....	86
3.2.2 MANO DE OBRA .....	87
3.3 DIAGRAMAS DE FABRICACION DE PLACAS .....	89
3.4 DIAGRAMAS DE FABRICACION DE PROBETAS .....	93
<b>CAPÍTULO 4: EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS</b>	
4.1 RECURSOS TECNOLÓGICOS .....	111
4.2 RESISTENCIA AL FUEGO .....	111
4.2.1 CÓDIGO IBC.....	111
4.2.2 CÓDIGO ASTM.....	114
4.2.2.1 Capítulo E-Sección 119.....	114
4.3 EXPOSICIÓN DE PROBETAS A ALTAS TEMPERATURAS.....	126
4.3.1 COMPORTAMIENTO DEL ACERO A DISTINTAS TEMPERATURAS.....	127
4.4 ENFRIAMIENTO .....	130
4.4.1 ROCIADO CON AGUA .....	130
<b>CAPÍTULO 5: ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS</b>	
5.1 END CON ULTRASONIDO .....	132

5.1.1 DATOS DEL EQUIPO .....	132
5.1.2 PROCEDIMIENTO .....	134
5.1.2.1 Calibración del equipo OLYMPUS EPOCH 1000i .....	134
5.1.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO EN JUNTAS SOLDADAS A TOPE CON PROCESO FCAW .....	139
5.1.2.3 Reporte de resultados .....	165
5.2 END CON TINTAS PENETRANTES.....	166
5.2.1 MATERIALES Y EQUIPO .....	166
5.2.2 PROCEDIMIENTO .....	166
<b>CAPÍTULO 6: ENSAYOS MECÁNICOS</b>	
6.1 ENSAYOS MECÁNICOS DE TRACCIÓN.....	169
6.1.1 DATOS DEL EQUIPO .....	169
6.1.2 PROCEDIMIENTO .....	170
6.1.3 PARÁMETROS INICIALES .....	172
6.1.3.1 Áreas.....	172
6.1.3.2 Escala en el dinamómetro.....	172
6.1.4 RESULTADOS .....	172
6.1.4.1 Cálculo de resistencia última a la rotura en tracción .....	175
6.2 ENSAYOS METALGRÁFICOS.....	177
6.2.1 ENSAYOS MACROGRÁFICOS .....	177
6.2.1.1 Materiales y equipo .....	177
6.2.1.2 Procedimiento .....	177
6.2.2 ENSAYOS MICROGRÁFICOS .....	178
6.2.2.1 Materiales y Equipo.....	178
6.2.2.2 Procedimiento .....	178
6.3 ENSAYOS CHARPY .....	179
6.3.1 DATOS DEL EQUIPO .....	179
6.3.2 PROCEDIMIENTO .....	180
6.3.3 RESULTADOS .....	180
6.4 ENSAYOS DE DUREZA .....	181
6.4.1 DATOS DEL EQUIPO .....	181
6.4.2 PROCEDIMIENTO .....	181

6.4.3 RESULTADOS .....	182
6.5 ENSAYOS DE DOBLEZ.....	183
6.5.1 DATOS DEL EQUIPO .....	183
6.5.2 PROCEDIMIENTO .....	183
6.6 ENSAYOS DE ROTURA.....	183
6.6.1 DATOS DEL EQUIPO .....	183
6.6.2 PROCEDIMIENTO .....	184
<b>CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	
7.1 ULTRASONIDO .....	185
7.2 TINTAS PENETRANTES .....	185
7.3 ENSAYO DE TRACCIÓN.....	185
7.3.1 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1 .....	185
7.3.2 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni 1.....	187
7.3.3 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1 Y MATERIAL BASE A36.....	188
7.3.4 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1 Y MATERIAL BASE A588 .....	190
7.4 ENSAYOS METALOGRAFÍCOS.....	191
7.4.1 ENSAYOS MACROGRAFÍCOS .....	191
7.4.2 ENSAYOS MICROGRAFÍCOS .....	192
7.5 ENSAYOS CHARPY .....	193
7.5.1 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1.....	193
7.5.2 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1 .....	195
7.6 ENSAYOS DE DUREZA .....	197
7.6.1 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1.....	197
7.6.2 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1 .....	199
7.7 ENSAYOS DE DOBLEZ.....	200
7.8 ENSAYOS DE ROTURA.....	201
<b>CAPÍTULO 8: ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO</b>	
8.1 ANALISIS ECONÓMICO.....	203
8.1.1 COSTOS DIRECTOS.....	203
8.1.2 COSTOS INDIRECTOS .....	205
8.2 FINACIAMIENTO .....	206

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1	CONCLUSIONES.....	<b>207</b>
9.2	RECOMENDACIONES .....	<b>208</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1 Coeficiente de conductividad térmica del acero.....	1
Tabla 2. 1 Calificación de EPS (Especificación de Procedimiento de Soldadura) – Soldaduras a tope: Cantidad y Tipo de las Probetas de Ensayo. Rango de Espesor y Diámetro Calificado.....	24
Tabla 2. 2 Tamaños mínimos de soldaduras de filete.....	26
Tabla 2. 3 Calificación de EPS – Soldaduras de Filete: Cantidad y Tipo de las Probetas de Ensayo. Rango de Espesor Calificado.....	28
Tabla 2. 4 (estáticamente Cargado Conexiones No tubulares).....	49
Tabla 2. 5 Niveles de escaneo.....	50
Tabla 2. 6 UT Criterios aceptación-rechazo (en función de cargas cíclicas en conexiones no tubulares).....	50
Tabla 2. 7 Niveles de escaneo.....	51
Tabla 2. 8 Parámetros de verificación en ensayo de ultrasonido.....	52
Tabla 2. 9 Frecuencia de calibración de sensibilidad y distancia en ensayo de ultrasonido.....	52
Tabla 2. 10 Nivel de exploración.....	53
Tabla 2. 11 Criterio de aceptación para juntas.....	54
Tabla 2. 12 Escalas de dureza Rockwell.....	76
Tabla 3. 1 Propiedades Mecánicas del Acero A36.....	77
Tabla 3. 2 Composición Química del Acero A36.....	78
Tabla 3. 3 Datos de la composición química del acero ASTM A36 Grado A que debería tener según la norma y las que ofrece el proveedor.....	79
Tabla 3. 4 Composición Química del Acero A588.....	80
Tabla 3. 5 Datos de la composición química del acero ASTM A 588 Grado A que debería tener según la norma AWS D1.5 y las que ofrece el proveedor.....	81
Tabla 3. 6 Propiedades Mecánicas del Acero A588.....	82
Tabla 3. 7 Requisitos correspondientes a los electrodos y/o materiales de aporte o fundentes.....	83
Tabla 3. 8 Propiedades del electrodo E71T-1.....	84
Tabla 3. 9 Propiedades del electrodo NICROSOL E81T1-Ni 1.....	85
Tabla 3. 10 Número de probetas fabricadas.....	88
Tabla 4. 1 Valores en curvas tiempo-temperatura.....	116
Tabla 4. 2 Factores de reducción de la fuerza en pernos y soldaduras a diferentes temperaturas.....	122
Tabla 4. 3 Temperatura en secciones de acero no protegidas.....	125
Tabla 4. 4 Temperatura en secciones de acero protegidas.....	126
Tabla 5. 1 Datos del equipo de ultrasonido “EPOCH”.....	132
Tabla 5. 2 Criterios de Aceptación-Rechazo de la Prueba Ultrasónica.....	152

Tabla 5. 3 Criterio de Aceptación-Rechazo en curvas DAC.....	162
Tabla 6. 1 Datos del equipo AMSLER para ensayo de tracción.....	169
Tabla 6. 2 Datos del equipo MTS para ensayo de tracción.....	170
Tabla 6. 3 Áreas en mm <sup>2</sup> de sección reducida en probetas Electrodo E71T-1 .....	172
Tabla 6. 4 Áreas en mm <sup>2</sup> de sección reducida en probetas Electrodo E81T1-Ni 1 .....	172
Tabla 6. 5 Áreas en mm <sup>2</sup> en sección reducida de probetas en acero A36 y Electrodo E71T-1 .....	172
Tabla 6. 6 Areas en mm <sup>2</sup> en sección reducida de probetas en acero A 588 y Electrodo E81T1-Ni 1 .....	172
Tabla 6. 7 Fuerza en obtenida en probetas de Electrodo E71 T-1 .....	174
Tabla 6. 8 Fuerza en Kg obtenida en probetas de Electrodo E81T1-Ni 1 .....	174
Tabla 6. 9 Fuerza en kg obtenida en probetas de acero A36 y Electrodo E71T-1 .	174
Tabla 6. 10 Fuerza en Kg obtenida en probetas de acero A36 y Eletrodo E71T-1	174
Tabla 6. 11 Fuerza en V obtenida en probetas de en acero A588 y Eletrodo E81T1-Ni 1 .....	175
Tabla 6. 12 Resistencia a la rotura en probetas de .....	175
Tabla 6. 13 Resistencia a la rotura en probetas de .....	175
Tabla 6. 14 Resistencia a la rotura en probetas de acero A36 y .....	175
Tabla 6. 15 Resistencia a la rotura en probetas de acero A588 y .....	176
Tabla 6. 16 Datos del equipo AMSLER para ensayo charpy. ....	179
Tabla 6. 17 Fuerza en probetas con electrodo E81T1-Ni1 .....	180
Tabla 6. 18 Fuerza en probetas con electrodo E71T 1 .....	180
Tabla 6. 19 Energía absorbida por probetas con electrodo E81T1-Ni1 .....	181
Tabla 6. 20 Energía absorbida por probetas con electrodo E71T 1 .....	181
Tabla 6. 21 Datos del equipo para ensayo de dureza. "RAMS" .....	181
Tabla 6. 22 Dureza Rockwell HRC para probetas de electrodo E81T1-Ni1 .....	182
Tabla 6. 23 Dureza Rockwell HRB para probetas con elctrodo E71T 1 .....	182
Tabla 7. 1 Criterio de aceptación en ensayos macrográficos.....	192
Tabla 8. 1 Materiales.....	203
Tabla 8. 2 Mano de Obra .....	204
Tabla 8. 3 Otros Costos Directos .....	204
Tabla 8. 4 Insumos de Oficina.....	205
Tabla 8. 5 Costo Total.....	205
Tabla 8. 6 Financiamiento .....	206
Tabla 8. 7 Análisis del TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto) .	206

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Proceso FCAW bajo protección gaseosa .....	18
Figura 2. 2 Proceso FCAW .....	19
Figura 2. 3 Clasificación de los electrodos de aceros al carbono para FCAW .....	21
Figura 2. 4 Clasificación de los electrodos de aceros aleados para FCAW .....	21
Figura 2. 5 Raíz en uniones a tope .....	23
Figura 2. 6 Cordón de soldadura a tope .....	24
Figura 2. 7 Soldadura a filete .....	25
Figura 2. 8 Defectos de Porosidad .....	29
Figura 2. 9 Inclusiones .....	31
Figura 2. 10 Fusión Incompleta .....	31
Figura 2. 11 Penetración incompleta .....	32
Figura 2. 12 Fisuras .....	34
Figura 2. 13 Socavadura .....	35
Figura 2. 14 Concavidades .....	36
Figura 2. 15 Garganta insuficiente .....	36
Figura 2. 16 Solape .....	37
Figura 2. 17 Sobremonta excesiva .....	38
Figura 2. 18 (1) y (4) Laminaciones (2) Fisuras laminares .....	38
Figura 2. 19 Golpes de arco .....	39
Figura 2. 20 Desalineación .....	40
Figura 2. 21 Salpicaduras .....	41
Figura 2. 22 Penetración excesiva .....	41
Figura 2. 23 Porosidad alargada de raíz .....	42
Figura 2. 24 Quemones .....	42
Figura 2. 25 Aplicación típica del método de Ultrasonido .....	46
Figura 2. 26 Recorrido de la onda .....	53
Figura 2. 27 Movimiento para barrido de inspección en ensayo de ultrasonido .....	56
Figura 2. 28 Ejemplo de micrografiado .....	60
Figura 2. 29 Clasificación de ensayos destructivos .....	61
Figura 2. 30 Probeta de sección reducida para ensayo de tracción .....	63
Figura 2. 31 Probeta de metal de aporte puro, para tracción .....	65
Figura 2. 32 Ensayo Charpy. 1. Probeta 2. Entalla 3. Cuchilla del péndulo. ....	68
Figura 2. 33 Ensayos de resiliencia .....	69
Figura 2. 34 Probetas de plegado .....	72
Figura 2. 35 Ensayo Alternativo de Plegado Guiado con Rodillos en Tres Puntos y Descarga de la Probeta por la Parte Inferior .....	73
Figura 2. 36 Probeta para Ensayo de Rotura .....	74
Figura 5. 1 Esquema del equipo .....	133
Figura 5. 2 Bloque de calibración .....	1466
Figura 5. 3 Página de configuración BEAM .....	155
Figura 5. 4 Imagen del Phased Array .....	149
Figura 5. 5 Phased Array calibrado .....	151
Figura 5. 6 Calibración de la sensibilidad la onda de la compresión .....	155
Figura 5. 7 Curva DAC completada .....	156

Figura 5. 8 Barrido del palpador en la pieza de ensayo .....	160
--	-----

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 4. 1 Resistencia al fuego de columnas de acero estructural protegido con varios de espesores de tipo yeso .....	113
Gráfica 4. 2 Tres curvas nominales diferentes en incendios, como se especifica en el código europeo .....	115
Gráfica 4. 3 Comparación de curvas en incendios entre ASTM E119 e ISO 834 .	116
Gráfica 4. 4 Carga-tiempo o temperatura-tiempo en incendio nominal .....	117
Gráfica 4. 5 Carga-tiempo o temperatura-tiempo en incendio natural.....	118
Gráfica 4. 6 Conductividad térmica del acero al carbono.....	123
Gráfica 4. 7 Calor específico del acero al carbono.....	124
Gráfica 4. 8 Variación en los compuestos de acero según el porcentaje de carbono y la temperatura. ....	129
Gráfica 4. 9 Diagrama de transformación isotérmica completa para aleaciones de hierro-carbono de mezcla eutectoide: A, austenita; B, bainita; M, martensita; P, perlita .....	131
Gráfica 5. 1 Curvas DRL y SSL.....	163
Gráfica 7. 1 Resistencia del electrodo E71T-1 en cada probeta a diferentes temperaturas.....	186
Gráfica 7. 2 Resistencia en electrodo E71T-1 a diferentes temperaturas. ....	186
Gráfica 7. 3 Resistencia en electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta diferentes temperaturas .....	187
Gráfica 7. 4 Resistencia en electrodo E81T1-Ni 1 a diferentes temperaturas.....	188
Gráfica 7. 5 Resistencia a la tracción en acero A36 y electrodo E71T-1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	189
Gráfica 7. 6 Resistencia a la tracción en acero A36 y electrodo E71T-1 a diferentes temperaturas .....	189
Gráfica 7. 7 Resistencia a la tracción en acero A588 y electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	190
Gráfica 7. 8 Resistencia a la tracción en acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 a diferentes temperaturas .....	190
Gráfica 7. 9 Energía absorbida por el electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	194
Gráfica 7. 10 Energía absorbida por el electrodo E81T1-Ni 1 a diferentes temperaturas .....	194
Gráfica 7. 11 Energía absorbida por el electrodo E71T 1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	196
Gráfica 7. 12 Energía absorbida por el electrodo E71T 1 a diferentes temperaturas .....	196
Gráfica 7. 13 Dureza Rockwell HRC en electrodo E81T1 - Ni1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	197

Gráfica 7. 14 Dureza Rockwell HRC en electrodo E81T1 - Ni1 a diferentes temperaturas .....	198
Gráfica 7. 15 Dureza Rockwell HRB en electrodo E71T 1 en cada probeta a diferentes temperaturas .....	199
Gráfica 7. 16 Dureza Rockwell HRB en electrodo E71T 1 a diferentes temperaturas .....	199

## NOMENCLATURA

$\alpha$ : Coeficiente de dilatación térmica

$\delta L$ : Dilatación Térmica del acero.

$L$ : Longitud real de la soldadura

$A_1$ : tamaño de la pierna de soldadura.

$\beta$ : Factor de reducción de la longitud efectiva de la soldadura

$v$ : Velocidad de propagación de la onda.

$f$ : Frecuencia de onda.

$\lambda$ : Longitud de onda

$1aP$ : Longitud de la primera pierna.

$2aP$ : Longitud de la segunda pierna.

$T$ : Espesor de la placa.

$\theta$ : Angulo del transductor.

$SD$ : Distancia de brinco de la onda.

$H$ : Altura inicial del péndulo ensayos Charpy

$P$ : Peso del péndulo ensayos Charpy.

$h$ : Altura luego de romper la probeta de ensayos Charpy.

$L$ : Longitud del péndulo.

$CE$ : Porcentaje de Carbón equivalente en el acero.

$R$ : Resistencia al fuego (minutos)

***h***: Espesor del material resistente al fuego (pulgadas)

***D***: Perímetro calentado de la columna de acero estructural (pulgadas)

***C1 y C2***: Constantes que dependen del material

***W***: Peso de la columna de acero estructural (libras por pie lineal)

***θ<sub>g</sub>***: Temperatura del gas cerca del miembro de acero.

***t***: tiempo

***T***: Temperatura.

***kw,θ***: es obtenido de la tablas para la correspondiente temperatura de la soldadura.

***F<sub>w</sub>,R<sub>d</sub>***: Resistencia de diseño de la soldadura de filete a temperatura normal

***γ<sub>M2</sub>***: Factor de seguridad parcial en temperatura normal

***γ<sub>M,fi</sub>***: Factor de seguridad parcial para condiciones de incendio.

***Ca***: Calor específico.

***A<sub>m</sub>/V***: Factor de masividad en estructuras de acero no protegidas.

***V / A<sub>m</sub>***: Perímetro de sección expuesta en estructuras de acero no protegidas.

***a***: Nivel de la indicación de discontinuidad (dB)

***B***: Nivel de la indicación de referencia (dB)

***C***: Factor de atenuación:  $2 \cdot (\text{trayectoria acústica en pulgadas} - 1 \text{ pulgada})$  (dB)

**D:** Clasificación de la indicación (dB)

**$\sigma$ :** Resistencia ultima a la rotura.

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: Ensayo de Ultrasonido .....	211
ANEXO B :Tintas Penetrantes .....	219
ANEXO C: Ensayo de Tracción .....	223
ANEXO D: Ensayos Macrográficos .....	224
ANEXO E: Ensayos Micrográficos .....	225
ANEXO F: Ensayos de doblez .....	229
ANEXO G: Ensayos de Rotura .....	231
ANEXO H: Planos .....	233

## RESUMEN

El diseño y construcción de estructuras metálicas posee una relevancia creciente en nuestro país, llegando a ser un importante motor económico en muchas áreas. El estado de las uniones en estructuras es de gran interés industrial, por lo que se ha hecho común el uso del proceso FCAW a fin de darle continuidad a la soldadura, garantizando calidad y velocidad en la construcción.

El objetivo de este trabajo es determinar mediante ENDs la existencia de discontinuidades internas o externas en la soldadura en aceros ASTM A36 y ASTM A588 que ha sido afectada por elevadas temperaturas (300°C, 600°C y 900°C) y posteriormente enfriadas bruscamente con agua, así como evaluar sus propiedades mecánicas por medio de ensayos destructivos.

El procedimiento para la evaluación de la soldadura está descrito en las normas AWS D1.1 y AWS D1.5; basados en ésta normativa fueron fabricadas las probetas y realizados los ensayos.

Además de los ensayos requeridos en la norma, se consideró pertinente adicionar pruebas de impacto, dureza y tracción en el cordón de soldadura para verificar variaciones en la fragilidad y dureza del material de aporte.

Para la realización del presente trabajo se desarrolló un procedimiento para la utilización del equipo de ultrasonido EPOCH 1000i perteneciente al laboratorio de Ciencia de los Materiales del DECEM. Además, este procedimiento podrá ser utilizado en futuras aplicaciones si así se requiere.

Los resultados no muestran diferencias significativas entre las juntas expuestas a elevadas temperaturas y las mantenidas a temperatura ambiente, a excepción de 900 °C donde ciertas probetas fueron afectadas por el cambio de temperatura.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

En muchas aplicaciones industriales existen estructuras formadas por diferentes tipos de perfiles de acero unidos entre sí. Concretamente, en el sector de la construcción civil el uso de este tipo de estructuras está incrementándose cada vez más, por lo que la seguridad en las mismas adquiere un papel fundamental. Las propiedades de resistencia en este tipo de estructuras pueden cambiar por la exposición a elevadas temperaturas, como al presentarse un incendio. Por lo tanto es de gran interés disponer de técnicas que permitan conocer el estado de las uniones afectadas por estos cambios de temperatura. Generalmente, en el sofocamiento de los incendios ocurre un cambio brusco de temperatura que sin duda influye en el comportamiento de los materiales utilizados.

Las características que influyen negativamente en este comportamiento son:

1. Su gran conductividad térmica, la cual se refleja por el valor de su coeficiente:

**Tabla 1. 1 Coeficiente de conductividad térmica del acero.**

UNIDADES	VALOR
$\lambda(\text{kcal/m.h.}^\circ\text{C})$	50

Fuente: Tablas de la NBE-CT.79

Siendo la madera de coníferas el valor de comparación, igual a 0,12 y del carbón 1/6 del anterior.

2. Su calor específico (cantidad de calor necesario para elevar 1°C la temperatura de 1 kg de un cuerpo), el cual viene dado por:

$C(\text{kcal/kg}^\circ\text{C}) = 0,12$  cualquiera que sea la temperatura  $\theta$ .

3. Su coeficiente de dilatación:

La curva que da la dilatación térmica en función de la temperatura se define por la ecuación convencional siguiente:

$$\Delta l/l = 0,4 \cdot 10^{-8} \cdot \theta^2 + 1,2 \cdot 10^{-5} \cdot \theta - 3 \cdot 10^{-4} \quad 1.1$$

Este se expresa por  $\Delta l/l = 1,4 \times 10^{-8}$ , por grado Celsius, siendo un valor constante.

Como consecuencia el coeficiente de pérdida de sus propiedades mecánicas supone que alrededor de los 500°C éstas se reducen aproximadamente entre un 45% y un 60%.

Por ello el módulo de elasticidad a los 600°C, el coeficiente  $E(\theta)/E = 0,5$ , o sea se reduce al 50%.

El límite de elasticidad a los 600°C se reduce al 30%.

El comportamiento de los elementos estructurales de acero ante el desarrollo de un incendio en su presencia, supone que en los primeros 15 minutos la transferencia de calor por radiación-convección del recinto en llamas a los elementos estructurales de acero existentes en él implica el que éstos se equilibren térmicamente con el incendio con una equivalencia en grados de entre 800 y 900 (*Flashover*) cifra muy superior a la cual el acero ha perdido el 50% de sus características mecánicas y por tanto, la capacidad portante para la cual se proyectó.

Por este motivo es necesario proteger las estructuras de acero en todos sus elementos si se desea que en un hipotético caso de incendio el edificio tenga garantizado un tiempo de estabilidad ante el desarrollo del incendio.

En base a ello, en este trabajo se analizan los resultados obtenidos, en probetas soldadas expuestas a altas temperaturas en un horno para pruebas de resistencia al fuego capaz de realizar el calentamiento del mismo de acuerdo a la curva temperatura- tiempo prescrita en la Norma IBC 2009, y la ASTM, mediante la aplicación de ultrasonido y ensayos mecánicos.

## 1.2. ANTECEDENTES

Uno de los grandes problemas del acero frente al desarrollo de un incendio es que en función de sus características, su comportamiento no es bueno.

Los tres edificios que se vieron caer el 11 de septiembre de 2001 tenían una estructura de acero: las dos torres gemelas y el edificio N° 7.

También se puede citar el caso del edificio *One Meridian Plaza*, entre el 23 y el 24 de febrero de 1991, cuya estructura de acero ardió a lo largo de 6 horas, el incendio se había propagado del piso 22 al 26. La velocidad de propagación era más bien lenta, esto puede deberse tanto al éxito de los bomberos durante los esfuerzos de extinción como al sistema de *sprinklers* o aspersores antiincendios de que disponía el edificio, que tenían una presión anormalmente baja pero estaban por lo demás en funcionamiento. Las protecciones pasivas (las cubiertas antiincendios de las vigas y columnas) estaban en buen estado. El incendio fue controlado en cuanto se restauró la presión de agua normal en los *sprinklers* de esos pisos (en el piso 30, donde llegó el fuego, funcionaban bien y lo detuvieron) No hubo colapsos, aunque la preocupación por si ocurrían estuvo presente todo el tiempo que duró el fuego. Los daños en la estructura de acero fueron, como cabe esperar, muy importantes.

Para mencionar otro antecedente, en la madrugada del 29 de abril de 2007, un camión cisterna ardiendo provocó el derrumbe de un puente en Oakland, cortando dos carreteras. El puente, para sorpresa de pocos, era de acero.

Por lo expuesto conocemos que en el caso de incendios, el calor se propaga rápidamente por las estructuras haciendo disminuir su resistencia hasta alcanzar temperaturas donde el acero se comporta plásticamente, debiendo protegerse con recubrimientos aislantes del calor y del fuego (retardantes) como mortero, concreto, asbesto, etc.

Se han realizado estudios para el análisis del comportamiento de las soldaduras en las estructuras metálicas. El ultrasonido es utilizado en la inspección de uniones soldadas. La técnica varía de acuerdo al tipo de material: su espesor, el proceso de unión y los requerimientos del código, y en ocasiones los requerimientos propios del cliente contratante del servicio.

Posteriormente se han ejecutado ensayos destructivos para verificar los resultados obtenidos y optimizar la selección de las muestras.

Bajo estas premisas, y tras contemplar el potencial de aplicación de los ensayos no destructivos, se pretende realizar este proyecto para el diagnóstico y análisis de defectos en soldaduras, afectadas por altas temperaturas.

### **1.3. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

No hace falta mencionar la importancia del acero como material utilizable en la construcción civil en general, así como en todo tipo de construcciones (militar, naval, etc.).

Por esta razón es de vital importancia, asegurar la integridad de las juntas soldadas en las edificaciones, donde se utilice el acero como material principal. Las propiedades y la calidad en las uniones soldadas podrían cambiar o verse afectadas por factores externos, como en el caso de un incendio.

Para determinar estos cambios es necesario aplicar técnicas destructivas como no destructivas, con el fin de determinar el conjunto de parámetros físico-mecánicos apropiados que nos permitan evaluar los cordones de soldadura

Lo que se busca en este proyecto es, analizar y evaluar los cambios en la calidad y en las propiedades mecánicas, de los cordones de soldadura en estructuras de acero y puentes, que han sido expuestos a elevadas temperaturas y posteriormente enfriados.

### **1.4. OBJETIVOS**

#### **1.4.1. OBJETIVO GENERAL.**

Analizar y evaluar las propiedades mecánicas de resistencia en juntas soldadas bajo el proceso FCAW, afectadas por elevadas temperaturas (incendios), aplicando métodos de ultrasonido y ensayos mecánicos.

#### **1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar probetas soldadas a tope y filete bajo el proceso de soldadura FCAW.
- Exponer las muestras a fuego directo, a temperaturas entre los 300°C y 900°C, y posteriormente enfriarlas con agua.
- Aplicar ensayos no destructivos de ultrasonido y tintas penetrantes, en las probetas antes y después de ser sometidas a elevadas temperaturas a fin de detectar defectos en la unión soldada.
- Establecer el tamaño de grano en la soldadura expuesta a distintas condiciones, mediante ensayos metalográficos.
- Medir la dureza en distintos puntos del material de aporte en la soldadura e identificar las variaciones existentes.
- Utilizar ensayos mecánicos de tracción, impacto y doblado para evaluar el comportamiento de resistencia del material de unión, tanto a la tensión como al impacto.
- Comparar los resultados obtenidos, en condiciones normales y afectadas por elevadas temperaturas para el posterior análisis y evaluación de los mismos.

#### **1.5. ALCANCE**

Este proyecto cumplirá con la normativa necesaria que rige a nivel nacional e internacional para el estudio de las condiciones de las instalaciones de acero, en edificios y puentes, con respecto a siniestros causados por exposición a fuego directo; mediante ensayos de tracción, metalográficos y de ultrasonido; empleando equipos e instrumentos pertenecientes a laboratorios del DECEM.

#### **1.6. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

Los objetivos fundamentales de la seguridad contra incendio son: minimizar el riesgo de vida y reducir pérdidas patrimoniales. Entiéndase como riesgo de vida la exposición severa a humos o calor de los usuarios de edificios y, a menor nivel, el desprendimiento y la caída de elementos constructivos sobre los habitantes o los equipos de combate de incendio.

En los edificios de gran tamaño que presentan dificultades para evaluar el tiempo de evacuación y en que un eventual desprendimiento puede afectar al vecindario o al equipo de combate, exigen mayor seguridad y verificación del comportamiento de la estructura frente a incendios. La pérdida patrimonial es la destrucción parcial o total de la edificación, de los contenidos y terminaciones del edificio siniestrado. No basta identificar el posible daño que el fuego causa a la propiedad, sino que por razones económicas también es necesario evaluar la magnitud del daño que puede ser considerado tolerable a fin de optimizar los costos mediante dispositivos de seguridad.

Hay varias razones para realizar la inspección de una unión soldada. Quizás la razón más importante es determinar si dicha unión es de la calidad adecuada para su aplicación. Para determinar la calidad de una unión soldada, primero debemos tener alguna forma de evaluar y comparar sus características. Es poco práctico tratar de evaluar una soldadura, sin algún criterio de aceptación específico.

Los criterios de aceptación de la calidad de soldadura pueden provenir de diversas fuentes. Los dibujos de fabricación suelen mostrar el tamaño de los cordones, su longitud y ubicación. Estos requisitos dimensionales generalmente han sido establecidos a través de cálculos tomados de diseños que cumplen los requerimientos de la unión soldada.

De los códigos y normas de soldadura se obtienen los criterios de aceptación de las dimensiones y de las discontinuidades. Los códigos y las normas han sido desarrollados basándose en la fabricación de juntas soldadas. Es importante elegir un estándar de soldadura que considere la industria o la aplicación específica en la que usted está involucrado.

La exposición a elevadas temperaturas en la soldadura; producto por ejemplo de un incendio, podrían afectar a la durabilidad y las prestaciones mecánicas de las juntas soldadas. Esta situación puede agravarse, en función del tipo de enfriamiento al que haya estado expuesta. Este es el caso del enfriamiento que se produce por la acción de los bomberos cuando, durante su accionar, rocían con agua la estructura.

Este cambio brusco de temperatura podría generar microfisuras, en el cordón de soldadura.

Por estos motivos resulta importante poder determinar, con mayor precisión posible, el estado en que se encuentra una soldadura que ha sido afectada por esta situación.

Uno de los métodos que se pueden utilizar en el diagnóstico de la soldadura, es la determinación de la velocidad de propagación de los impulsos ultrasónicos. Esta técnica permite evaluar la calidad de la soldadura, de una forma no destructiva, rápida y económica.

## CAPITULO 2

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. ACEROS

El acero es el más popular de las aleaciones, es la combinación entre un metal (el hierro) y un no metal (el carbono), que conserva las características metálicas del primero, pero con propiedades notablemente mejoradas gracias a la adición del segundo y de otros elementos metálicos y no metálicos.

##### 2.1.1. PROPIEDADES

Características mecánicas y tecnológicas del acero.

Aunque es prolongado el establecer las propiedades físicas y mecánicas del acero debido a que estas varían con los ajustes en su composición y los diversos tratamientos térmicos, químicos o mecánicos, con los que pueden conseguirse aceros con combinaciones de características adecuadas para infinidad de aplicaciones, se pueden citar algunas propiedades genéricas:

- Su densidad media es de 7850 kg/m<sup>3</sup>.
- En función de la temperatura el acero se puede contraer, dilatar o fundir.
- El punto de fusión del acero depende del tipo de aleación y los porcentajes de elementos aleantes. El de su componente principal, el hierro es de alrededor de 1.510 °C en estado puro (sin alear), sin embargo el acero presenta frecuentemente temperaturas de fusión de alrededor de 1.375 °C, y en general la temperatura necesaria para la fusión aumenta a medida que se aumenta el porcentaje de carbono y de otros aleantes. (excepto las aleaciones eutécticas que funden de golpe). Por otra parte el acero rápido funde a 1.650 °C.
- Su punto de ebullición es de alrededor de 3.000 °C.
- Es un material muy tenaz, especialmente en alguna de las aleaciones usadas para fabricar herramientas.
- Relativamente dúctil. Con él se obtienen hilos delgados llamados alambres.

- Es maleable. Se pueden obtener láminas delgadas llamadas hojalata. La hojalata es una lamina de acero, de entre 0,5 y 0,12 mm de espesor, recubierta, generalmente de forma electrolítica, por estaño.
- Permite una buena mecanización en máquinas herramientas antes de recibir un tratamiento térmico.
- Algunas composiciones y formas del acero mantienen mayor memoria, y se deforman al sobrepasar su límite elástico.
- La dureza de los aceros varía entre la del hierro y la que se puede lograr mediante su aleación u otros procedimientos térmicos o químicos entre los cuales quizá el más conocido sea el templado del acero, aplicable a aceros con alto contenido en carbono, que permite, cuando es superficial, conservar un núcleo tenaz en la pieza que evite fracturas frágiles. Aceros típicos con un alto grado de dureza superficial son los que se emplean en las herramientas de mecanizado, denominados aceros rápidos que contienen cantidades significativas de cromo, wolframio, molibdeno y vanadio. Los ensayos tecnológicos para medir la dureza son Brinell, Vickers y Rockwell, entre otros.
- Se puede soldar con facilidad.
- La corrosión es la mayor desventaja de los aceros ya que el hierro se oxida con suma facilidad incrementando su volumen y provocando grietas superficiales que posibilitan el progreso de la oxidación hasta que se consume la pieza por completo. Tradicionalmente los aceros se han venido protegiendo mediante tratamientos superficiales diversos. Si bien existen aleaciones con resistencia a la corrosión mejorada como los aceros de construcción «corten» aptos para intemperie (en ciertos ambientes) o los aceros inoxidable.
- Posee una alta conductividad eléctrica. Aunque depende de su composición es aproximadamente de  $3 \cdot 10^6$  S/m. En las líneas aéreas de alta tensión se utilizan con frecuencia conductores de aluminio con alma de acero proporcionando éste último la resistencia mecánica necesaria para incrementar los vanos entre la torres y optimizar el costo de la instalación.
- Se utiliza para la fabricación de imanes permanentes artificiales, ya que una pieza de acero imantada no pierde su imantación si no se la calienta hasta cierta temperatura. La magnetización artificial se hace por contacto, inducción o mediante procedimientos eléctricos. En lo que respecta al acero inoxidable, al acero inoxidable ferrítico sí se le pega el imán, pero al acero inoxidable

austenítico no se le pega el imán ya que la fase del hierro conocida como austenita no es atraída por los imanes. Los aceros inoxidable contienen principalmente níquel y cromo en porcentajes del orden del 10% además de algunos aleantes en menor proporción.

- Un aumento de la temperatura en un elemento de acero provoca un aumento en la longitud del mismo. Este aumento en la longitud puede valorarse por la expresión:  $\delta L = \alpha \delta t^\circ L$ , siendo  $\alpha$  el coeficiente de dilatación, que para el acero vale aproximadamente  $1,2 \cdot 10^{-5}$  (es decir  $\alpha = 0,000012$ ). Si existe libertad de dilatación no se plantean grandes problemas subsidiarios, pero si esta dilatación está impedida en mayor o menor grado por el resto de los componentes de la estructura, aparecen esfuerzos complementarios que hay que tener en cuenta. El acero se dilata y se contrae según un coeficiente de dilatación similar al coeficiente de dilatación del hormigón, por lo que resulta muy útil su uso simultáneo en la construcción, formando un material compuesto que se denomina hormigón armado. El acero da una falsa sensación de seguridad al ser incombustible, pero sus propiedades mecánicas fundamentales se ven gravemente afectadas por las altas temperaturas que pueden alcanzar los perfiles en el transcurso de un incendio.

Para su uso en construcción, el acero se distribuye en perfiles metálicos, siendo éstos de diferentes características según su forma y dimensiones y debiéndose usar específicamente para una función concreta, ya sean vigas o pilares. Un tipo de acero laminado que se utiliza para las estructuras de hormigón armado son barras de diferentes diámetros con unos resaltes, que se llama acero corrugado.<sup>1</sup>

### *1 Impurezas en el acero*

Se denomina impurezas a todos los elementos indeseables en la composición de los aceros. Se encuentran en los aceros y también en las fundiciones como consecuencia de que están presentes en los minerales o los combustibles. Se procura eliminarlas o reducir su contenido debido a que son perjudiciales para las propiedades de la aleación. En los casos en los que eliminarlas resulte

---

<sup>1</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>

imposible o sea demasiado costoso, se admite su presencia en cantidades mínimas.

- Azufre: límite máximo aproximado: 0,04%. El azufre con el hierro forma sulfuro, el que, conjuntamente con la austenita, da lugar a un eutéctico cuyo punto de fusión es bajo y que, por lo tanto, aparece en bordes de grano. Cuando los lingotes de acero colado deben ser laminados en caliente, dicho eutéctico se encuentra en estado líquido, lo que provoca el desgranamiento del material.

Se controla la presencia de sulfuro mediante el agregado de manganeso. El manganeso tiene mayor afinidad por el azufre que el hierro por lo que en lugar de FeS se forma MnS que tiene alto punto de fusión y buenas propiedades plásticas. El contenido de Mn debe ser aproximadamente cinco veces la concentración de S para que se produzca la reacción.

El resultado final, una vez eliminados los gases causantes, es una fundición menos porosa, y por lo tanto de mayor calidad.

Aunque se considera un elemento perjudicial, su presencia es positiva para mejorar la maquinabilidad en los procesos de mecanizado. Cuando el porcentaje de azufre es alto puede causar poros en la soldadura.

- Fósforo: límite máximo aproximado: 0,04%. El fósforo resulta perjudicial, ya sea al disolverse en la ferrita, pues disminuye la ductilidad, como también por formar FeP (fosfuro de hierro). El fosfuro de hierro, junto con la austenita y la cementita, forma un eutéctico ternario denominado esteadita, el que es sumamente frágil y posee punto de fusión relativamente bajo, por lo cual aparece en bordes de grano, transmitiéndole al material su fragilidad.

Aunque se considera un elemento perjudicial en los aceros, porque reduce la ductilidad y la tenacidad, haciéndolo quebradizo, a veces se agrega para aumentar la resistencia a la tensión y mejorar la maquinabilidad.<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>

## **2.2. ESTRUCTURAS DE ACERO**

### **2.2.1. CÓDIGO AWS D1.1**

Los WPS (Especificaciones de Procedimientos de Soldadura) de los procesos SMAW, SAW, GMAW (Excepto GMAW-S), y FCAW que se ajusten a todas las disposiciones de la Sección 3 se considerarán como precalificados por lo que son aprobados para su uso sin realizar pruebas de calificación WPS para el proceso.<sup>3</sup>

Soldadores y operadores de soldadura para ser empleados bajo este código, y usar los procesos de soldaduras SMAW, SAW, GMAW, GTAW, FCAW, ESW o EGW, deberán haber sido calificados bajo las pruebas aplicables descritas en la parte C de esta sección.<sup>4</sup>

La aceptabilidad de calificación de desempeño es la responsabilidad del Ingeniero, para ser ejercida en base a la estructura específica, o las condiciones de servicio, o ambas cosas. Los soldadores y operadores de soldadura calificados por la prueba estándar para AWS B2.1, pueden ser aceptados para su uso en este código.

Los detalles sobre los requisitos para ensayos no destructivos y mecánicos son los siguientes:

Inspección visual. Para la calificación de aceptable las soldaduras deben cumplir los siguientes requisitos:

(1) La soldadura deberá estar libre de grietas.

(2) Todos los cráteres se llenarán completamente con la sección transversal de la soldadura.

(3) La cara de la soldadura debe estar al ras con la superficie del metal base, y la soldadura se fusionará sin problemas con el metal base. En la parte de abajo no excederá 1 / 32 pulg. [1 mm]. El refuerzo de soldadura no deberá exceder 1 / 8 "[3 mm].

(4) La raíz de la soldadura deberá ser inspeccionada, y no deberá haber evidencia de grietas, fusión incompleta, o penetración conjunta inadecuada.

---

<sup>3</sup> AWS D1.1 2002, sección 3, pág. 62

<sup>4</sup> AWS D1.1 2002, parte C, pág. 201

Una superficie de la raíz es cóncava dentro de los límites indicados a continuación, siempre que el espesor de la soldadura total es igual o mayor que el de la base de metal.

(A) La concavidad máxima en la superficie de la raíz es 1/16 pulg [2 mm] y el máximo en la parte transversal deberá ser 1/8 "[3mm].

END: Antes de preparar las muestras para pruebas mecánicas, las probetas deben ser examinadas en una forma no destructiva de la siguiente manera:

En cualquiera de RT o UT (prueba de rayos X o prueba ultrasónica) que se use, la longitud total de la soldadura en las placas de prueba, excepto las longitudes descartadas en cada extremo, se llevará a cabo de conformidad con la Sección 6, Parte E o F y parte C.<sup>5</sup>

Reducción de la sección. Previamente a la prueba, se medirá la menor anchura y su correspondiente espesor en la sección.

La muestra se romperá bajo una carga de tracción, y la carga máxima será determinada. El área en la sección transversal se obtiene multiplicando el ancho por el grosor. La resistencia a la tracción se obtendrá dividiendo la carga máxima por el área de corte transversal.

La resistencia a la tracción no deberá ser inferior al mínimo rango especificado en base al metal utilizado.<sup>6</sup>

Ensayo macrográfico, Las muestras de ensayo de soldadura se preparan con una solución adecuada se utiliza para dar una definición clara de la soldadura.

La calificación será aceptable, en la muestra de ensayo, cuando una inspección visual, se ajuste a los siguientes requisitos:<sup>7</sup>

(1) En soldaduras PJP (junta con penetración parcial), el tamaño real de la soldadura debe ser igual o mayor que el tamaño de la soldadura especificada.

(2) Las soldaduras de filete tendrán la unión hasta la raíz de la junta, pero no necesariamente más allá.

---

<sup>5</sup> AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 223

<sup>6</sup> AWS D1.1 2002, sección 4, pág. 137

<sup>7</sup> AWS D1.1 2004, sección 4, pág. 128

(3) Las soldaduras de ranura PJP y soldaduras de filete deben cumplir lo siguiente:

(A) sin grietas

(B) la fusión completa entre las capas adyacentes de soldadura de metal y entre el metal de soldadura y el metal base

(C) sin socavamientos superiores a  $1 / 32$  "[1 mm]

## **2.2.2. SOLDADURA DE ESTRUCTURAS DE ACERO PARA PUENTES VEHICULARES.**

### **2.2.2.1. CÓDIGO AASHTO/AWS D1.5**

El AASTHO y el AWS con el común denominador para desarrollar un estándar aplicado a la construcción de puentes de acero soldados realizaron el código AASTHO/AWS D1.5 que es el código de referencia para los procedimientos de soldadura para la fabricación de los pilotes del puente.

Los estándares o normas son el vehículo de comunicación entre el fabricante y el usuario, sirve de lenguaje común, definiendo la calidad, estableciendo los criterios de seguridad; asegurando menores costos si los procedimientos están estandarizados, el entrenamiento del personal también es simplificado y los consumidores aceptan el producto confiablemente cuando es estandarizado.

El objetivo de establecer estándares o normas es garantizar la protección de la vida y las propiedades, establecer un margen de deterioro en servicio y asegurar un razonable periodo de vida útil del equipo o estructura.

Las soldaduras de un puente son realizadas aplicando los estándares AASTHO/AWS D1.5M/D1.5 que está acreditada por el ANSI; los materiales utilizados están enmarcados en la clasificación de ASTM y el ASME, a continuación se explica la importancia de estas normas aplicadas a la construcción del puente.

El ANSI (AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE) es un organismo autorizado por EEUU para acreditar a las entidades dedicadas al desarrollo de estándares para la creación de estándares.

La acreditación es definida como el procedimiento mediante el cual un organismo autorizado reconoce formalmente que otro organismo, o persona, es competente para llevar a cabo una serie de tareas determinadas.

El ANSI ha acreditado el AWS, el AASTHO, ASTM y ASME que son los estándares que se hace referencia para la fabricación de las virolas para los pilotos.

El AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY) es una organización con el objetivo de realizar avances en la ciencia, la tecnología para la aplicación de la soldadura y de disciplinas relacionadas con la unión.

Para cumplir con este propósito el AWS ha desarrollado 160 documentos entre estándares, recomendaciones prácticas y guías producidas bajo los procedimientos del ANSI, entre los más consultados en el mundo está el Código estructural de soldadura en aceros AWS - D1.1, que es base para códigos más especializados según las aplicaciones como lo es el código AASTHO/AWS D1.5M/D1.5 que es el aplicado para la fabricación de puentes metálicos.

AASHTO (American Association of Highway and Transportation) es una asociación organizada para fomentar el desarrollo de las operaciones, mantenimiento del sistema vial de transporte y cooperar con otros organismos competentes en temas de interés mutuo en beneficio de la necesidad pública.

Estudia los problemas relacionados con transporte de carreteras y otros modelos de transportación, para desarrollar técnicas, administrativas y operacionales de estándares y normas.

La intención de los requisitos de estas especificaciones es que sean aplicados al diseño, evaluación y rehabilitación de puentes carreteros tanto fijos como móviles. Los requisitos de estas Especificaciones se pueden aplicar a los puentes que no están no totalmente cubiertos por este documento, cuidando de incluir criterios de diseño adicionales cuando sea necesario.

No es la intención de estas especificaciones reemplazar la capacitación y el criterio profesional del Diseñador; sólo establecen requisitos mínimos

necesarios para velar por la seguridad pública. El Propietario o el Diseñador pueden requerir que la sofisticación del diseño o la calidad de los materiales y la construcción sean más elevadas que lo establecido por los requisitos mínimos.

Los requisitos de diseño de estas especificaciones emplean la metodología del Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD). Los factores fueron desarrollados a partir de la teoría de la confiabilidad en base al conocimiento estadístico actual de las cargas y el comportamiento de las estructuras.

Se incluyen métodos de análisis adicionales, diferentes a los incluidos en especificaciones anteriores, junto con las técnicas de modelado inherentes a las mismas. Alentamos su empleo.

La intención del comentario no es proporcionar todos los antecedentes históricos posibles respecto del desarrollo de estas especificaciones o especificaciones anteriores, ni es su intención proveer un resumen detallado de los estudios y datos experimentales revisados al formular estos requisitos. Sin embargo, incluimos referencias a algunos de los datos experimentales para aquellos que deseen estudiar los antecedentes en profundidad.

El comentario dirige la atención del lector a otros documentos que contienen sugerencias para materializar los requisitos y la intención de estas especificaciones. Sin embargo, dichos documentos y este comentario no forman parte de estas especificaciones.

Las especificaciones de construcción consistentes con estas especificaciones de diseño se encuentran en las especificaciones para la Construcción de Puentes mediante el Método de Factores de Carga y Resistencia de AASHTO. A menos que se especifique lo contrario, las especificaciones sobre Materiales mencionadas en el presente documento se refieren a las Especificaciones Normalizadas sobre Materiales Utilizados en Aplicaciones de Transporte y Métodos de Muestreo y Ensayo de AASHTO.

En estas especificaciones el término “resistencia a la fluencia” se utiliza como término genérico para designar ya sea el punto de fluencia mínimo especificado o la resistencia mínima a la fluencia especificada.

La principal, y en la mayoría de los casos única, diferencia entre los requisitos de AASHTO y ASTM es que las normas AASHTO incluyen requisitos obligatorios sobre tenacidad a la entalla y soldabilidad. Los aceros que satisfacen los requisitos de AASHTO están precalificados para ser utilizados en puentes soldados.

## **2.2.3 SOLDADURA DE ESTRUCTURAS**

### **2.2.3.1 FCAW**

El proceso FCAW presenta las bondades de la soldadura por arco eléctrico con electrodo continuo (GMAW) y de la soldadura manual con electrodo revestido (SMAW), es por ello que su uso se encuentra en constante crecimiento.

En el proceso FCAW se genera un arco eléctrico entre un electrodo continuo de metal de aporte y la piqueta soldada. Este proceso es usado con la protección de un fundente contenido dentro del electrodo tubular, con o sin protección adicional de un gas externamente suministrado, y sin la aplicación de presión.

El proceso ofrece dos variantes, una en la que se emplea un gas de protección externamente suministrado y otra (autoprotegida) que se basa enteramente en el gas de protección generado por la desintegración de los fundentes dentro del electrodo. En ambas el material del núcleo del electrodo provee una escoria que protege la solidificación del metal de soldadura.

Los electrodos para FCAW también son utilizados en soldadura electrogas (EGW).

El FCAW es un proceso semiautomático, no obstante con una máquina apropiada puede automatizarse.

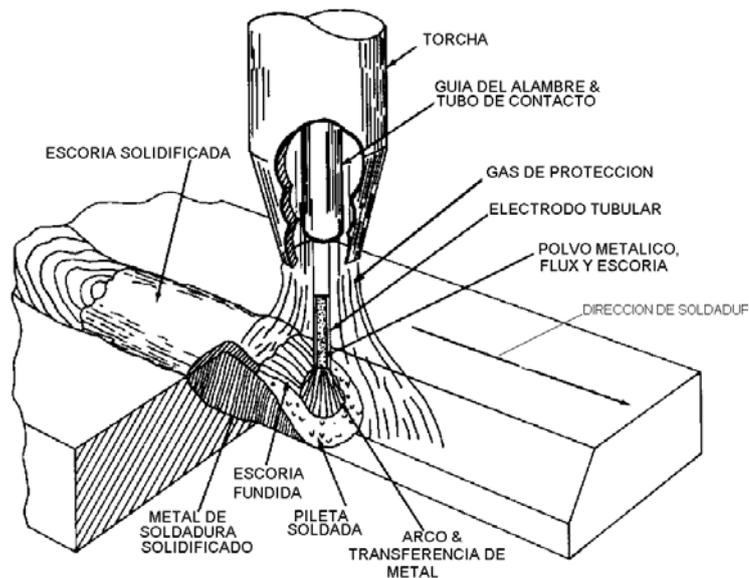
Los beneficios del FCAW se obtienen por la combinación de tres hechos generales:<sup>8</sup>

- 1) La productividad debido a un alambre de soldadura continuo.
- 2) Los beneficios metalúrgicos que pueden ser obtenidos desde el flux.
- 3) Una escoria que le da soporte y forma a la piqueta soldada.

---

<sup>8</sup> <http://www.monografias.com/trabajos46/soldadura-por-arco/soldadura-por-arco2.shtml>

En el caso del método con protección gaseosa, el gas de protección (usualmente dióxido de carbono o una mezcla de argón y dióxido de carbono) protege el metal fundido del oxígeno y nitrógeno del aire rodeando el arco y a la pileta soldada. La composición del electrodo es formulada para proveer desoxidantes que se combinen con la pequeña cantidad de oxígeno debido al gas de protección.



**Figura 2. 1 Proceso FCAW bajo protección gaseosa**

Fuente (<http://www.monografias.com/trabajos46/soldadura-por-arco/soldadura-por-arco2.shtml>)

En el método autoprotegido, la protección es obtenida desde componentes del flux vaporizados, los cuales desplazan el aire, y por la composición de la escoria que cubre las gotas del metal fundido durante la soldadura. La producción de CO<sub>2</sub> y la introducción de agentes desoxidantes y denitrificantes a partir de adecuados ingredientes del flux sobre la superficie de la pileta soldada explican porque estos electrodos pueden tolerar mayores corrientes de aire que los protegidos por gas.

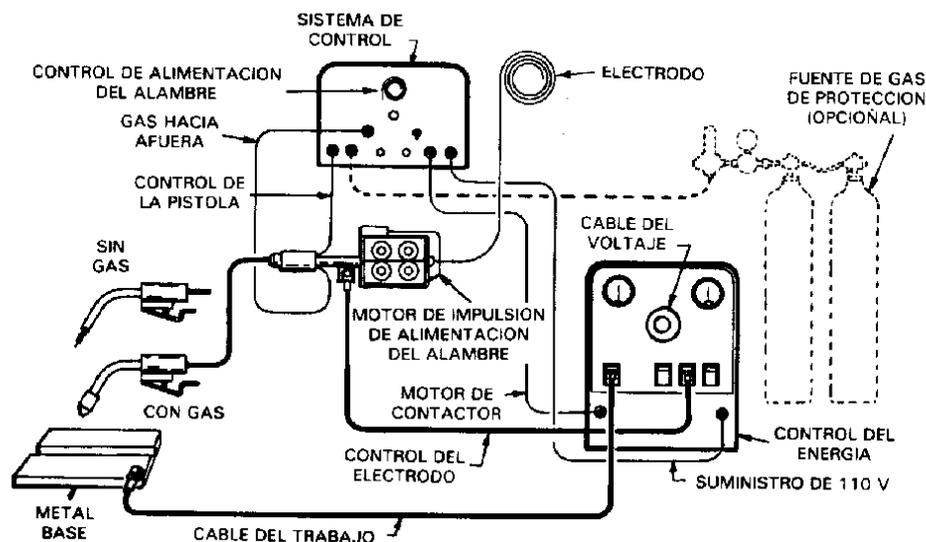
El incremento de la extensión del electrodo aumenta la resistencia al calentamiento. Esto precalienta el electrodo y disminuye la caída de voltaje a través del arco, al mismo tiempo la corriente de soldadura disminuye, lo cual baja el calor disponible para fundir el metal base, resultando en una pileta soldada angosta y poco profunda esto hace adecuado el proceso para soldar

materiales de poco espesor. Si la longitud de arco (voltaje) y la corriente de soldadura se mantienen (por la elección de un mayor voltaje en la fuente de poder y mayor velocidad de alimentación del electrodo) mayores extensiones podrán incrementar la velocidad de deposición.

En contraste, el método protegido con gas es adecuado para producción de juntas angostas y profundas. Debido a la protección gaseosa cortas extensiones de electrodos y altas corrientes de soldadura son usadas para todos los diámetros de alambres. Para soldadura de filete, comparada con SMAW, en FCAW las soldaduras son más angostas y con grandes longitudes de gargantas.

Los elementos del equipo son:

- 1.- Fuente de poder
- 2.- Alimentación del alambre y sistema de control
- 3.- Torcha y cable-
- 4.- Electrodo tubular
- 5.- Sistema de alimentación del gas de protección (en los procesos con protección gaseosa).
- 6.- Sistema de extracción de humos.



**Figura 2. 2 Proceso FCAW**

Fuente (Soldadura por arco con núcleo fundente, Universidad Nacional de Comahue, Zalazar Mónica, página 6)

La mezcla de gases permite combinar las ventajas de dos o más de ellos. Un mayor porcentaje de gas inerte mezclado con CO<sub>2</sub> u oxígeno, mejora la eficiencia en la transferencia de los desoxidantes contenidos en el núcleo. El Argón es capaz de proteger la piletta fundida a todas las temperaturas de soldadura. Su presencia en suficientes cantidades, como gas de protección, resulta en menos oxidación que con 100% de CO<sub>2</sub>.

La mezcla generalmente utilizada consta de 75% de Ar y 25% de CO<sub>2</sub>, el metal de soldadura así depositado tiene mayor tensión de rotura y de fluencia que con CO<sub>2</sub> solo. Con esta mezcla se obtiene transferencia tipo spray.

Generalmente se utiliza para soldadura fuera de posición.

Muchos de los aceros que son soldables con los procesos SMAW, GMAW o SAW pueden ser soldados con FCAW.

### **Electrodos**

Consisten en un acero de bajo carbono o baja aleación en cuyo interior se colocan materiales aleantes y fluidificantes.

La adecuada combinación de los ingredientes del núcleo, junto con el exterior permite:

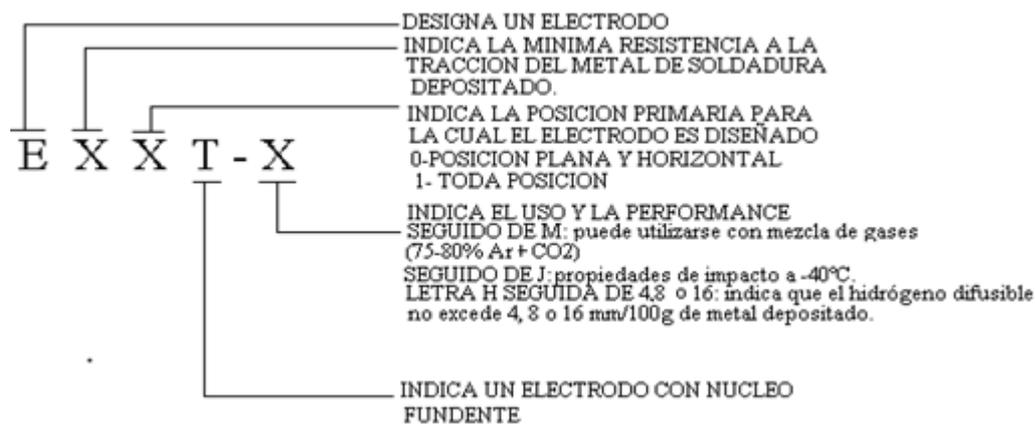
- 1) Producir soldaduras con adecuada velocidad de deposición y forma de piletta, tanto en posición plana como sobrecabeza.
- 2) Producir electrodos para distintos tipos de gases de protección y autoprotegidos.
- 3) Lograr metales de aporte con aleaciones desde un acero dulce, hasta alta aleación o aceros inoxidable.

Una primera clasificación de los electrodos es si requieren protección gaseosa (FCAW-G) o si son electrodos autoprotegidos (FCAW-S). Se debe además distinguir entre electrodos para pasadas simples y electrodos para pasadas múltiples y si el depósito tiene buena ductilidad y tenacidad.

Los electrodos con protección gaseosa suelen a su vez clasificarse en función del tipo de escoria que generan en electrodos rúflicos y electrodos básicos.

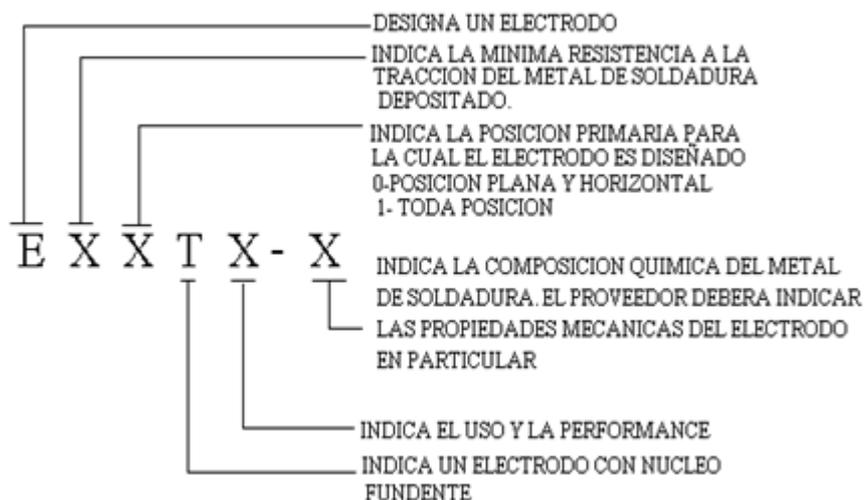
Los electrodos rúflicos son mejor aceptados por los soldadores ya que producen un arco suave, sobre un amplio rango de corrientes de soldaduras, buena forma de piletta y pueden ser utilizados en toda posición de soldadura.

La escoria solidifica a una temperatura lo suficientemente alta de manera de hacer de soporte de la piletta soldada.



**Figura 2. 3 Clasificación de los electrodos de aceros al carbono para FCAW**

Fuente (Soldadura por arco con núcleo fundente, Universidad Nacional de Comahue, Zalazar Mónica, página 19)



**Figura 2. 4 Clasificación de los electrodos de aceros aleados para FCAW**

Fuente (Soldadura por arco con núcleo fundente, Universidad Nacional de Comahue, Zalazar Mónica, página 19)

### Limitaciones del proceso FCAW

- Está limitado a la soldadura de materiales ferrosos y aleaciones base níquel.
- El proceso produce escoria la que debe ser eliminada.

- El consumible es más caro a igualdad de peso que los alambres sólidos, excepto para aceros de alta aleación.
- El equipamiento es más caro y complejo que el requerido por SMAW, sin embargo el incremento de productividad generalmente compensa esto.
- La alimentación del alambre y la fuente de poder pueden ser juntamente cerradas en el punto de soldadura.
- En el caso de protección gaseosa esta puede verse afectada por condiciones atmosféricas.
- El equipamiento es más complejo que para SMAW, y se requiere mayor mantenimiento.
- Se generan más humos de soldadura. (comparados con GMAW y SAW)

### **2.2.3.2 Soldadura a tope**

Consiste en unir las chapas situadas en el mismo plano, para chapas superiores a 6 mm o para soldar por ambos lados, hay que preparar los bordes. El objetivo de esta soldadura es conseguir una penetración completa y que constituya una transición lo más perfecta posible entre los elementos soldados. La soldadura debe ser continua a todo lo largo de la unión; en uniones de fuerza, debe realizarse por ambas caras el cordón de soldadura; en caso de no ser posible el acceso por la cara posterior, la soldadura se realiza por medio de chapa dorsal. El cordón de soldadura a tope no necesita dimensionarse.<sup>9</sup>

La soldadura a tope no debe producir discontinuidad en la sección y su sobre-espesor no será mayor que el 10% del espesor de la chapa más delgada; si las chapas son de distinta sección, la de mayor sección se adelgazará en la zona de contacto con pendientes no mayores que el 25% para obtener una transición suave de sección.

La norma EA-95 dice que una soldadura a tope que una totalmente dos piezas realizadas con las condiciones recogidas en la norma y cuyo espesor no sea menor que el espesor de la pieza más delgada, no requiere cálculo.

Con penetración completa la ejecución debe garantizar que la profundidad de la zona afectada por la fusión y mezcla alcanza a todo el espesor de las piezas

---

<sup>9</sup> <http://www.construccion-civil.com/2011/03/tipos-de-soldaduras-tope.html>

unidas; para ello, cuando sólo se suelda por una cara, además de la preparación de bordes adecuada se debe realizar un cordón de cierre por la otra, si es accesible, para evitar el menisco que puede formar el material fundido o, si no es accesible, colocar un elemento como recogedor de raíz, impidiendo la formación de menisco.



**Figura 2. 5 Raíz en uniones a tope**

Fuente (Curso de inspección de soldadura, Endesa, Chile)

A efectos de cálculo se establecen consideraciones diferentes, según se trate de uniones en prolongación o en T.

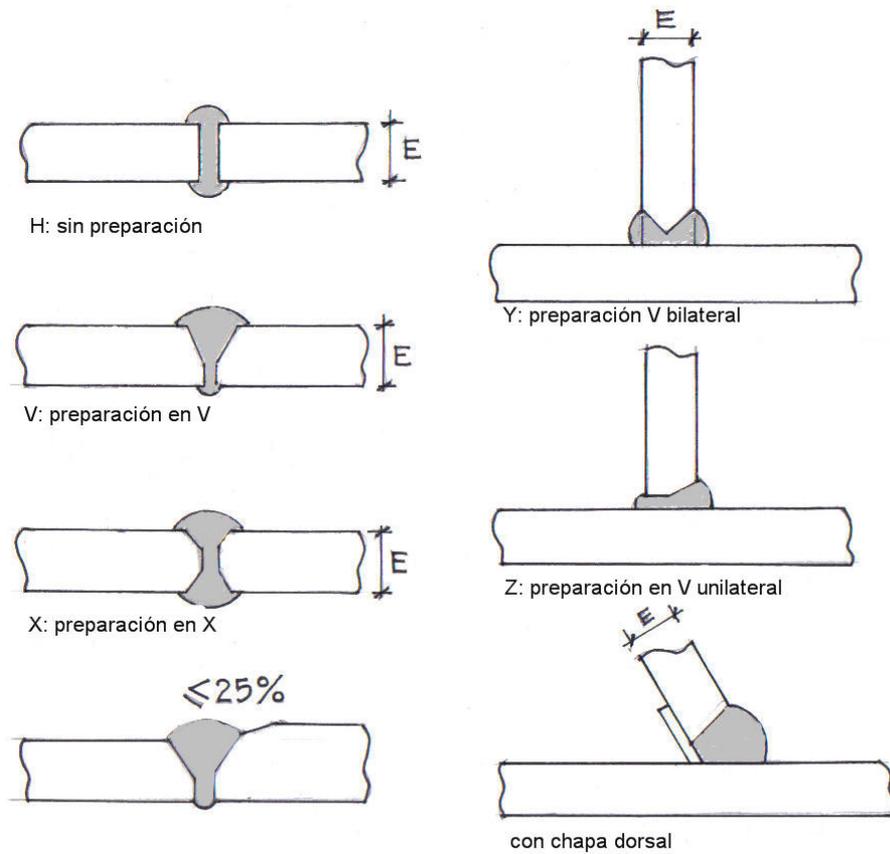
a) Unión en prolongación

En las de penetración completa la elección adecuada del electrodo garantiza que el cordón tiene una resistencia igual o superior a la del metal base y las disposiciones constructivas aseguran un espesor también igual o mayor que el de las chapas, por lo que someter estas uniones a cualquier sollicitación la rotura se producirá por ellas que son la parte más débil. En consecuencia no requieren cálculo, o lo que es lo mismo, se considera que la resistencia de los cordones a tope con penetración completa es como mínimo la de la pieza unida más débil.

b) Unión en T

Las uniones de penetración completa no requieren cálculo, por los mismos criterios indicados para uniones a tope en prolongación.

Las de penetración parcial se calculan de forma similar a las soldaduras en ángulo.



**Figura 2. 6 Cordón de soldadura a tope**

Fuente ([http://www.construmatica.com/construpedia/Uniones\\_por\\_Soldadura](http://www.construmatica.com/construpedia/Uniones_por_Soldadura))

**Tabla 2. 1 Calificación de EPS (Especificación de Procedimiento de Soldadura) – Soldaduras a tope: Cantidad y Tipo de las Probetas de Ensayo. Rango de Espesor y Diámetro Calificado**

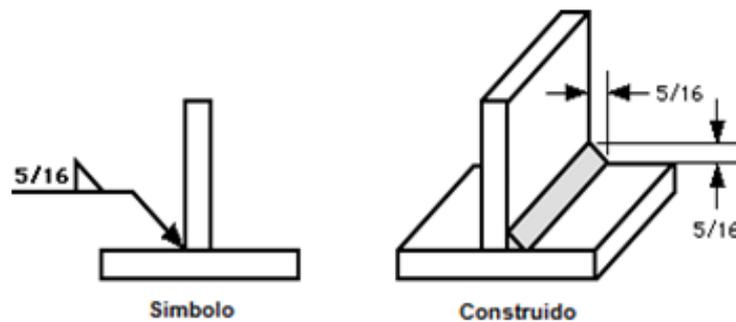
1. Ensayo en Chapa <sup>1,2</sup>						
Espesor (T) Nominal de la Chapa para Ensayo, mm	Cantidad de Probetas				Espesor Nominal <sup>3,4</sup> Calificado en Chapas, Tubos o Caños, mm	
	Tracción con Probeta de Sección Reducida (ver Fig. 4.14)	Plegado de Raíz (ver Fig. 4.12)	Plegado de Cara (ver Fig. 4.12)	Plegado Lateral (ver Fig. 4.13)	Mín	Máx
$3 \leq T \leq 10$	2	2	2	—	3	2T
$10 < T < 25$	2	—	—	4	3	2T
$\geq 25$	2	—	—	4	3	Ilimitado

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 4, pág. 132)

### 2.2.3.3 Soldadura a filete

Las soldaduras de filete son usadas para hacer juntas de enfrentamiento perpendicular como esquinas y las juntas "T", estas soldaduras son, básicamente, triangulares vistas desde su sección, aunque su forma no es siempre un triángulo perfecto o isósceles.

Se obtienen depositando un cordón de metal de aportación en el ángulo diedro formado por dos piezas.



**Figura 2. 7 Soldadura a filete**

Fuente (<http://dosmanmecanni.blogspot.com/>)

#### Tamaño mínimo

Los tamaños mínimos admisibles de soldaduras de filete son los que se muestran en la tabla 2.2. El tamaño de la soldadura queda determinado por la más gruesa de las partes unidas, pero no es necesario que exceda el grueso de la parte más delgada. El objeto de este requisito es evitar cambios perjudiciales en la estructura cristalina del acero, producidos por el rápido enfriamiento de las soldaduras pequeñas depositadas en material grueso.

**Tabla 2. 2Tamaños mínimos de soldaduras de filete**

Espesor de la más gruesa de las partes unidas mm (pulg.)		Tamaño <sup>1</sup> mínimo del filete mm (pulg.)
menor o igual que 6.3	( $\leq 1/4$ )	3.2 ( $1/8$ )
más de 6.3 hasta 12.7	( $1/4$ a $1/2$ )	4.8 ( $3/16$ )
más de 12.7 hasta 19.1	( $1/2$ a $3/4$ )	6.3 ( $1/4$ )
mayor que 19.1	( $> 3/4$ )	7.9 ( $5/16$ )

<sup>1</sup> Dimensión de la pierna del filete de soldadura.  
Deben usarse soldaduras depositadas en un solo paso.

Fuente: "Structural Welding Code-Steel", AWS D1.1

### Tamaño máximo

El tamaño máximo de las soldaduras de filete colocadas a lo largo de los bordes de placas o perfiles es:

En los bordes de material de grueso menor que 6.3 mm. ( 1/4 pulg.), el grueso del material.

En los bordes de material de grueso igual o mayor que 6.3 mm (1/4 pulg.), el grueso del material menos 1.5 mm (1/16 pulg.), excepto cuando se indique en los dibujos de fabricación que la soldadura deberá depositarse tomando las medidas necesarias para obtener un tamaño igual al grueso del material. La distancia entre el borde de la soldadura depositada y el de la placa puede ser menor que 1.5 mm, pero el tamaño de la soldadura debe poderse verificar sin dificultad.

### Longitud

La longitud mínima efectiva de una soldadura de filete utilizada para transmitir fuerzas será no menor que cuatro veces su tamaño nominal. En caso contrario, se considerará que el tamaño de la soldadura no excede de un cuarto de su longitud efectiva.

Cuando se usan filetes de soldadura depositados únicamente en los bordes longitudinales de conexiones de placas en tensión, la longitud de cada filete no debe ser menor que la distancia entre ellos, medida perpendicularmente a su eje. La separación transversal de filetes longitudinales utilizados en conexiones en extremos de los miembros no debe exceder de 200 mm, a menos que se tomen medidas especiales para evitar una flexión transversal excesiva, como colocar una soldadura transversal en el extremo o usar soldaduras intermedias de tapón o ranura. Si no se toman esas medidas, deben satisfacerse los requisitos de la sección 2.1.

La longitud efectiva de las soldaduras de filete paralelas a la dirección de la fuerza, utilizadas para transmitir una carga axial al extremo de un miembro, es igual a la longitud total cuando ésta no excede de 100 veces el tamaño de la pierna. Si es más larga, la longitud efectiva se obtiene multiplicando la real por un factor de reducción  $\beta$ , que vale:

$$\beta = 1.2 - 0.002(L/a) \leq 1.0 \quad \mathbf{2.1}$$

Donde:

L= longitud real de la soldadura

a= tamaño de su pierna.

Si  $L > 300a$ ,  $\beta$  se toma igual a 0.60.

Ejemplos de las soldaduras mencionadas arriba son los cordones longitudinales de juntas traslapadas en el extremo de miembros cargados axialmente, y las soldaduras que unen atiesadores de apoyo al alma de las vigas.

El factor de reducción no se aplica, entre otros casos, a soldaduras que unen entre sí placas o perfiles para formar una sección compuesta, o a las soldaduras que unen los atiesadores intermedios al alma de las vigas, cuando no se usa la resistencia posterior al sondeo, pues no están sujetas a esfuerzos axiales, ya que su único objeto es mantener el alma plana.

**Tabla 2. 3Calificación de EPS – Soldaduras de Filete: Cantidad y Tipo de las Probetas de Ensayo. Rango de Espesor Calificado**

Probeta de Ensayo	Tamaño de Filete	Cantidad de Soldaduras para EPS	Probetas de Ensayo Requeridas <sup>2</sup>			Tamaños Calificados	
			Macroataque 4.7.1 y 4.4.6.4	Traición en el Metal de Soldadura (ver Fig. 4.18)	Plegado Lateral (ver Fig. 4.13)	Espesor <sup>1</sup> Chapa/Tubo o Caño	Tamaño de Filete
Ensayo T en Chapa (Figura 4.19)	Pasada única, tamaño max. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras	—	—	Ilimitado	≤ que el mayor ensayado, pasada única
	Pasada múltiple tamaño min. a ser usado en construcción	1 en cada posición a ser usada	3 caras	—	—	Ilimitado	≥ que el menor ensayado, pasada múltiple

Fuente (Norma AWS D1.1 2004, sección 4, pág. 133)

#### 2.2.3.4 Defectos

Para introducir el tema “defectos en las soldaduras” es necesario, a los efectos de evitar errores de interpretación, comenzar definiendo términos tales como *discontinuidad* y *defecto*.

**Discontinuidad** - Falta de continuidad; falta de cohesión (de unión); interrupción en la estructura física normal del material o producto.

**Defecto** - Discontinuidad cuyo tamaño, forma, orientación, ubicación o propiedades son inadmisibles para alguna norma específica.

En particular, al realizar un ensayo no destructivo (END) se cataloga como defecto a toda discontinuidad o grupo de discontinuidades cuyas indicaciones no se encuentran dentro de los criterios de aceptación especificados por la norma aplicable.

Las discontinuidades más frecuentes que se encuentran en las soldaduras, o que están muy relacionadas con ellas, forman parte de los siguientes veinte tipos:

##### 1) Porosidad:

Discontinuidad del tipo de cavidad formada por gas atrapado durante la solidificación del metal de soldadura. Se divide a su vez en cuatro tipos:

a) Porosidad uniformemente dispersa

Es porosidad uniformemente distribuida a lo largo de la soldadura; causada por la aplicación de una técnica de soldadura incorrecta o por materiales defectuosos. Si la soldadura se enfría lo suficientemente lento para permitir que la mayor parte del gas pase a la superficie antes de la solidificación, habrá unos pocos poros en la soldadura.

b) Porosidad agrupada

Es un agrupamiento localizado de poros. Generalmente resulta por un inicio o fin inadecuado del arco de soldadura.

c) Porosidad alineada

Frecuentemente ocurre a lo largo de la interfase metal de soldadura / metal base, la interfase entre cordones de soldadura, o cerca de la raíz de soldadura, y es causada por la contaminación que provoca el gas por su evolución en esos sitios. Placa radiográfica con porosidad alineada en la raíz.

d) Porosidad vermicular o tipo gusanos

Es un poro de gas alargado. Este tipo de porosidad de soldadura se extiende desde la raíz hasta la superficie de la soldadura. Cuando uno o más poros son vistos en la superficie de la soldadura, un cuidadoso descarne puede también revelar porosidad subsuperficial. De todas formas, muchas de las porosidades vermiculares encontradas en soldaduras no se extienden hasta la superficie.



**Figura 2. 8 Defectos de Porosidad**

Fuente (<http://www.thefabricator.com/article/Array/22-possibles-causas-de-la-porosidad-del-metal-de-soldadura>, Bernard)

## **2) Inclusiones**

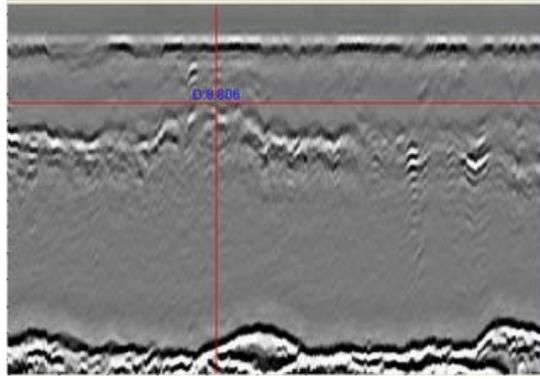
### **a) Inclusiones de escoria**

Son sólidos no metálicos atrapados en el metal de soldadura o entre el metal de soldadura y el metal base. Pueden encontrarse en soldaduras hechas por cualquier proceso de arco. En general, estas inclusiones resultan por fallas en la técnica de soldadura, en el diseño de la junta tal que no permita un acceso adecuado, o en una limpieza inadecuada entre los cordones de la soldadura. Normalmente, la escoria disuelta fluirá hacia la parte superior de la soldadura, pero muescas agudas en la interfase de metal base y de soldadura, o entre los cordones de soldadura, frecuentemente provocan que la escoria quede atrapada bajo el metal de soldadura. A veces se observan inclusiones de escoria alargadas alineadas en la raíz de la soldadura, denominadas “carrileras” (“wagon tracks”); se adjunta una vista de una placa radiográfica con estas inclusiones carrileras.

### **b) Inclusiones de Tungsteno**

Son partículas de Tungsteno atrapadas en el metal de soldadura y son exclusivas del proceso GTAW (TIG). En este proceso, un electrodo de Tungsteno no consumible es usado para crear el arco entre la pieza y el electrodo. Si el electrodo es sumergido en el metal, o si la corriente es fijada en un valor muy alto, se depositarán gotitas de Tungsteno, o se romperá la punta del electrodo y quedará atrapado en la soldadura. Dichas inclusiones aparecen como manchas claras en la radiografía, pues el Tungsteno es más denso que el acero y absorbe más radiación; se adjunta una vista de una placa radiográfica con inclusiones de tungsteno.

Casi todas las demás discontinuidades, incluyendo las inclusiones de escoria, se muestran como áreas oscuras en las radiografías porque son menos densas que el acero.



**Figura 2. 9 Inclusiones**

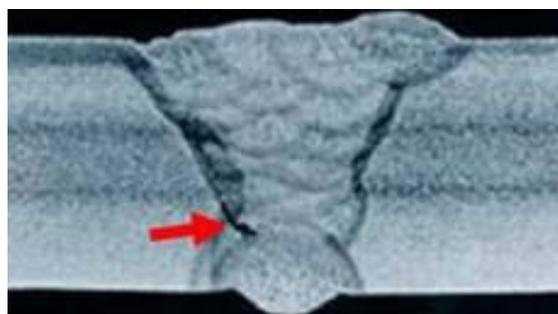
Fuente ([http://endalloy.blogspot.com/2010\\_05\\_01\\_archive.html](http://endalloy.blogspot.com/2010_05_01_archive.html))

### **3) Fusión incompleta (o falta de fusión)**

Discontinuidad bidimensional causada por la falta de unión entre los cordones de soldadura y el metal base, o entre los cordones de la soldadura. Es el resultado de técnica de soldadura, preparación del metal base, o diseño de la junta inapropiados.

Entre las deficiencias que causan la fusión incompleta se destacan el insuficiente aporte de calor de soldadura, falta de acceso a todas las superficies de fusión, o ambas.

El óxido fuertemente adherido interferirá con una completa fusión, siempre que haya un correcto acceso a las superficies de fusión y un adecuado aporte de calor a la soldadura.



**Figura 2. 10 Fusión Incompleta**

Fuente: (<http://facingyconst.blogspot.com/2010/07/consideraciones-sobre-el-crecimiento-de.html>)

#### 4) Penetración incompleta o falta de penetración

Ocurre cuando el metal de soldadura no se extiende a través de todo el espesor de la junta. El área no fundida ni penetrada es una discontinuidad descrita como “penetración incompleta”.

Esta puede resultar de un insuficiente aporte de calor de soldadura, diseño de la junta inapropiado (por ejemplo demasiado espesor para ser penetrado por el arco, o chanfle insuficiente), o control lateral inapropiado del arco de soldadura. Algunos procesos tienen una mayor capacidad de penetración que otros. Las soldaduras en cañerías son especialmente vulnerables a este tipo de discontinuidad, dado que el lado interior es usualmente inaccesible.

Los diseñadores frecuentemente emplean una planchuela de respaldo para auxiliar a los soldadores en tales casos; en ANCAP –División Industrialización se prohíben estos respaldos en cañerías.

Para juntas soldadas de ambos lados, se puede especificar que se remueva el metal de soldadura y el metal base de la soldadura de raíz antes de soldar el otro lado, para asegurarse que allí no hay penetración incompleta. Este procedimiento se denomina en inglés “back gouging”. La penetración incompleta también causa una fusión incompleta, y por consiguiente en muchas circunstancias ambos conceptos se mezclan.



**Figura 2. 11 Penetración incompleta**

Fuente (<http://pipeisometric.com/defectologa.html>)

## 5) Fisuras

Ocurren en el metal base y en el metal de aporte, cuando las tensiones localizadas exceden la resistencia última del material. La mayor parte de las normas utilizadas en ANCAP consideran que las fisuras son, independientemente de su longitud, defectos y por lo tanto una vez detectadas deben removerse, eliminarse.

Las fisuras pueden clasificarse en:

a) Fisuras en caliente: se desarrollan durante la solidificación y su propagación es intergranular (entre granos).

b) Fisuras en frío: se desarrollan luego de la solidificación, son asociadas comúnmente con fragilización por hidrógeno. Se propagan entre y a través de los granos (inter y transgranular).

Según su forma, las fisuras también se pueden clasificar en:

a) Fisuras longitudinales: son paralelas al eje de la soldadura. En soldaduras de arco sumergido, son comúnmente asociadas con altas velocidades y a veces están relacionadas con problemas de porosidad, que no se muestran en la superficie. Fisuras longitudinales en pequeñas soldaduras entre grandes secciones, son frecuentemente el resultado de un alto grado de enfriamiento y de grandes restricciones. Vista de una placa radiográfica mostrando fisuras longitudinales.

b) Fisuras transversales: generalmente son el resultado de esfuerzos debido a contracciones longitudinales actuando en metales de soldadura de baja ductilidad. Vista de una placa radiográfica con tres fisuras transversales.

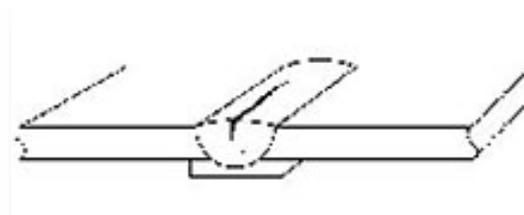
c) Cráteres: ocurren cuando el arco es terminado incorrectamente. Generalmente tienen forma de estrella. Son superficiales, se forman en caliente y usualmente forman redes con forma de estrella.

d) De garganta: son fisuras longitudinales ubicadas en la cara de la soldadura. Generalmente, pero no siempre, son fisuras en caliente.

e) De borde: son generalmente fisuras en frío. Se inician y propagan desde el borde de la soldadura, donde se concentran los esfuerzos de contracción. Se inician perpendicularmente a la superficie del metal base. Estas fisuras son generalmente el resultado de contracciones térmicas actuando en la zona afectada térmicamente (ZAT).

f) De raíz: son longitudinales, en la raíz de la soldadura o en la superficie de la misma. Pueden ser fisuras en caliente o en frío. Vista de una placa radiográfica con fisuras longitudinales de raíz.

g) Fisuras bajo el cordón y fisuras en la ZAT: son generalmente fisuras en frío que se forman en la ZAT del metal base. Son generalmente cortas, pero pueden unirse para formar una fisura continua. Las que se dan bajo el cordón, pueden convertirse en un serio problema cuando están presentes: hidrógeno, microestructura poco dúctil y altos esfuerzos residuales. Ambas pueden ser fisuras en caliente o en frío. Son encontrados a intervalos regulares bajo la soldadura y también por el contorno de la ZAT donde los esfuerzos residuales son máximos.



**Figura 2. 12 Fisuras**

Fuente (<http://www.duerosoldadura.es/tema4.php>)

## 6) Socavadura / mordedura

Asociadas generalmente con técnicas inapropiadas y/o corrientes excesivas de soldadura. La socavadura es una muesca o canaleta o hendidura ubicada en los bordes de la soldadura; es un concentrador de tensiones y además disminuye el espesor de las planchas o caños, todo lo cual es perjudicial. Pueden darse en la raíz o en la cara de la soldadura.

Cuando la socavadura es controlada, su longitud está dentro de los límites especificados y no constituye una muesca profunda, no es considerada un defecto de soldadura.



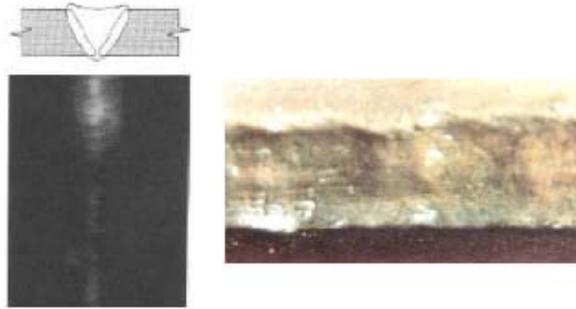
**Figura 2. 13 Socavadura**

Fuente

([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

## 7) Concavidad

Se produce cuando el metal de soldadura en la superficie de la cara externa, o en la superficie de la raíz interna, posee un nivel que está por debajo de la superficie adyacente del metal base. Cuando el soldador tiene acceso por ambos lados de la soldadura, o cuando se da en la cara externa, esta discontinuidad es fácilmente evitable mediante el relleno completo de la unión; por el contrario cuando la concavidad es interna (en la raíz) donde el soldador no tiene acceso (por ejemplo en soldadura de cañerías), si se tiene que eliminar debe removerse, descarnarse, por completo la soldadura en esa zona.



**Figura 2. 14 Concavidades**

Fuente

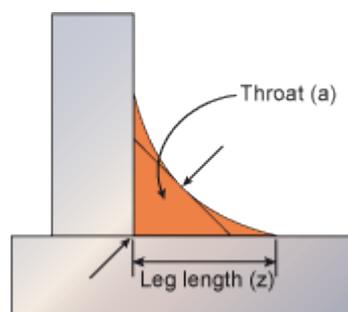
([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

### **8) Garganta insuficiente**

Puede ser debido a una depresión en la cara de la soldadura de filete, disminuyendo la garganta, cuya dimensión debe cumplir la especificación dada por el proyectista para el tamaño del filete. Las fallas del soldador pueden ser:

- a) no obtener fusión del metal base en la raíz de la soldadura
- b) no depositar suficiente metal de relleno en el área de garganta (en la cara del filete).

En el siguiente croquis se observa una garganta efectiva de la soldadura y sus catetos.



**Figura 2. 15 Garganta insuficiente**

Fuente (<http://www.twi.co.uk/content/jk91.html>)

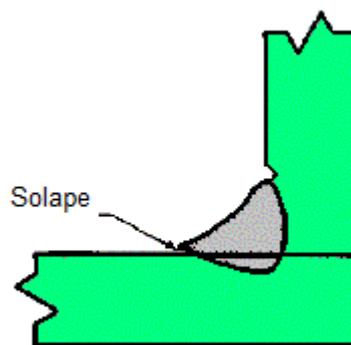
### 9) Catetos demasiado cortos

Es un tamaño menor que el adecuado para su uso, en los catetos de la soldadura de filete. Es de índole similar a la discontinuidad anterior.

### 10) Solape (Metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin fundirlo)

Es la porción que sobresale del metal de soldadura más allá del límite de la soldadura o de su raíz. Se produce un falso borde de la soldadura, estando el metal de soldadura apoyado sobre el metal base sin haberlo fundido (como que se derramó el metal fundido sobre el metal base). Puede resultar por un deficiente control del proceso de soldadura, errónea selección de los materiales, o preparación del metal base inapropiados. Si hay óxidos fuertemente adheridos al metal base, provocarán seguramente esta discontinuidad.

Este metal de soldadura, que ha sido derramado sobre el metal base, es una discontinuidad superficial que forma un concentrador de tensiones similar a una fisura y, por consiguiente, casi siempre es considerada inadmisibles (defecto).



**Figura 2. 16 Solape**

Fuente ([http://www.weldingengineer.com/Discontinuities\\_.htm](http://www.weldingengineer.com/Discontinuities_.htm))

## 11) Sobremonta excesiva

La sobremonta es un concentrador de tensiones y, además, un exceso de ésta aumenta las tensiones residuales, presentes en cualquier soldadura, debido al aporte sobrante. Por estos motivos las normas limitan el valor de R, que en general no debe exceder de 1/8" (3mm).

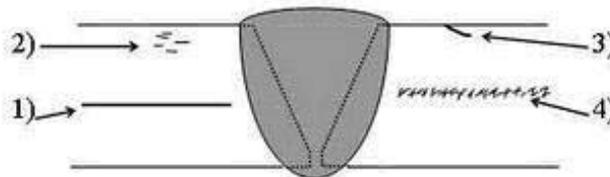


**Figura 2. 17 Sobremonta excesiva**

Fuente([http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases\\_datos/doc.php?id=BOE-A-1996-3449](http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases_datos/doc.php?id=BOE-A-1996-3449))

## 12) Laminaciones

Son discontinuidades planas y alargadas en el metal base, encontrándose normalmente en la parte media del espesor de los materiales forjados (como lo son las planchas de acero utilizadas para construcción de recipientes o tanques, que se producen por laminado (rolado), el cual es un proceso de forja). Las "laminaciones" pueden ser totalmente internas y en este caso serán detectadas sólo mediante UT. Usualmente las normas establecen que no se permitan realizar soldaduras sobre bordes de planchas donde haya afloramiento de "laminaciones", porque éstas podrían comportarse como fisuras que se propagarán por la soldadura.



**Figura 2. 18 (1) y (4) Laminaciones (2) Fisuras laminares**

Fuente (<http://zonaingenieria.wordpress.com/category/metallica/>)

### **13) Fisuras laminares**

Son fracturas en forma de terraza en el metal base, con orientación básicamente paralela a la superficie forjada. Son causadas por altos esfuerzos en la dirección del espesor que resultan del proceso de soldadura.

Se pueden extender largamente, iniciándose en regiones donde el metal base tiene inclusiones no metálicas coplanares y/o en áreas del metal base sujetas a altos esfuerzos por la soldadura.

La fractura usualmente se propaga desde un plano laminar a otro por corte a lo largo de líneas que son casi normales a la superficie laminada.

### **14) Golpes de arco / apertura de arco / arranque de arco / chisporroteo (en el material base fuera de la soldadura)**

Imperfección localizada en la superficie del metal base, caracterizada por una ligera adición o falta de metal, resultante de la apertura accidental del arco eléctrico. Normalmente se depositará sobre el metal base una serie de pequeñas gotas de acero que pueden originar microfisuras; para evitar la aparición de microfisuras esas pequeñas gotas deben ser eliminadas mediante amolado de la superficie afectada. Esta discontinuidad se observa también en esta lámina.



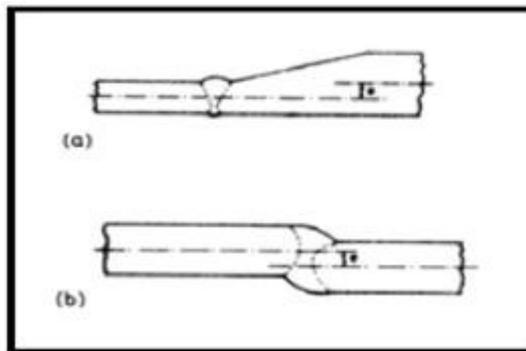
**Figura 2. 19 Golpes de arco**

Fuente (Curso interno de ANCAP)

## 15) Desalineación

Esta discontinuidad se da cuando en las uniones soldadas a tope las superficies que deberían ser paralelas se presentan desalineadas; también puede darse cuando se sueldan dos caños que se han presentado excéntricamente, o poseen ovalizaciones. Las normas limitan esta desalineación, normalmente en función del espesor de las partes a soldar.

Es frecuente que en la raíz de la soldadura esta desalineación origine un borde sin fundir.



**Figura 2. 20 Desalineación**

Fuente (<http://facingyconst.blogspot.com/2010/07/consideraciones-sobre-el-crecimiento-de.html>)

## 16) Salpicaduras

Son los glóbulos de metal de aporte transferidos durante la soldadura y adheridos a la superficie del metal base, o a la zona fundida ya solidificada. Es inevitable producir cierto grado de salpicaduras, pero deben limitarse eliminándose, aunque más no sea por estética, de la superficie soldada. Las salpicaduras pueden ser origen de microfisuras (como los arranques de arco sobre el metal base), y simultáneamente son un punto de inicio de la oxidación en superficies pintadas ya que tarde o temprano estos glóbulos podrán desprenderse del metal base, llevando consigo la pintura superficial allí localizada.



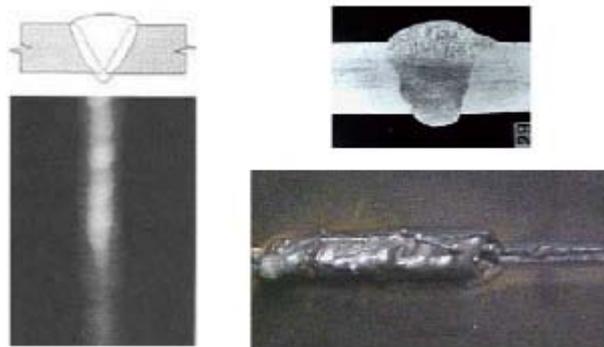
**Figura 2. 21 Salpicaduras**

Fuente

([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

### **17) Penetración excesiva**

En una soldadura simple desde un solo lado (típicamente soldaduras de cañerías), esta discontinuidad representa un exceso de metal aportado en la raíz de la soldadura que da lugar a descolgadas de metal fundido.



**Figura 2. 22 Penetración excesiva**

Fuente

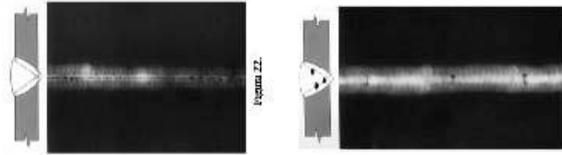
([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

### **18) Rechupes (de cráter)**

Es la falta de metal de soldadura resultante de la contracción de la zona fundida, localizada en la cara de la soldadura.

### 19) Porosidad alargada en la raíz

Es definida como una porosidad alargada alineada a lo largo de la línea central de la soldadura que ocurre a lo largo del cordón de raíz de la soldadura.



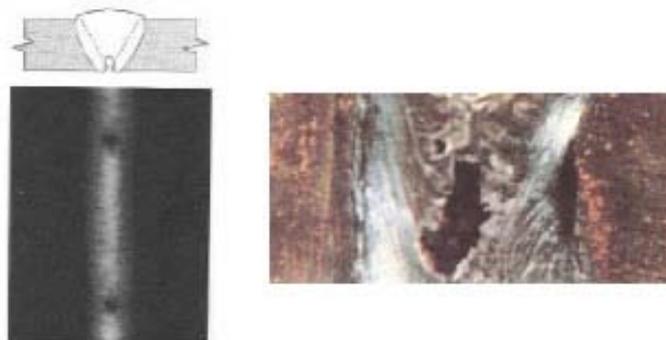
**Figura 2. 23 Porosidad alargada de raíz**

Fuente

([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

### 20) Quemón

Es definida como una porción del cordón de raíz donde una excesiva penetración ha causado que el metal de soldadura sea soplado hacia el interior, o puede que se descuelgue un excesivo metal fundido. Suele presentarse como una depresión no alargada, en forma de cráter, en la raíz. Vista de una placa radiográfica con un par de quemones.



**Figura 2. 24 Quemones**

Fuente

([http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=186:imperfecciones-en-soldadura-tipos-de-discontinuidades&catid=20:investigaci-desarrollo&Itemid=70))

## 2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.

Se denomina ensayo no destructivo a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se

basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

En general los ensayos no destructivos proveen datos menos exactos acerca del estado de la variable a medir que los ensayos destructivos. Sin embargo, suelen ser más baratos para el propietario de la pieza a examinar, ya que no implican la destrucción de la misma. En ocasiones los ensayos no destructivos buscan únicamente verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos.

La amplia aplicación de los métodos de ensayos no destructivos en materiales se encuentra resumida en los tres grupos siguientes:

- Defectología. Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales, determinación de tensiones, detección de fugas.
- Caracterización. Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales, propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencias de calor y trazado de isotermas.
- Metrología. Control de espesores, medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento, niveles de llenado.

La clasificación de las pruebas no destructivas se basa en la posición en donde se localizan las discontinuidades que pueden ser detectadas, por lo que se clasifican en:

#### 1. Pruebas no destructivas superficiales

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad superficial de los materiales inspeccionados. Los métodos de PND superficiales son:

– Inspección Visual PT

– Líquidos Penetrantes MT

– Partículas Magnéticas ET

– Electromagnetismo

En el caso de utilizar PT se tiene la limitante para detectar únicamente discontinuidades superficiales (abiertas a la superficie); y con MT y ET se tiene la posibilidad de detectar tanto discontinuidades superficiales como sub-superficiales (las que se encuentran debajo de la superficie pero muy cercanas a ella).

## 2. Pruebas no destructivas volumétricas

Estas pruebas proporcionan información acerca de la sanidad interna de los materiales inspeccionados. Los métodos de PND volumétricos son:

– Radiografía Industrial UT

– Ultrasonido Industrial AE

– Emisión Acústica

Estos métodos permiten la detección de discontinuidades internas y sub-superficiales, así como bajo ciertas condiciones, la detección de discontinuidades superficiales.

### **2.3.1 ULTRASONIDO.**

La inspección por ultrasonido es una forma de inspección no destructiva que está diseñado para reunir información sobre las propiedades de un material a través del uso de la ecografía. Esta técnica se usa más comúnmente en los metales, ya que son sustancias ideales para la evaluación con ultrasonido, aunque otros materiales pueden ser inspeccionados de esta manera también.

Los ensayos de ultrasonidos, son ondas producidas por vibraciones mecánicas de frecuencia superior a 20000 ciclos por segundo, que supera el límite o umbral de audición humana. Los ultrasonidos más utilizados son de frecuencias comprendidas entre  $10^5$  y  $10^7$  ciclos por segundo, y se propagan

en línea recta, pudiendo atravesar espesores de acero de varios metros. Su amortiguación, sin embargo, es grande en gases e intermedia en líquidos.

Puesto que el comportamiento y la propagación de los ultrasonidos son de naturaleza ondulatoria, para que una discontinuidad o defecto sea detectable mediante esta técnica, es necesario que su dimensión en el sentido de propagación de la onda sea mayor que una semilongitud de onda, pues únicamente en ese caso la onda atravesará con seguridad el defecto y aparecerá una variación de la intensidad sónica medida. Así pues el límite de detección de esta técnica depende casi exclusivamente de la frecuencia de los ultrasonidos utilizados.

Al tratarse de una onda, las frecuencias se hallan relacionadas con las longitudes de onda en función de la velocidad de propagación de la onda:

$$v=\lambda \cdot f \qquad \qquad \qquad \mathbf{2.2}$$

Si observamos la velocidad de propagación del sonido en diferentes medios, se extraen dos importantes conclusiones que justifican la aplicación de las técnicas de ultrasonidos en sólidos:

- Las longitudes de onda correspondientes a las velocidades en metales son del orden de milímetros, es decir, del orden de los defectos que deseamos detectar.
- La velocidad de propagación depende fuertemente de la naturaleza gaseosa, líquida o sólida del medio. Así pues, las ondas de ultrasonidos sufrirán cambios bruscos al pasar de un medio a otro, lo cual aporta otra de las razones de su utilización.

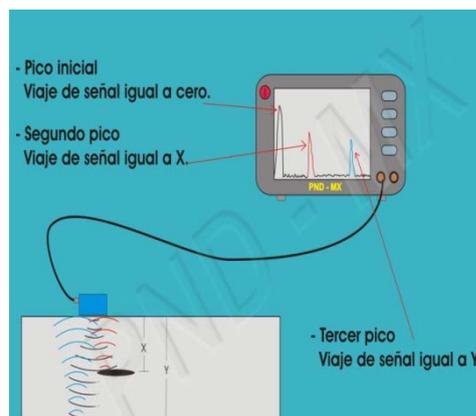
Los ultrasonidos, se comportan de forma análoga a como lo hacen las ondas acústicas o luminosas, sufren fenómenos de reflexión, refracción y difusión, lo cual permite su utilización para el estudio de materiales.

Los ensayos mediante ultrasonidos permiten la medida de espesores reales en servicio, de espesores de películas protectoras, de pinturas, de recubrimientos, así como la localización y medida de defectos internos como microfisuras, inclusiones, segregaciones, poros, etc. Un uso común para la inspección ultrasónica en las inspecciones de soldadura. Las inspecciones de soldadura por ultrasonidos se utilizan para probar las soldaduras sin dañarlos, para confirmar que las soldaduras son sólidas. Si se presenta un defecto, el tema

puede ser abordado. La inspección ultrasónica se utiliza también para inspeccionar las tuberías y otras estructuras para ver si algo en su interior ha ido mal. Por ejemplo, una inspección por ultrasonidos de la plomería puede revelar gran corrosión dentro de los tubos que ha debilitado sus paredes.<sup>10</sup>

### 2.3.1.1 Método convencional

El método de Ultrasonido Convencional se basa en la generación, propagación y detección de ondas elásticas (sonido) a través de los materiales. En la figura de abajo, se muestra un sensor o transductor acústicamente acoplado en la superficie de un material. Este sensor, contiene un elemento piezo-eléctrico, cuya función es convertir pulsos eléctricos en pequeños movimientos o vibraciones, las cuales a su vez generan sonido, con una frecuencia en el rango de los megahertz (inaudible al oído humano). El sonido o las vibraciones, en forma de ondas elásticas, se propaga a través del material hasta que pierde por completo su intensidad ó hasta que topa con una interface, es decir algún otro material tal como el aire o el agua y, como consecuencia, las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, distorsión, etc. Lo cual puede traducirse en un cambio de intensidad, dirección y ángulo de propagación de las ondas originales.



**Figura 2. 25 Aplicación típica del método de Ultrasonido**

Fuente (La ciencia de los materiales, Ing. Juan Celada,  
<http://www.scribd.com/doc/51796444/pruebas-no-destructivas>)

<sup>10</sup> Manual de introducción al ultrasonido industrial, Universidad tecnológica de Tabasco

### **2.3.1.2 Phased array**

Es un método avanzado de Ultrasonidos, fiable y seguro, para revelar defectos ocultos dentro de una estructura o soldadura.

Phased Array es una avanzada técnica pulso-eco que utiliza múltiples transductores miniaturizados y los retrasos de tiempo para dar forma al haz de sonido ultrasónico en un ángulo y el enfoque deseados. La versatilidad del sistema permite puntos de vista simultánea de diferentes presentaciones.

Por otra parte, phased array permite el almacenamiento digital de todos los ajustes de los datos, la ubicación y el sistema, y es mucho más seguro para operar dentro de un ambiente de trabajo, en comparación con los métodos no-destructivos de prueba que utilizan los rayos X y rayos gamma para la detección de imperfecciones.

#### *Campo de aplicación*

Pueden tratar muchos tipos de problemas. Por esta razón fases inspecciones matriz se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones:

- Soldadura de inspección de buques, tuberías y placas
- Soldadura de inspección de geometrías complejas, tales como la tobera de soldadura
- Brida de inspección frente a la corrosión
- Rápido escaneo a la corrosión, utilizando cuñas de 0 grados o en ángulo

## **2.3.2 END PARA CÓDIGOS AWS**

### **2.3.2.1 AWS D1.1**

Para las soldaduras sometidas a ensayos no destructivos en conformidad con 6.10, 6.11, 6.12.3, y 6.13.3, de la norma, la prueba puede comenzar inmediatamente después que la soldadura se ha enfriado a la temperatura ambiente.<sup>11</sup>

Los criterios de aceptación para las soldaduras sometidas a UT, además de la inspección visual deben cumplir con los requisitos de la Tabla 2.4. Las pruebas de ultrasonidos se evalúan en base de una discontinuidad que refleja la ecografía en proporción a su efecto sobre la integridad de la soldadura.

---

<sup>11</sup> AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 223

Dado que la mayor superficie reflectante de las más críticas discontinuidades se orienta un mínimo de 20 ° a 45 ° de forma perpendicular al haz de sonido, la evaluación de amplitud (dB) no permite la disposición fiable. Cuando las indicaciones exhiben estas características, una evaluación más detallada de la discontinuidad por otros medios se requiere (por ejemplo, otras técnicas UT, RT, muela o alza de visuales inspección, etc.)

Los procedimientos y normas establecidas en la Parte F se regirá por la UT de soldaduras y HAZ entre los espesores de 5 / 16 "y 8 "[8 mm y 200 mm] inclusive, cuando tales pruebas son requeridas por el 6.14 de este código. Para espesores de menos de 5 / 16 pulg [8 mm] o superior a 8 pulgadas [200 mm], las pruebas se llevarán a cabo de conformidad con el anexo K.

#### Calificación del equipo

La linealidad horizontal del instrumento de la prueba será recalificado después de cada 40 horas de utilización de los instrumentos en cada uno de los rangos de distancia que el instrumento será utilizado.

Las reflexiones internas de cada unidad de búsqueda se verificarán en un máximo intervalo de tiempo de 40 horas de uso del instrumento.

Con el uso de un bloque de calibración aprobado, se calibrará cada haz de ángulo después de cada ocho horas de utilidad para determinar si la cara de contacto es plana, que el punto de entrada de sonido es correcto, y que el ángulo del haz está dentro de lo permitido, más o menos 2 ° en la tolerancia y las unidades que no cumplan estos requisitos deberán ser corregidas o reemplazado.

**Tabla 2. 4 UT Valor de Criterios aceptación-rechazo “d” (para estructuras estáticamente Cargadas-Conexiones No tubulares)**

Espesor de soldadura en pulgadas [mm]

Discontinuity Severity Class	5/16 through 3/4 [8-20]	> 3/4 through 1-1/2 [20-38]	> 1-1/2 through 2-1/2 [38-65]			> 2-1/2 through 4 [65-100]			> 4 through 8 [100-200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Class A	+5 & lower	+2 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower	-5 & lower	-2 & lower	0 & lower	-7 & lower	-4 & lower	-1 & lower
Class B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
Class C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 to +2	+1 +2	+3 +4	-4 to +2	-1 to +2	+2 +3
Class D	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 227)

**Notas generales**

- Clase B y C, discontinuidades que estarán separados por lo menos 2L, siendo L la longitud de la discontinuidad más larga, excepto que cuando dos o más de tales discontinuidades no están separados por al menos 2L, pero la longitud combinada de las discontinuidades y su distancia de separación es igual o menor que el longitud máxima permitida en virtud de las disposiciones de la clase B o C, la discontinuidad se considerará como una única discontinuidad aceptable.
- Clase B y C no empezarán a una distancia inferior a 2L, siendo L la discontinuidad más larga.
- Las discontinuidades detectadas en el "nivel de exploración" en el área de la cara raíz del CJP (penetración completa en la junta) doble junta de soldadura surco se evaluó mediante una calificación que indica 4 dB.

Clase A (discontinuidades grande):

Cualquier indicio de esta categoría deberá ser rechazado (independientemente de la longitud).

Clase B (discontinuidades medio):

Cualquier indicio de esta categoría que tiene una longitud superior a 3 / 4 de pulgada [20 mm] será rechazada.

Clase C (pequeñas discontinuidades):

Cualquier indicio de esta categoría que tiene una longitud superior a 2 pulgadas [50 mm] será rechazada.

Clase D (discontinuidades menores):

Cualquier indicio de esta categoría se aceptará, independientemente de la longitud o ubicación en la soldadura.

**Tabla 2. 5 Niveles de escaneo**

Sound path <sup>2</sup> in in. [mm]	Above Zero Reference, dB
through 2-1/2 [65 mm]	14
> 2-1/2 through 5 [65–125 mm]	19
> 5 through 10 [125–250 mm]	29
> 10 through 15 [250–380 mm]	39

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 227)

Nota: Esta columna se refiere a la distancia de la trayectoria de sonido, y no al espesor del material.

**Tabla 2. 6 UT Valor de Criterios aceptación-rechazo “d” (en función de cargas cíclicas en conexiones no tubulares)**

Espesor de soldadura en pulgadas [mm]

Discontinuity Severity Class	5/16 through 3/4 [8–20]		> 3/4 through 1-1/2 [20–38]		> 1-1/2 through 2-1/2 [38–65]			> 2-1/2 through 4 [65–100]			> 4 through 8 [100–200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°		
Class A	+10 & lower	+8 & lower	+4 & lower	+7 & lower	+9 & lower	+1 & lower	+4 & lower	+6 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower		
Class B	+11	+9	+5 +6	+8 +9	+10 +11	+2 +3	+5 +6	+7 +8	-1 0	+2 +3	+4 +5		
Class C	+12	+10	+7 +8	+10 +11	+12 +13	+4 +5	+7 +8	+9 +10	+1 +2	+4 +5	+6 +7		
Class D	+13 & up	+11 & up	+9 & up	+12 & up	+14 & up	+6 & up	+9 & up	+11 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up		

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 228)

**Tabla 2. 7 Niveles de escaneo**

Scanning Levels	
Sound path <sup>2</sup> in in. [mm]	Above Zero Reference, dB
through 2-1/2 [65 mm]	20
> 2-1/2 through 5 [65–125 mm]	25
> 5 through 10 [125–250 mm]	35
> 10 through 15 [250–380 mm]	45

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 228)

Nota: Esta columna se refiere a la distancia de la trayectoria de sonido, y no al espesor del material.

### 2.3.2.2 AASHTO/AWS D1.5

Entre las ventajas del END de ultrasonido se tiene la velocidad de la prueba e interpretación de los resultados inmediata, exactitud en determinar la posición de las discontinuidades internas estimando sus tamaños, orientación, forma y profundidad. El ultrasonido se transmite a través del material a inspeccionar por medio de un transductor ultrasónico, la interacción de la energía con el material inspeccionado indica la presencia de discontinuidades en dicho material.

El operador de prueba de ultrasonido debe tener información de la geometría de soldadura, espesor del material, y procesos de soldadura utilizados.

Los parámetros de verificación del equipo para realizar el ensayo de ultrasonido se los detalla en la tabla 2.8 y las calibraciones de sensibilidad y distancia para la prueba de ultrasonido se detallan en la tabla 2.9.

**Tabla 2. 8 Parámetros de verificación en ensayo de ultrasonido**

<b>EQUIPO</b>	<b>PARÁMETRO</b>	<b>PERIODO</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Instrumento de Ultrasonido	Linealidad horizontal	40 horas de uso	Precalificación en rango de distancia que se utiliza el equipo
Control de ganancia	Calibración	Dos meses	
Transductor	Reflexión interna	40 horas de uso	
Transductor	Angulo de incidencia	8 horas de uso,	Se comprueba con el bloque calibrado, $\pm 2^\circ$ de tolerancia.

Fuente (Norma AWS D1.5 2002, sección 6, pág 325)

**Tabla 2. 9 Frecuencia de calibración de sensibilidad y distancia en ensayo de ultrasonido**

<b>ACCIÓN</b>	<b>FRECUENCIA</b>
Calibración	Previo a realizar una prueba y en la ubicación de cada prueba.
Calibración	Posterior a cambio de operador
Calibración	Cada 30 minutos máximos
Calibración	Cambio de transductor
Calibración	Cambio de batería
Calibración	Cambio de toma de corriente
Calibración	Cambio de cable coaxial
Calibración	Corte de energía

Fuente (Norma AWS D1.5 2002, sección 6, pág 326)

Cuando aparezca una indicación de discontinuidad en la pantalla, la indicación máxima alcanzada de esta discontinuidad deberá ajustarse para producir una desviación del trayecto del nivel de referencia horizontal en la pantalla.

Este ajuste deberá hacerse con el control de ganancia calibrado y la lectura del instrumento en dB deberá usarse como el nivel de indicación, "a" para calcular "La clasificación de indicación, d".

La trayectoria recorrida por el haz de sonido es la suma de la distancia de la primera y la segunda pierna. La longitud de la primera pierna (1aP) y la segunda pierna (2aP). Y se calcula con la siguiente ecuación:

$$1aP = 2aP = \frac{T}{\cos \theta} \quad 2.2$$

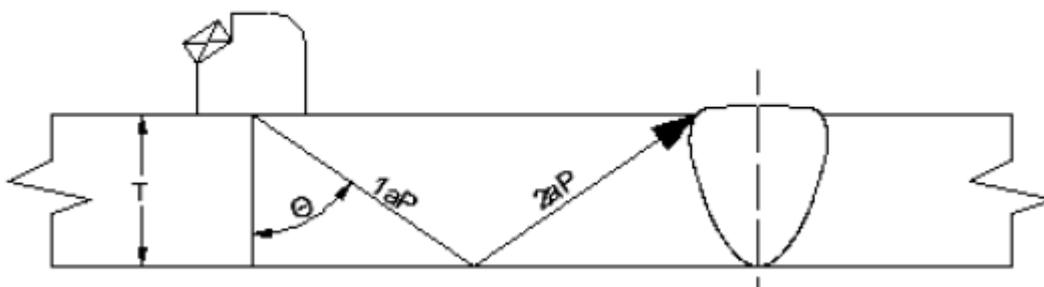


Figura 2. 26 Recorrido de la onda

Tabla 2. 10 Nivel de exploración

RECORRIDO DEL SONIDO, mm	INCREMENTO PARA GANANCIA dB
≤60	14
>60 hasta 125	19
>125 hasta 250	29
>250 hasta 400	39

Fuente (Norma AWS D1.5 2002, sección 6, pág 146)

### Factor de Atenuación

El “factor de atenuación, c” en el informe de la prueba deberá lograrse al restar 1 pulgada [25 mm] de la distancia del trayecto del sonido y multiplicando el remanente por 2. Este factor deberá redondearse hasta el valor más cercano al dB. Los valores fraccionales inferiores a 1/2 dB se reducirán al dB menor y aquellos de 1/2 dB o mayores se aumentará al más alto.

### Clasificación de la Indicación

La “clasificación de indicación d”, representa la diferencia algebraica en dB entre el nivel de indicación y el nivel de referencia con corrección para la atenuación de acuerdo a lo indicado en las siguientes expresiones:

Instrumento con ganancia en dB:

$$d=a-b-c \qquad \qquad \qquad \mathbf{2.3}$$

El promedio de indicación “d” es el valor que se utiliza como criterio de aceptación de las discontinuidades, en conjunto con la longitud de las mismas. La tabla 2.11 muestra el criterio de aceptación de las discontinuidades en función del promedio de indicación.

**Tabla 2. 11 Criterio de aceptación para juntas**

Indicación de clasificación	Promedio de indicación “d” [dB] para transductor 70° y material de 20mm de espesor	LONGITUD DE FALLA
CLASE A	-2 y menores	Debe ser rechazada
CLASE B	-1 , 0	Tiene una longitud mayor de 20mm y debe ser rechazada
CLASE C	+1 , +2	Tiene una longitud mayor a 50mm y debe ser rechazada
CLASE D	+3 y mayores	Aceptada sin tener en cuenta longitud

Fuente (AWS D1.1 2002, parte C, pág. 467)

Se marca una "X" en la ubicación donde se encuentra una falla en la cara de la prueba en dirección paralela al eje de la soldadura. Se marca la letra "Y" con un número de identificación de soldadura en el metal base adyacente a cada soldadura donde se realiza la prueba de ultrasonidos. Esta marca se utiliza para los siguientes fines: la identificación de soldadura identificación de la cara de inspección indicar distancias y sentido positivo o negativo del eje de soldadura, indicar dimensión desde los extremos o bordes de la soldadura.

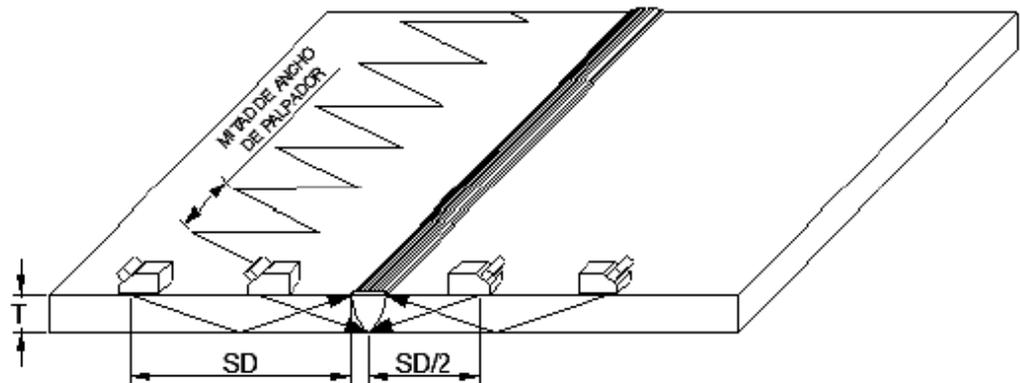
Las superficies que se examinan con el transductor deben estar libres de salpicaduras de soldadura, suciedad, grasa, aceite, pintura, y debe tener un contorno que permite buen contacto.

Un material acoplador que se utiliza entre el transductor y el material a ser ensayado es glicerina o una goma de celulosa y agua mezcladas de consistencia adecuada.

Luego de la calibración y durante la prueba, el único instrumento que se permite ajustar es el control de ganancia para modificar el nivel de sensibilidad. Todas las juntas de soldadura de ranura son examinadas por cada lado del eje de soldadura y son examinadas por medio del barrido indicado en la figura 2.27 para determinar fallas. Para delimitar la zona de barrido se calcula la distancia de brinco SD que delimita el límite lejano de la zona de barrido, se mide desde el borde de la soldadura y se calcula con la Ec. 2.4. El límite cercano de la zona de barrido es la mitad de la distancia de brinco medida desde el centro de la soldadura. La amplitud para el barrido en zic-zac es la mitad del ancho del transductor.

$$SD=2*T*tang\theta \qquad \qquad \qquad \mathbf{2.4}$$

Se pretende que como mínimo, todas las soldaduras que son ensayadas por ultrasonido, la onda pase a través de todo el volumen de la soldadura y la zona afectada de calor en dos direcciones. Cada discontinuidad que no es permitida debe ser indicada con una marca directamente sobre la discontinuidad por toda su longitud. La profundidad desde la superficie y clasificación debe ser anotada en el metal base cerca de la discontinuidad.



**Figura 2. 27 Movimiento para barrido de inspección en ensayo de ultrasonido**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 213)

Las soldaduras que sean inaceptables por ensayo de ultrasonido deben ser reparadas y volver a someterse al ensayo de ultrasonido.

El reporte del ensayo de ultrasonido debe identificar claramente la obra y área inspeccionada. El informe del reporte de las soldaduras que son aceptables debe contener información suficiente para identificar la soldadura, la firma del Inspector, y la aceptación de la soldadura.<sup>12</sup>

### **Criterios de aceptación**

Todas las soldaduras tienen que ser inspeccionadas visualmente y aceptada según los siguientes criterios: Sin fisuras, fusión completa entre las capas adyacentes de la soldadura, fusión completa entre la soldadura y el metal base.

Todos los cráteres deben ser rellenados a través de toda la sección de la soldadura: Socavadura menor a 0.25mm de profundidad, porosidad superficial máxima 2.4mm. Frecuencia máxima de porosidad superficial, es un poro por cada 100mm. La inspección visual puede empezar inmediatamente después de que se ha enfriado a temperatura ambiente la soldadura.

<sup>12</sup> [www.dspace.espol.edu.ec](http://www.dspace.espol.edu.ec)

Las soldaduras sometidas a ensayo de ultrasonido, adicionalmente a los criterios de inspección visual, tienen que cumplir con lo detallado a continuación: El ultrasonido evalúa las discontinuidades que reflejan la onda en proporción a su efecto sobre la integridad de la soldadura. Indicaciones de las discontinuidades que permanecen en la pantalla cuando el transductor se mueve hacia y lejos de la discontinuidad puede ser indicativo de discontinuidades considerado como defecto. Se cumplirá lo detallado en la tabla 2.11.

### **2.3.3 TINTAS PENETRANTES**

El método o prueba de líquidos penetrantes (LP), se basa en el principio físico conocido como "Capilaridad" y consiste en la aplicación de un líquido, con buenas características de penetración en pequeñas aberturas, sobre la superficie limpia del material a inspeccionar. Una vez que ha transcurrido un tiempo suficiente, como para que el líquido penetrante recién aplicado, penetre considerablemente en cualquier abertura superficial, se realiza una remoción o limpieza del exceso de líquido penetrante, mediante el uso de algún material absorbente (papel, trapo, etc.) y, a continuación se aplica un líquido absorbente, comúnmente llamado revelador, de color diferente al líquido penetrante, el cual absorberá el líquido que haya penetrado en las aberturas superficiales.

Por consiguiente, las áreas en las que se observe la presencia de líquido penetrante después de la aplicación del líquido absorbente, son áreas que contienen discontinuidades superficiales (poros, grietas, rechupes, traslapes, costuras, laminaciones, etc.)

En general, existen dos principales técnicas del proceso de aplicación de los LP: la diferencia entre ambas es que, en una se emplean líquidos penetrantes que son visibles a simple vista ó con ayuda de luz artificial blanca y, en la segunda, se emplean líquidos penetrantes que solo son visibles al ojo humano cuando se les observa en la oscuridad y utilizando luz negra o ultravioleta, lo cual les da un aspecto fluorescente.

Estas dos principales técnicas son comúnmente conocidas como: Líquidos Penetrantes Visibles y Líquidos Penetrantes Fluorescentes. Cada una de

estas, pueden a su vez, ser divididas en tres subtécnicas: aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con agua, aquellas en las que se utiliza líquidos removibles con solvente y aquellas en las que se utilizan líquidos post emulsificables.<sup>13</sup>

Cada una de las técnicas existentes en el método de LP, tiene sus ventajas, desventajas y sensibilidad asociada. En general, la elección de la técnica a utilizar dependerá del material en cuestión, el tipo de discontinuidades a detectar y el costo.

#### VENTAJAS

- Muy económico
- Inspección a simple vista
- No se destruye la pieza
- Se obtiene resultados inmediatos.

#### DESVENTAJAS

- Solo detecta fallas superficiales
- Díficil establecimiento de patrones
- La superficie a inspeccionar debe estar limpia y sin recubrimientos
- No se puede inspeccionar materiales demasiado porosos

## **2.4 ENSAYOS METALGRÁFICOS.**

### **2.4.1 ENSAYOS MICROGRÁFICOS**

Los ensayos micrográficos se realizan sobre muestras o probetas de los materiales que han de ser sometidos a estudio, preparamos una superficie que luego de ser pulida convenientemente, se ataca con reactivos químicos apropiados a la finalidad de la determinación a realizar.

Si el examen se ejecuta para analizar una fractura, la que se sospecha provocada por irregularidades en el material, las muestras deberán ser por lo menos dos, una de la propia fractura y otra de una zona intacta de la misma pieza, con el objeto de observar y comparar las modificaciones que ha sufrido

---

<sup>13</sup> [www.slideshare.net/.../tintas-penetrantes](http://www.slideshare.net/.../tintas-penetrantes) - Estados Unidos

la estructura y de las que se podrán deducir y contar con una mayor cantidad de datos, es necesario tener en cuenta además, los tratamientos recibidos por la pieza en su fabricación, como forjado, laminado, recocido, temple, etc. pues en muchos casos (forjado y laminado) es beneficio contar con muestras en las distintas direcciones de sus fibras. Como se ha indicado, el estudio en si se hace sobre superficies convenientemente preparadas de dichas muestras o probetas. Esta preparación consistente en llegar a un pulido casi perfecto, para lo cual se parte de un desbaste que podríamos llamar grueso, con el fin de aplanar la superficie, lo que se consigue con un ajuste a lima o con el auxilio de devastadoras mecánicas de diseño especial.

Los reactivos químicos y sus finalidades son muy variadas, pero en principio se busca con ellos la revelación, por coloración o por corrosión, de los distintos componentes de una estructura metalográfica para poder diferenciarlos con facilidad. Por lo general, están constituidos por ácidos, álcalis, etc. diluidos en alcoholes, agua, glicerina, etc. Y su elección se hará de acuerdo con la naturaleza química la estructura a destacar en la muestra.

Con tal fin, una vez pulida la superficie se hará en agua caliente, frotándola con un algodón o tela suave para quitarle todo rastro de las operaciones anteriores o grasa que pueda presentar, concluyendo esta limpieza con alcohol etílico o solvente similar y secándola con un soplado de aire caliente.

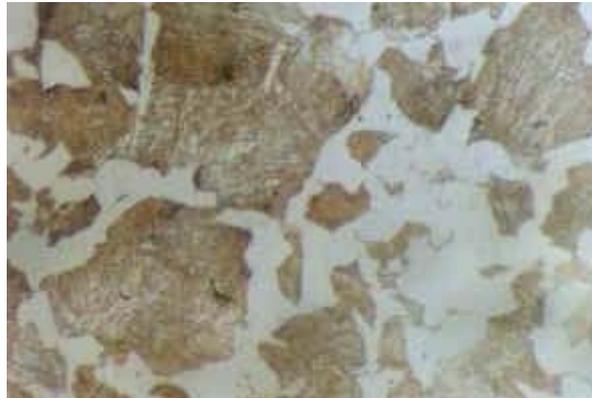
Las fotografías obtenidas de estos exámenes, genéricamente llamados "Microfotografías", se logran con la ayuda del microscopio metalográfico, cuyos principios ópticos y de observación no difieren mayormente de los comunes. En él, con iluminación adecuada, se observa por reflexión (los rayos luminosos al incidir sobre el objeto se refleja hacia el ocular), la imagen de la superficie atacada, a través de un sistema de lentes con los que se amplifica según lo que requiera la observación.<sup>14</sup>

Por otra parte, con la observación de las estructuras micrográficas y por comparación con microfotografías, es posible deducir el contenido aparente de carbono, finura y variedad de los componentes, clasificación de aceros,

---

<sup>14</sup> <http://www.mailxmail.com/curso-metalografia/examen-micrografico-macrografico>

reconocer las inclusiones por defectos de fabricación (óxidos, silicatos, oxisulfuros, silicoaluminatos), etc



**Figura 2. 28 Ejemplo de micrografiado**

Fuente (<http://www.mailxmail.com/curso-metalografia/examen-micrografico-macrografico>)

Según como vemos en las micrografías obtenidas de los exámenes, reafirman que la muestra 1 es un acero SAE 1045 según la distribución de la perlita y la ferrita laminar.

#### **2.4.2 ENSAYOS MACROGRÁFICOS**

Las probetas de soldadura deberán ser preparadas con una terminación adecuada para el ensayo de macroataque metalográfico. Deberá usarse una solución adecuada para revelar la forma o perfil de la soldadura.

Para una calificación aceptable de la probeta, cuando se inspecciona visualmente, deberá cumplir con los siguientes requerimientos:

Las soldaduras de filete deben tener fusión completa de la raíz de la junta, pero no necesariamente más allá de esta.

El tamaño mínimo del cateto debe alcanzar el tamaño de filete especificado.

Las soldaduras con filete deben verificar lo siguiente:

- (a) sin fisuras
- (b) fusión completa de las pasadas o capas adyacentes al metal de soldadura y entre el metal de soldadura y el metal base.

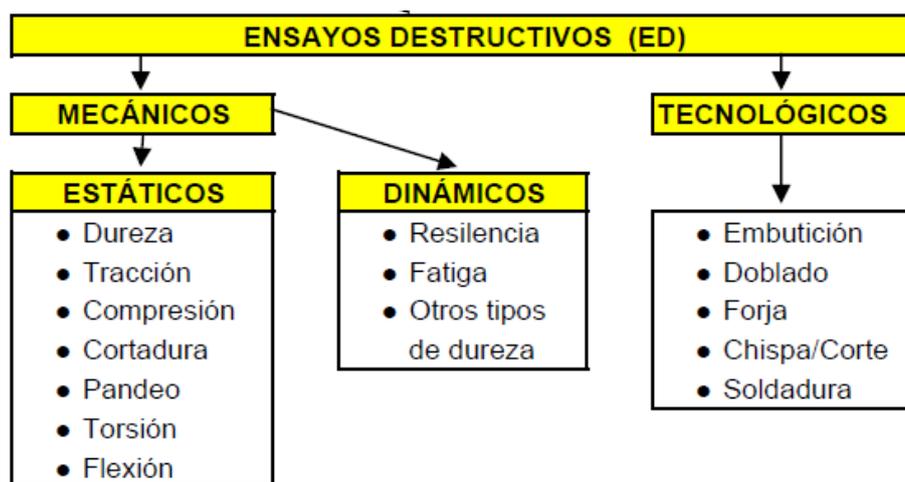
(c) ninguna socavadura mayor o igual que 1 mm.<sup>15</sup>

## 2.5 ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Producen daño o rotura en la pieza sometida al ensayo. Si la soldadura va a ser parte de un conjunto o estructura grande, se pueden efectuar pruebas destructivas en muestras o probetas, similares a la unión soldada real. En una prueba destructiva se dobla, tuerce o se trata de separar por tracción (estiramiento) la soldadura para determinar si hay fallas.

### 2.5.1 TIPOS DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS

Existen varios tipos de ensayos destructivos y se los suele clasificar en mecánicos, tecnológicos y dinámicos, con las subdivisiones siguientes:



**Figura 2. 29 Clasificación de ensayos destructivos**

Fuente (I.E.S. Sierra Mágina, J. Jimenez, [www.juntadeandalucia.es](http://www.juntadeandalucia.es))

### 2.5.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN.

El ensayo de tracción de un material consiste en someter a una probeta normalizada realizada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. En un ensayo de

<sup>15</sup> Norma AWS D1.1 2002, sección 4.8.4

tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos.<sup>16</sup>

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young que es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.
- Coeficiente de Poisson que cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y la acortamiento de las longitudes transversales a la dirección de la fuerza.
- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: Valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado.
- Carga de rotura o resistencia a la tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

Normalmente, el límite de proporcionalidad no suele determinarse ya que carece de interés para los cálculos. Tampoco se calcula el Módulo de Young, ya que éste es característico del material, así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes.

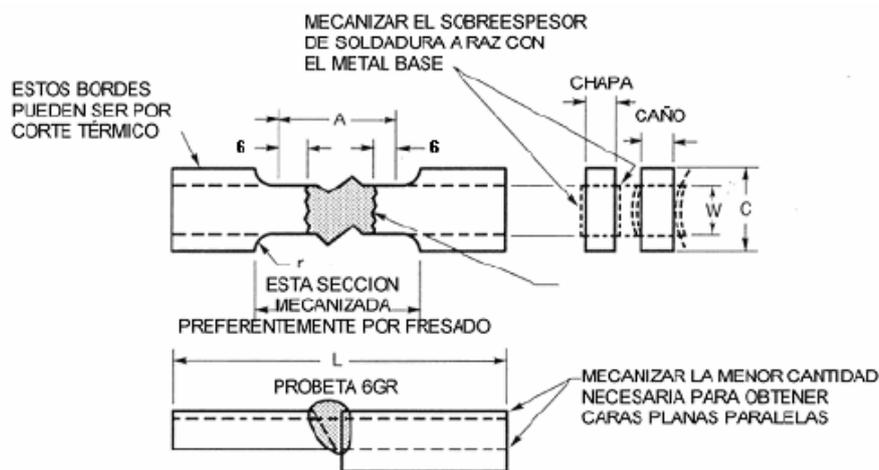
---

<sup>16</sup> <http://tecnolowikia.wikispaces.com/Ensayo+de+Tracci%C3%B3n>

Las probetas para ensayos de tensión se fabrican en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta puede ser redonda, cuadrada o rectangular.

### Probetas de Tracción de Sección Reducida

Antes del ensayo, deberá medirse el menor ancho y su espesor correspondiente de la sección reducida. La probeta deberá ser rota bajo carga de tracción y se determinará la carga máxima. El área de la sección transversal se deberá obtener multiplicando el ancho por el espesor. La tensión de tracción deberá calcularse dividiendo la carga máxima por el área de la sección transversal. La resistencia a la tracción deberá ser mayor o igual al valor mínimo especificado correspondiente al metal base.



Medidas en mm

	Espesor de la Chapa de Ensayo, T [mm]			Diámetro del Tubo de Ensayo [mm]	
	T ≤ 25	25 < T < 38	T ≥ 38	50 y 75	150 y 200 o el prefabricado de mayor diámetro
A – Largo de la sección reducida	La cara más ancha de la soldadura + 12 mm o mínimo 60 mm			La cara más ancha de la soldadura + 12 mm o mínimo 60 mm	
L – Largo total, mínimo (Nota 1)	Según lo requiera el equipo de ensayo			Según lo requiera el equipo de ensayo	
W – Ancho mínimo de la sección reducida (Notas 2, 3)	20 mm	20 mm	20 mm	12 mm	20 mm
C – Ancho mínimo de la sección de sujeción (Notas 3, 4)	W + 12 mm	W + 12 mm	W + 12 mm	W + 12 mm	W + 12 mm
t – Espesor de la probeta (Notas 5)	T	T	Tp/n (Nota 6)	El máximo posible con caras planas y paralelas dentro del largo A	
r – Radio mínimo	12 mm	12 mm	12 mm	25 mm	25 mm

**Figura 2. 30 Probeta de sección reducida para ensayo de tracción**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 4, pág 159)

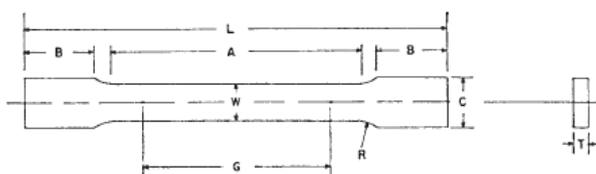
**Notas:**

1. Resultará apropiado hacer el largo de la sección de sujeción suficientemente grande para permitir que la fijación de la probeta en la mordaza sea a una distancia igual o mayor que dos tercios del largo de la mordaza.
2. Los extremos de la sección reducida no deberán tener una diferencia mayor que 0,1 mm. También deberá haber una disminución gradual en el ancho desde los extremos al centro, pero el ancho de cualquiera de los extremos será menor o igual que 0,38 mm respecto del ancho en el centro.
3. Podrán ser usados, cuando sea necesario, anchos reducidos (W y C) En tales casos, el ancho de la sección reducida deberá ser tan grande como el ancho del material que está siendo ensayado lo permita. Si el ancho del material es menor que W, los lados podrán ser paralelos en todo el largo de la probeta.
4. Para probetas de chapas del tipo estándar, los extremos de la probeta deberán ser simétricos con la línea de centro de la sección reducida dentro de los 6 mm. La dimensión t es el espesor de la probeta como está dispuesto en las especificaciones aplicables del material. El espesor nominal mínimo de las probetas de 38 mm de ancho deberá ser de 5 mm, excepto lo permitido por la especificación del producto.
5. Para chapas mayores que 38 mm de espesor, las probetas podrán ser cortadas en tiras o planchuelas aproximadamente iguales. Cada tira deberá tener un espesor mínimo de 20 mm. Los resultados de los ensayos de cada tira deberán alcanzar los requerimientos mínimos.

**Probetas de Tracción del Metal de Aporte Puro**

La probeta de ensayo deberá ser realizada de acuerdo con IRAM-IAS U 500-102-1 y 102-2:1987 o ASTM A370 para ensayos mecánicos de productos de acero.

 **A 370 - 03a**



DIMENSIONS

	Standard Specimens				Subsize Specimen	
	Plate-Type, 1½-in. Wide		Sheet-Type, ½-in. Wide		¼-in. Wide	
	in.	mm	in.	mm	in.	mm
G—Gage length (Notes 1 and 2)	8.00 ± 0.01	200 ± 0.25	2.000 ± 0.005	50.0 ± 0.10	1.000 ± 0.003	25.0 ± 0.08
W—Width (Notes 3, 5, and 6)	1½ + ⅛ - ¼	40 + 3 - 6	0.500 ± 0.010	12.5 ± 0.25	0.250 ± 0.002	6.25 ± 0.05
T—Thickness (Note 7)			Thickness of Material			
R—Radius of fillet, min (Note 4)	½	13	½	13	¼	6
L—Over-all length, min (Notes 2 and 8)	18	450	8	200	4	100
A—Length of reduced section, min	9	225	2¼	60	1¼	32
B—Length of grip section, min (Note 9)	3	75	2	50	1¼	32
C—Width of grip section, approximate (Notes 4, 10, and 11)	2	50	¾	20	¾	10

**Figura 2. 31 Probeta de metal de aporte puro, para tracción**

Fuente (Norma ASTM A 370-03a, pág. 5)

NOTA 1-Para el 11/2-in. (40 mm) muestra amplia, las marcas de punzón para medir el alargamiento de rotura se efectuarán sobre el piso o en el borde de la muestra y dentro de la sección reducida. Existe un conjunto de nueve o más marcas de punzón de 1 pulgada (25 mm) de separación, o uno o más pares de marcas de punzón 8 pulgadas (200 mm) de separación puede ser utilizado.

NOTA 2-A 1/2-in. (12,5 mm) muestra amplia, las marcas de medidor para medir el alargamiento de rotura se hará en la cara 1/2-pulgada (12,5 mm) o en el borde de la muestra y dentro de la sección reducida. Existe un conjunto de tres o más marcas de 1.0 pulgadas (25 mm) o uno o más pares de marcas 2 pulgadas (50 mm) de separación puede ser utilizado.

NOTA 3 Para los tres tamaños de las muestras, los extremos de la sección reducida no deberá diferir de ancho por más de 0.004, 0.002 o 0.001 pulgadas (0.10, 0.05 o 0.025 mm), respectivamente. Además, puede haber una disminución gradual de la anchura de los extremos hacia el centro, pero la anchura a cada lado no deberá ser superior a 0.015 pulg, 0.005 de pulgada, o 0,003 pulgadas (0,40, 0,10 o 0,08 mm), respectivamente, mayor que el ancho en el centro.

NOTA 4-Para cada tipo de muestra, los radios de todas las cintas serán iguales entre sí, con una tolerancia de 0,05 pulgadas (1,25 mm), y los centros de curvatura de los dos filetes en un determinado lado se encuentra uno frente al otro (en una línea perpendicular a la línea central) con una tolerancia de 0,10 pulgadas (2,5 mm).

NOTA 5-Para cada uno de los tres tamaños de las muestras, más estrecho ancho (W y C) se puede utilizar cuando sea necesario. En tales casos, el ancho de la reducción de sección debe ser tan grande como la anchura del material que permite a prueba, sin embargo, salvo que se indique específicamente, los requisitos para la elongación en un producto especificación no se aplicará cuando estas muestras se utilizan más estrechas. Si el ancho del material es inferior a W, los laterales pueden ser paralelos a lo largo de la longitud de la muestra.

NOTA 6-La muestra podrá ser modificada por la toma de lados paralelos a lo largo de la muestra, la anchura y la tolerancia son los mismos como los señalados anteriormente. Cuando sea necesario un espécimen más estrecha se pueden utilizar, en cuyo caso el ancho debe ser tan grande como la anchura del material que se permite la prueba. Si el ancho es de 2.11 pulgadas (38 mm) o menos, las partes pueden ser paralelas a lo largo de la muestra.

NOTA 7-La dimensión T es el espesor de la probeta a lo dispuesto en el pliego de condiciones materiales aplicables. Mínimo espesor nominal de 1/2-in. (40 mm) ejemplares de ancho será de 3 / 16 pulgadas (5 mm), salvo lo permitido por el pliego de condiciones. Máximo espesor nominal de 1/2-in. (12,5 mm) y 1/4-in. (6 mm) de ancho muestras será de 3 / 4 de pulgada (19 mm) y, respectivamente, 1 / 4 de pulgada (6 mm).

NOTA 8: Para ayudar en la obtención de carga axial durante la prueba de 1/4-in. (6 mm) ejemplares de ancho, la longitud total debe ser como la materia lo permita.

NOTA 9-Es deseable, si es posible, para que la longitud de la sección de control lo suficientemente grande como para permitir que el modelo que se

extienden en las garras una distancia igual a dos tercios o más de la longitud de las empuñaduras. Si el espesor de 1/2-in. (13 mm) de ancho muestras es de más de 3 / 8 de pulgada (10 mm), más apretones y en consecuencia secciones más largas garras de la muestra puede ser necesario para evitar el fracaso en la zona de sujeción.

NOTA 10 Para las muestras estándar de tipo de hoja y subsize muestras de los extremos de la muestra deberá ser simétrica con la línea central de la reducción de sección dentro de 0,01 y 0,005 pulgadas (0,25 y 0,13 mm), respectivamente. Sin embargo, para el acero, si los extremos de la 1/2-in. (12,5 mm) de ancho muestra son simétricas una desviación de 0,05 pulgadas (1,0 mm) en una muestra se puede considerar satisfactorio para todas las pruebas pero el árbitro.

NOTA 11-Para las muestras de tipo estándar de placa de los extremos de la muestra deberá ser simétrica con la línea central de la sección reducida en 0,25 pulgadas (6,35 mm), excepto para las pruebas de árbitro, en cuyo caso los extremos de la muestra deberá ser simétrica con la línea central de la sección reducida en 0,10 pulgadas (2,5 mm).

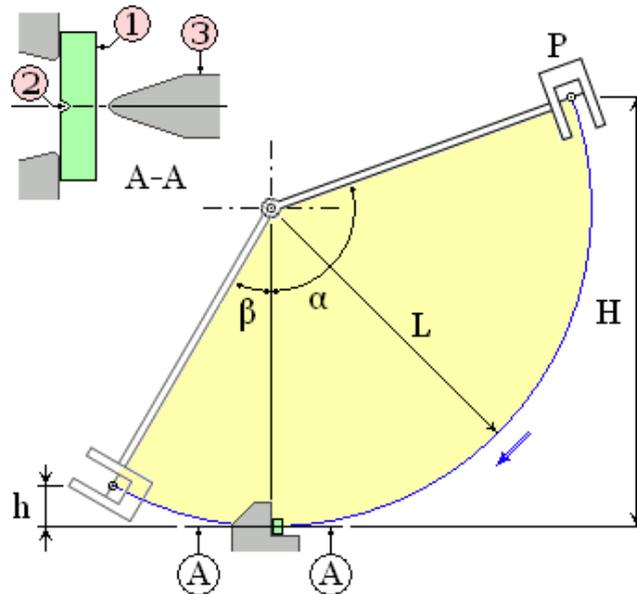
### **2.5.3 ENSAYOS DE IMPACTO**

El ensayo de resiliencia, también llamado de impacto o choque proporciona una medida de la tenacidad del material e indirectamente de su ductilidad ya que en general existe una correlación entre ambas características; el valor numérico obtenido, sin embargo, es similar al de la resiliencia.

La razón de esta coincidencia se debe al hecho de que en el ensayo de impacto la carga que provoca la rotura de la probeta se aplica de forma instantánea impidiendo la deformación plástica del material provocando en la práctica la fractura frágil de materiales dúctiles.

El valor obtenido en el ensayo constituye una referencia válida para prever el comportamiento de los materiales frente a cargas dinámicas (variables) y valorar si un material concreto será adecuado en una determinada situación, si

bien, a diferencia de otras características determinadas mediante ensayo, como por ejemplo las del ensayo de tracción, el valor de la resiliencia no tiene utilidad en los cálculos de diseño.



**Figura 2. 32 Ensayo Charpy. 1. Probeta 2. Entalla 3. Cuchilla del péndulo.**

Fuente (Bruno Montenegro, [http://emet630.blogspot.com/2009\\_11\\_01\\_archive.html](http://emet630.blogspot.com/2009_11_01_archive.html))

El ensayo destructivo, como muestra la figura, consiste en romper una probeta entallada golpeándola con un péndulo.

Partiendo de una altura H inicial desde la que se deja caer el péndulo de peso P y alcanzando éste después de romper la probeta una altura h (girando en total un ángulo  $\alpha + \beta$ ) se puede calcular la energía absorbida por la probeta en el impacto suponiendo que ésta es igual a la perdida por el péndulo.

- Energía potencial inicial:  $P \times H = P \times L \times (1 - \cos \alpha)$
- Energía potencial final:  $P \times h = P \times L \times (1 - \cos \beta)$

La energía absorbida por la probeta será:

$$P \times L \times (1 - \cos \alpha) - P \times L \times (1 - \cos \beta) = P \times L \times (\cos \beta - \cos \alpha) \quad 2.5$$

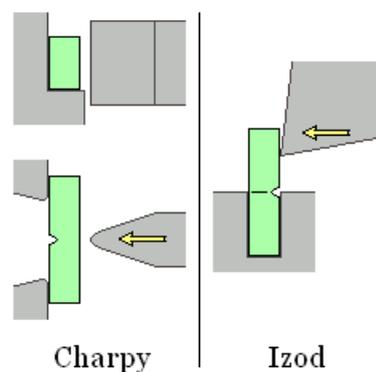
Cuanta mayor sea la fragilidad del material y menor su tenacidad más fácilmente romperá el péndulo la probeta y mayor altura alcanzará tras el

impacto. Materiales muy dúctiles y tenaces que son capaces de absorber grandes cantidades de energía de impacto pueden incluso resistir el choque sin llegar a romperse; en este caso el valor de la resiliencia queda sin determinar.

El péndulo en su balanceo inicial arrastra una aguja que queda fija en el punto más elevado alcanzado tras el impacto señalando sobre una escala graduada el valor de la resiliencia.

La temperatura normalizada de ensayo es de 20 °C como para el resto de características en mecánica (dimensiones de las piezas incluidas), no obstante pueden ensayarse probetas a distintas temperaturas cuando la pieza tenga que soportar temperaturas distinta de la ambiente, sean éstas bajas temperatura, -20°C, para simular el comportamiento durante, por ejemplo, las heladas, criogénicas (-71°C a -196°C) o altas temperaturas. Igualmente ensayos a distinta temperatura permiten determinar la temperatura de transición frágil-dúctil del material y por tanto la temperatura mínima de servicio. Existen dos variantes básicas del ensayo de resiliencia desarrolladas ambas a principios del siglo XX.

- Ensayo Charpy. La probeta se apoya en sus extremos y se golpea en el centro por la cara contraria a la entalla.
- Ensayo Izod. La probeta —empotrada por una de sus mitades— se golpea en el extremo del voladizo por la cara de la entalla.



**Figura 2. 33 Ensayos de resiliencia**

Fuente ([http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo\\_de\\_resiliencia](http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo_de_resiliencia))

Las probetas de sección rectangular o circular se mecanizan a partir de muestras representativas del material, variando su tamaño y dimensiones y los de la entalla en función de la máquina y norma nacional utilizada en el ensayo.

La probeta tipo según ISO y normativa europea es de sección cuadrada de 10 mm de lado y 55 mm de longitud colocándose con una distancia entre apoyos de 40 mm. La entalla es de los tipos bulbo y cilíndrica con una profundidad de 5 mm, ancho máximo de 2 mm y una superficie de rotura de 10x5 mm<sup>2</sup>.

En la norma ASTM E23 o Charpy-V la probeta es de iguales dimensiones y distancia entre apoyos que la anterior pero la entalla es triangular formando las caras un ángulo de 45°, con una profundidad de 2mm y redondeo en el fondo de la entalla de 0,25 mm de radio.

La norma DIN 50115 emplea probetas similares a las ISO pero de menos profundidad (3 mm la DVM y 2 mm la DVMK).

La entalla de las probetas Izod, equivalentes a la norma BS 131 (V) son triangulares con las dimensiones de la Charpy-V.

#### **2.5.4 ENSAYOS DE DOBLEZ**

Es uno de los métodos para evaluar la ductilidad de un material, pero no debe considerarse como un medio cuantitativo para predecir su funcionamiento durante las operaciones de doblado.

Este tipo de ensayo se emplea básicamente para materiales en forma de láminas, tubos, alambres, etc. sometidos a procesos de manufactura; tales como: laminado, forja, extrusión, soldadura, etc.

Básicamente se tiene cuatro pruebas de doblaz:

- Libre
- Semiguiado
- Guiado
- Por envoltura

a) Doblez libre: Se realiza en un tornillo de banco y una herramienta dobladora, o bien, en una prensa.

b) Doblez guiado: Se realiza sobre probetas estandarizadas mediante un émbolo o punzón también estandarizado, forzando a la probeta dentro de un aditamento de dimensiones predeterminadas; lo cual está especificado en el Código AWS.

c) Doblez semiguaido: A diferencia de la prueba anterior, la probeta no se hace forzar hacia un aditamento.

d) Doblez por envoltura: Consiste en envolver o arrollar la muestra en torno a un pasador de un diámetro predeterminado.

### Criterios de Aceptación

La superficie convexa de la probeta del ensayo de plegado deberá ser examinada visualmente para detectar discontinuidades superficiales. El criterio de aceptación establecido indica que la superficie no debe tener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

(1) 3 mm, medidos en cualquier dirección sobre la superficie

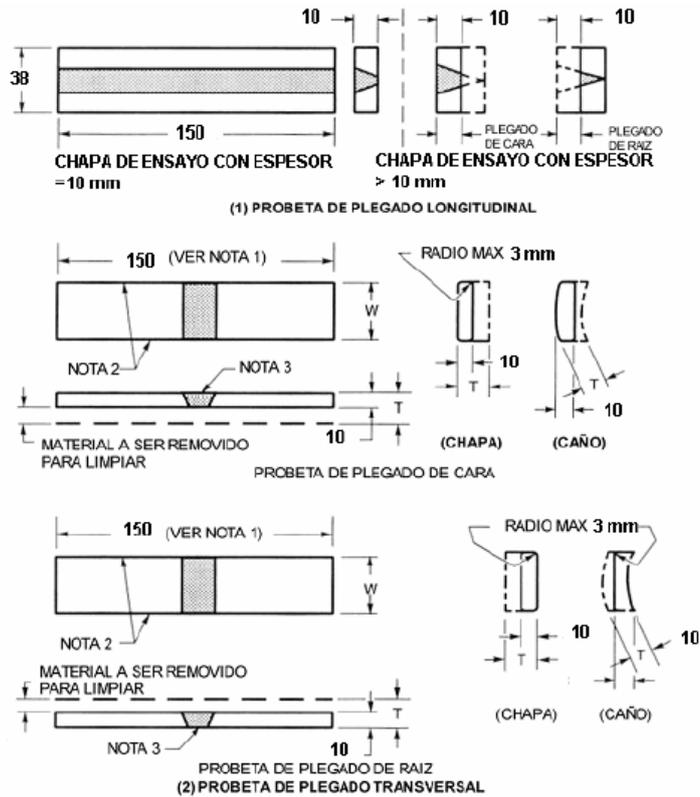
(2) 10 mm, como la suma de las mayores dimensiones de todas las discontinuidades mayores que 1 mm, pero menores o iguales que 3 mm.

(3) 6 mm, la máxima fisura en las esquinas de la probeta plegada, excepto cuando dicha fisura resulte de una inclusión de escoria visible u otro tipo de discontinuidad relacionada con la fusión, en cuyo caso se deberá aplicar un máximo de 3 mm.

Las probetas con fisuras en las esquinas mayores que 6 mm, sin evidencia de inclusiones de escoria u otro tipo de discontinuidades de fusión, deberán ser soldadura original de calificación.<sup>17</sup>

---

<sup>17</sup> Norma AWS D1.1 2002, sección 4.8.3.3



Dimensiones	
Soldadura para ensayo realizada en:	Ancho de la probeta de ensayo (W) mm
Chapa	40
tubo o caño de ensayo $\leq$ 100 mm en diámetro.	25
tubo o caño de ensayo $>$ 100 mm en diámetro.	40

Medidas en mm

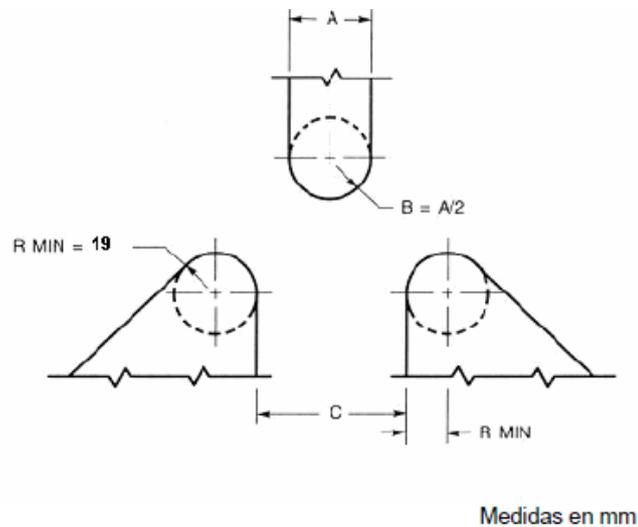
**Figura 2. 34 Probetas de plegado**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 4, pág. 157)

Notas:

1. Puede ser necesario una probeta de un largo mayor cuando se usa un plegado con fijación del tipo punzón o rodillo de envoltura o cuando se ensaye un acero con una resistencia a la fluencia igual o mayor que 620 Mpa.
2. Estos bordes pueden ser realizados con corte térmico y pueden ser o no mecanizados
3. El refuerzo de la soldadura y el respaldo, si hay, deberá ser removido a ras con la superficie de la probeta (ver 5.24.4.1 y 5.24.4.2) Si se usa un respaldo ahuecado, esa superficie puede ser mecanizada a una profundidad que no exceda la correspondiente al hueco para remover el respaldo; en ese caso, el espesor de la probeta terminada deberá ser el espesor especificado arriba. Las superficies cortadas deben ser planas y paralelas.

4. T = espesor de la chapa, tubo o caño.
5. Cuando el espesor de la chapa de ensayo es menor que 10 mm, usar para el plegado de cara o raíz el espesor nominal.



Resistencia a la fluencia especificada o real del metal base [MPa]	A mm	B mm	C mm
≤ 345	38,1	19,0	60,3
> 345 a < 620	50,8	25,4	73,0
≥ 620	63,5	31,8	85,7

**Figura 2. 35 Ensayo Alternativo de Plegado Guiado con Rodillos en Tres Puntos y Descarga de la Probeta por la Parte Inferior**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 4, pág. 161)

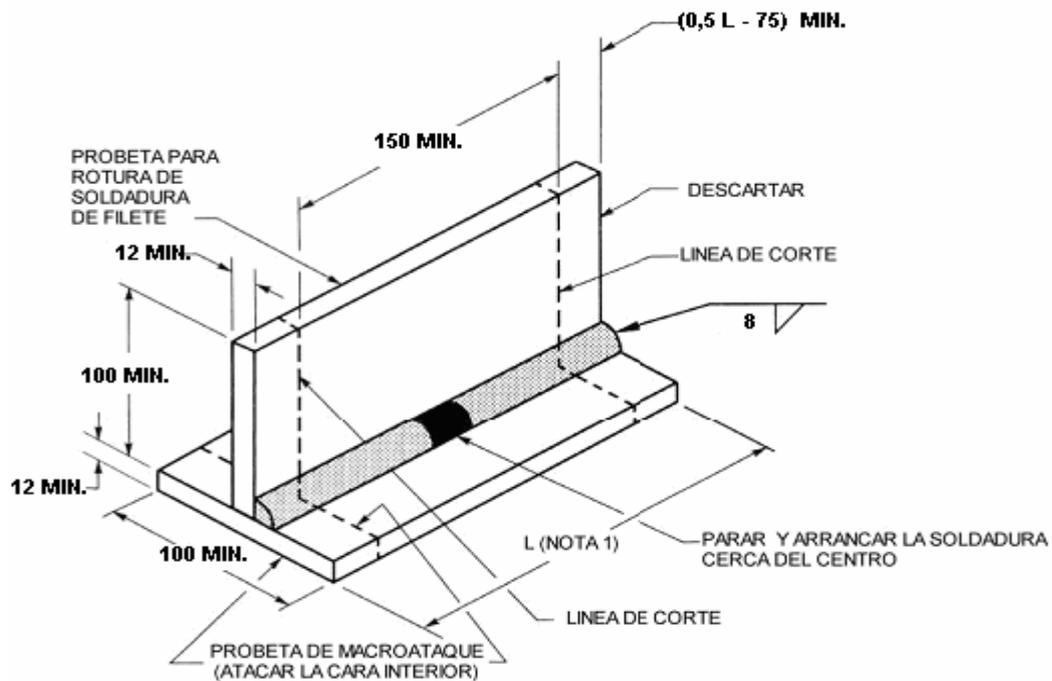
La luz entre los bordes de los apoyos se toma aproximadamente igual al diámetro del elemento transmisor del esfuerzo, más tres veces el espesor del material.

$$L = d + 3a \quad 2.6$$

### 2.5.5 ENSAYO DE ROTURA

La carga deberá ser aplicada en forma incremental o repetida hasta que la probeta fracture o se pliegue aplastada sobre sí misma.

Si la probeta se pliega en forma plana sobre sí misma, el ensayo resulta satisfactorio. Si la probeta rompe las superficies de fractura deberán ser inspeccionadas visualmente. En este caso las probetas para ser aprobadas deberán mostrar fusión completa en la raíz de la junta de filete, inclusiones o porosidad igual o menor que 2 mm en la mayor dimensión. Además la suma de las mayores medidas de las inclusiones o porosidad serán iguales o menores que 20 mm por cada segmento de largo 100 mm.



**Figura 2. 36 Probeta para Ensayo de Rotura**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 4, pág. 176)

## 2.6 MEDICIÓN DE DUREZA

La dureza es la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, por lo cual estamos midiendo la cohesión entre los átomos del material. Esto, por tanto, guarda relación con la resistencia a la deformación y a la rotura, y cuanto más duro sea un material, más resistente será también.

Con los metales se utiliza el método Martens que consiste en medir el surco que deja una punta de diamante de forma piramidal que se desplaza sobre la superficie. Sin embargo, es más frecuente hablar de otro tipo de ensayos en los que se mide la marca que se deja en un material cuando se intenta clavar en él otra pieza de formas definidas, llamado penetrador.

El método consiste en aplicar una fuerza, que suele ser proporcional al cuadrado del tamaño del penetrador ( $F = k \cdot D^2$ ) y medir la huella que queda. Según la forma del penetrador y la forma de aplicar la fuerza tenemos varios ensayos de dureza, entre los que destacan tres: el método Brinell, el método Vickers y los métodos Rockwell.

### 2.6.1 DUREZA ROCKWELL

La dureza Rockwell o ensayo de dureza Rockwell es un método para determinar la dureza, es decir, la resistencia de un material a ser penetrado. El ensayo de dureza Rockwell constituye el método más usado para medir la dureza debido a que es muy simple de llevar a cabo y no requiere conocimientos especiales. Se pueden utilizar diferentes escalas que provienen de la utilización de distintas combinaciones de penetradores y cargas, lo cual permite ensayar prácticamente cualquier metal o aleación. Hay dos tipos de penetradores: unas bolas esféricas de acero endurecido (templado y pulido) de 1/16, 1/8, 1/4 y 1/2 pulg, y un penetrador cónico de diamante con un ángulo de 120° +/- 30' y vértice redondeado formando un casquete esférico de radio 0,20 mm (Brale), el cual se utiliza para los materiales más duros.

El ensayo consiste en disponer un material con una superficie plana en la base de la máquina. Se le aplica una precarga menor de 10 kg, básicamente para eliminar la deformación elástica y obtener un resultado mucho más preciso. Luego se le aplica durante unos 15 segundos un esfuerzo que varía desde 60 a 150 kg a compresión. Se desaplica la carga y mediante un durómetro Rockwell se obtiene el valor de la dureza directamente en la pantalla, el cual varía de forma proporcional con el tipo de material que se utilice. También se puede encontrar la profundidad de la penetración con los valores obtenidos del durómetro si se conoce el material.

Para no cometer errores muy grandes el espesor de la probeta del material en cuestión debe ser al menos diez veces la profundidad de la huella. También decir que los valores por debajo de 20 y por encima de 100 normalmente son muy imprecisos y debería hacerse un cambio de escala.

El cambio de escala viene definido por tablas orientativas, puesto que no es lo mismo analizar cobre que acero. Estas tablas proporcionan información orientativa sobre qué escala usar para no dañar la máquina o el penetrador, que suele ser muy caro.<sup>18</sup>

---

<sup>18</sup> [http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza\\_Rockwell](http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Rockwell)

**Tabla 2. 12 Escalas de dureza Rockwell**

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

Fuente: Wikipedia

## CAPITULO 3

### FABRICACION DE PROBETAS

#### 3.1 MATERIALES

##### 3.1.1 MATERIAL BASE

Los materiales base utilizados en la fabricación de estructuras de acero soldadas serán los indicados en el Reglamento Técnico Ecuatoriano de “Diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero” y los materiales referenciados en los Códigos AWS D1.1 y AWS D 1.5.

El Código AWS D1.1 y D1.5 no tienen el propósito de ser utilizado en lo siguiente:

- (1) Aceros con un límite de fluencia mayor a 100 ksi (690 MPa)
- (2) Aceros de un espesor inferior a 1/8 de pulgadas (3 mm).

Además nos indican que, los esfuerzos calculados del metal base no deberán exceder los esfuerzos permisibles en las especificaciones aplicables del diseño.

Acero ASTM A36 Grado A: Las piezas hechas a partir de acero A36 son fácilmente unidas mediante casi todos los procesos de soldadura. Los más comúnmente usados son los menos costosos y rápidos como la Soldadura por arco metálico protegido (SMAW), Soldadura con arco metálico y gas (GMAW), y soldadura oxiacetilénica.

Requerimientos Mecánicos:

**Tabla 3. 1 Propiedades Mecánicas del Acero A36**

LÍMITE DE FLUENCIA MÍNIMO	DE	FLUENCIA	RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		ELONGACIÓN MÍNIMA		
			MÍNIMA		%	En	200mm
Mpa		Psi	Mpa	Psi	(8 pulgadas)		
250		36.000	410	58.000	18*		

Fuente: Datos del Proveedor

Está especificado en la Norma AWS D1.1 que el acero a utilizarse deberá tener una buena soldabilidad. El acero A36 tiene un contenido máximo de carbono que varía entre 0.25% y 0.29%, dependiendo del espesor. Según la norma de la ASTM A36, la composición química debe ser la siguiente:

**Tabla 3. 2 Composición Química del Acero A36**

PRODUCTO	VIGAS	PLACAS				
		3/4	De 3/4 a 1 1/2	De 1 1/2 a 2 1/2	De 2 1/2 a 4	Sobre 4 in
ESPEJOR, in	TODAS	Hasta 20mm	20mm a 40mm	De 40mm a 65mm	De 65mm a 100mm	Sobre 100mm
(mm)		...	...	...	0.80-1.20	0.80-1.20
CARBON, Max%	0.26	0.25	0.25	0.26	0.27	0.29
MANGANESIO %	...	...	...	0.80-1.20	0.80-1.20	0.85-1.20
FOSFORO, MAX%	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
SULFURO, Max %	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
SILICIO, %	0.40 Max	0.40 Max	0.40 Max	0.15-0.40	0.15-0.40	0.15-0.40
COBRE, Min% cuando el cobre es especificado en el acero	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20

Fuente: Datos del Proveedor

A continuación en la siguiente tabla se hace una comparación del porcentaje de elementos químicos que nos pide la norma con los porcentajes que ofrece el proveedor del acero A36 Grado A.

**Tabla 3. 3 Datos de la composición química del acero ASTM A36 Grado A que debería tener según la norma y las que ofrece el proveedor**

ESPESOR DE PLANCHA: 12 mm NORMA AWS D1.1		PROVEEDOR	OBSERVACION
Elemento	Composición %	Composición %	
Carbón (C)	0,15 - 0,25	0,25	OK
Silicio (Si)	0,25 – 0,40	0,36	OK
Fosforo (P)	0,04 max.	0,028	OK
Sulfuro	0,05 max.	0	OK

Fuente: Norma AWS A5.20-75 y Datos del proveedor

Por lo tanto se determina que las planchas de acero ASTM A36 Grado A tiene buenas características de soldabilidad según los parámetros establecidos en la norma AWS D1.1

Acero A588: es un acero de calidad estructural de alta resistencia y baja aleación, empleado en la construcción de estructuras, puentes, torres de energía y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas. En la mayoría de los ambientes, la resistencia a la corrosión atmosférica de este acero, es sustancialmente mejor que la de los aceros estructurales al carbono, con o sin adición de cobre. Cuando se expone adecuadamente a la atmósfera este acero se puede usar sin recubrimiento en algunas especificaciones.

**Tabla 3. 4 Composición Química del Acero A588**

<b>Composición química de la colada (Acero A - 588)</b>	
Carbono (C)	0,19% máx.
Manganeso (Mn)	1% min.
Silicio (Si)	0,30% – 0,65%
Fósforo (P)	0,04% máx.
Azufre (S)	0,05% máx.
Cobre (Cu)	0,25% - 0,40%
Níquel (Ni)	0,40% máx.
Cromo (Cr)	0,40% – 0,65%
Vanadio	0,02% - 0,1%

Fuente: Datos del Proveedor

En caso de que el acero a utilizar para la fabricación no cumpla con los requerimientos mencionados en su composición química, solo tendrá una buena soldabilidad y será utilizado si el carbono equivalente del material es mínimo del 0.45% según la fórmula que establece el código AWS D1.5 y que se muestra a continuación:

$$C + \frac{Mn + Si}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} = CE\% \quad 3.1$$

A continuación en la siguiente tabla se hace una comparación del porcentaje de elementos químicos que nos pide la norma AWS D1.5 con los porcentajes que ofrece el proveedor del acero A588 Grado A para diferentes espesores. En el caso de que el acero no cumpla con los requerimientos de la norma AWS D1.5 solo será utilizado si el carbono equivalente del material es mínimo del 0.45%.

**Tabla 3. 5 Datos de la composición química del acero ASTM A 588 Grado A que debería tener según la norma AWS D1.5 y las que ofrece el proveedor.**

ESPESOR DE PLANCHA: 15 mm NORMA AASHTO/AWS		PROVEEDOR	OBSERVACION
Elemento	Composición %	Composición %	
Carbón (C)	0,19 máx.	0,17	OK
Manganeso (Mn)	1 min.	0,98	No Cumple
Silicio (Si)	0,30 – 0,65	0,36	OK
Cromo (Cr)	0,40 - 0,65	0,5	OK
Vanadio (V)	0,02 – 0,1	0,038	OK
Níquel (Ni)	0,40 máx.	0,33	OK
Cobre (Cu)	0,25 – 0,40	0,36	OK
Molibdeno (Mo)	0,02 min.		

Fuente: Norma AWS A5.20-75 y datos del proveedor

En este caso el acero a utilizarse para la fabricación no cumple con los requerimientos de su composición química; es así que se debe aplicar la fórmula que establece el código AWS D1.5:

$$0,17 + \frac{0,98 + 0,36}{6} + \frac{0,5 + 0,02 + 0,038}{5} + \frac{0,33 + 0,36}{15} = \%CE$$

$$0,17 + 0,22 + 0,11 + 0,05 = 0,55\%$$

CE (%) =0,550 por lo tanto se determina que las planchas de acero ASTM A 588 Grado A cumple con los requerimientos de la norma, que dice que solo tendrá una buena soldabilidad y será utilizado si el carbono equivalente del material es mínimo del 0.45%

Requerimientos mecánicos:

Se especifica que para planchas de hasta 100 mm de espesor debe cumplir con las siguientes características mecánicas que se muestran en la tabla:

**Tabla 3. 6 Propiedades Mecánicas del Acero A588**

Propiedades Mecánicas					
LÍMITE DE FLUENCIA		RESISTENCIA A LA TRACCIÓN		ELONGACIÓN	
MÍNIMO		MÍNIMA		MÍNIMA	
Mpa	Psi	Mpa	Psi	%	En 200mm (8 pulgadas)
345	50.000	485	70.000	18*	

Fuente: Datos del proveedor

### 3.1.2 ELECTRODOS

La norma nos indica que la resistencia a la tracción del material de aporte deberá ser mayor o igual al valor mínimo especificado correspondiente al metal base, además de esto, debemos basarnos en los siguientes factores:

- Propiedades mecánicas del metal base a soldar
- Composición química del metal base a soldar
- Espesor y forma del metal base a soldar.
- Especificaciones y condiciones de servicio de la estructura a fabricar.
- Tratamiento térmico que se aplicará a la estructura a fabricar
- Posiciones de soldadura posibles durante la fabricación
- Tipo de corriente de soldadura y polaridad a emplear.
- Diseño de la unión.
- Eficiencia en la producción y condiciones de trabajo.

Los materiales de aporte, electrodos y fundentes a utilizarse deben cumplir con las especificaciones correspondientes indicadas en la siguiente tabla.

**Tabla 3. 7 Requisitos correspondientes a los electrodos y/o materiales de aporte o fundentes**

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS DE LOS ELECTRODOS	NORMA
Electrodos de acero al carbono para SMAW	Electrodos revestidos	NTE INEN 1390
Electrodos de acero inoxidable para SMAW	Electrodos revestidos	AWS A5.4/ A5.4M
Electrodos de acero de baja aleación para SMAW	Electrodos revestidos	NTE INEN 1390
Electrodos de tungsteno y tungsteno aleado para soldadura al arco y corte	Electrodos no consumibles	AWS A5.12/A5.12M
Electrodos de acero al carbono y fundentes para SAW	Alambre sólido en rollo y fundente granular	AWS A5.17/ A5.17M
Electrodos y varillas de acero al carbono para soldadura por arco con protección gaseosa.	Alambre sólido en rollo y varillas	AWS A 5.18/ A5.18M
Electrodos de acero al carbono para FCAW	Alambres tubulares en rollo	AWS A5.20/A5.20M
Electrodos de acero inoxidable para FCAW y varillas de acero inoxidable para GTAW	Alambre sólido en rollo y varilla	AWS A5.22
Electrodos de acero de baja aleación y fundentes para SAW	Alambre sólido en rollo y fundente granular	AWS A5.23/A5.23M
Electrodos de acero y de baja aleación y fundentes para ESW ( Soldadura por electroescoria)	Alambre en rollo y fundente granular	AWS A5.25/A5.25M
Electrodos de acero y de baja aleación y fundentes para EGW ( Soldadura por electrogas)	Alambre sólido y/o tubular en rollo.	AWS A5.26/A5.26M
Electrodos y varillas de acero de baja aleación para soldadura por arco con protección gaseosa.	Alambre sólido en rollo y varillas	AWS A5.28/A5.28M
Electrodos de Acero de baja aleación para FCAW	Alambre tubular en rollo	AWS A5.29/A5.29M

Reglamento Técnico Ecuatoriano de “Diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero”

Electrodo E71T-1: es un alambre tubular usado para substituir el alambre sólido por sus ventajas como aporte MIG, debido a su excelente soldabilidad y terminación, por su alta relación de deposición y baja pérdida por salpicaduras. Su escoria es de fácil remoción. Posee una excelente soldabilidad en todas las posiciones con gas CO<sub>2</sub>.

Está desarrollado especialmente para soldar aceros al Carbono tanto en pases simples o múltiples. Su composición química, con contenidos equilibrados de Manganeso y Silicio, permiten una excelente desoxidación, consiguiendo uniones soldadas de elevadas propiedades mecánicas y alta calidad radiográfica y de bajo contenido de Hidrógeno difusible. Su resistencia a impacto excede lo mínimo requerido por la norma AWS y ASME.

Es recomendado especialmente para soldar aceros estructurales, para calderas, industria naval, estanques, estructuras, tubos, aceros fundidos,

construcción de equipos mineros y de cualquier equipo de la industria en general.

**Tabla 3. 8 Propiedades del electrodo E71T-1**

PROPIEDADES MECANICAS (metal depositado)		ASME / AWS A5.20
Resistencia a Tracción	N/mm <sup>2</sup>	490 a 670 N/mm <sup>2</sup>
Límite Elástico	N/mm <sup>2</sup>	> 390 N/mm <sup>2</sup>
Alargamiento (l=5d)	%	> 22 %
Test de Impacto a -20°C	J	> 27 J

COMPOSICION QUIMICA
C < 0,12% ; Mn < 1,75% ; Si < 0,90% ; Cu < 0,35% ; Ni < 0,50% ; Cr < 0,20% ; Mo < 0,30% ; V < 0,08%

Fuente: Datos de proveedor

Características:

Especificación: SFA A5.20

Marca: LINCOLN WELD

Diámetro: 1,2 mm.

NICROSOL E81T1-Ni 1: es un alambre tubular usado como aporte MIG que ofrece grandes ventajas por su excelente soldabilidad, tanto en pases simples o múltiples, de bajo contenido de Hidrógeno difusible y por su alta relación de deposición. Su escoria es de fácil remoción. Posee una excelente soldabilidad en todas las posiciones con gas CO<sub>2</sub>.

Está desarrollado especialmente para soldar aceros al Carbono y aceros de baja aleación que deben trabajar a la intemperie. Su composición química conteniendo 1% de Níquel permite conseguir uniones soldadas de alta resistencia al impacto y elevadas propiedades mecánicas y de alta calidad radiográfica.

Es recomendado especialmente para soldar estructuras, para la industria naval, estanques, aceros de grano fino, construcción y mantenimiento de equipos mineros y de cualquier equipo de la industria que deban trabajar a temperaturas de -30° C.

**Tabla 3. 9 Propiedades del electrodo NICROSOL E81T1-Ni 1**

PROPIEDADES MECANICAS (metal depositado)		ASME / AWS A5.29
Resistencia a Tracción	N/mm2	550 a 690 N/mm2
Límite Elástico	N/mm2	> 470 N/mm2
Alargamiento (l=5d)	%	> 19 %
Test de Impacto a -30°C	J	> 27 J

COMPOSICION QUIMICA
C < 0,12% ; Mn < 1,50% ; Si < 0,80% ; Ni : 0,80% - 1,10% ; Cr < 0,15% ; Mo < 0,35% ; V < 0,05%

Fuente: Datos de proveedor

Características:

Especificación: AWS A5.29

Marca: LINCOLN WELD

Diámetro: 1,2 mm.

El electrodo E71T-1 será utilizado para soldar las placas de acero ASTM A 36 Grado A, ya que está desarrollado especialmente para soldar aceros al Carbono.

Mientras que el electrodo NICROSOL E81T1-Ni 1, servirá para la soldadura del acero ASTM A 588 Grado A por su aplicación en soldadura de aceros de baja aleación que deben trabajar a la intemperie, en este caso en un puente.

Además, estos electrodos cumplen con el requerimiento de la norma, que indica que la resistencia a la tracción del material de aporte deberá ser mayor o igual al valor mínimo especificado correspondiente al metal base.

### 3.2 FABRICACION

El proceso de soldadura de las placas, de acero A 36 y A588, así como la elaboración de las probetas para los distintos ensayos que se realizaron, en la Fábrica de Municiones Santa Bárbara F.M.S.B.

### **3.2.1 EQUIPOS**

Las instalaciones de la F.M.S.B cuentan con los siguientes equipos:

#### **Equipo de Soldadura:**

Soldadora

Marca: Lincoln Electric

Modelo: Invertec V350 - Pro

Partes:

- Regulador de amperaje.
- Cable para tierra.
- Pinza de trabajo.
- Tanque de CO<sub>2</sub>
- Alimentador LN-25 Pro

#### **Equipo de Corte con Oxiacetileno**

Partes:

- Botella de oxigeno.
- Botella de acetileno.
- Boquilla de corte.
- Chispero

#### **Equipo para elaboración de probetas:**

- Sierra vaiven marca A.E.G
- Cepilladora marca ATLAS
- Fresadora marca Werner

#### **Equipo de Seguridad industrial**

- Gafas
- Overol

- Guantes
- Mascarilla
- Botas con puntas de acero
- Mascarilla antiflama
- Casco

### **3.2.2 MANO DE OBRA**

En lo que respecta a la mano de obra ha sido seleccionada de acuerdo a las necesidades de este proyecto, debido a que se necesita personal calificado y de experiencia para que los estudios realizados sean lo más reales posibles. Los siguientes trabajos fueron realizados por personal calificado:

- Soldadura.- Todos los cordones de soldadura han sido realizados por el Sr. Alexander Suntaxi empleado de la F.M.S.B, persona calificada y certificada para el proceso de soldadura FCAW según la Norma AWS D5.1, para así evitar fallas en el cordón de soldadura.
- La elaboración de probetas.- Fue realizada por el personal de la F.M.S.B encargado del área de Maquinas y Herramientas.

A continuación en la siguiente tabla se indica el número de probetas fabricadas para cada ensayo a diferentes temperaturas, según el acero y tipo de soldadura.

**Tabla 3. 10 Números de probetas fabricadas y sometidas a diferentes ensayos y varias temperaturas**

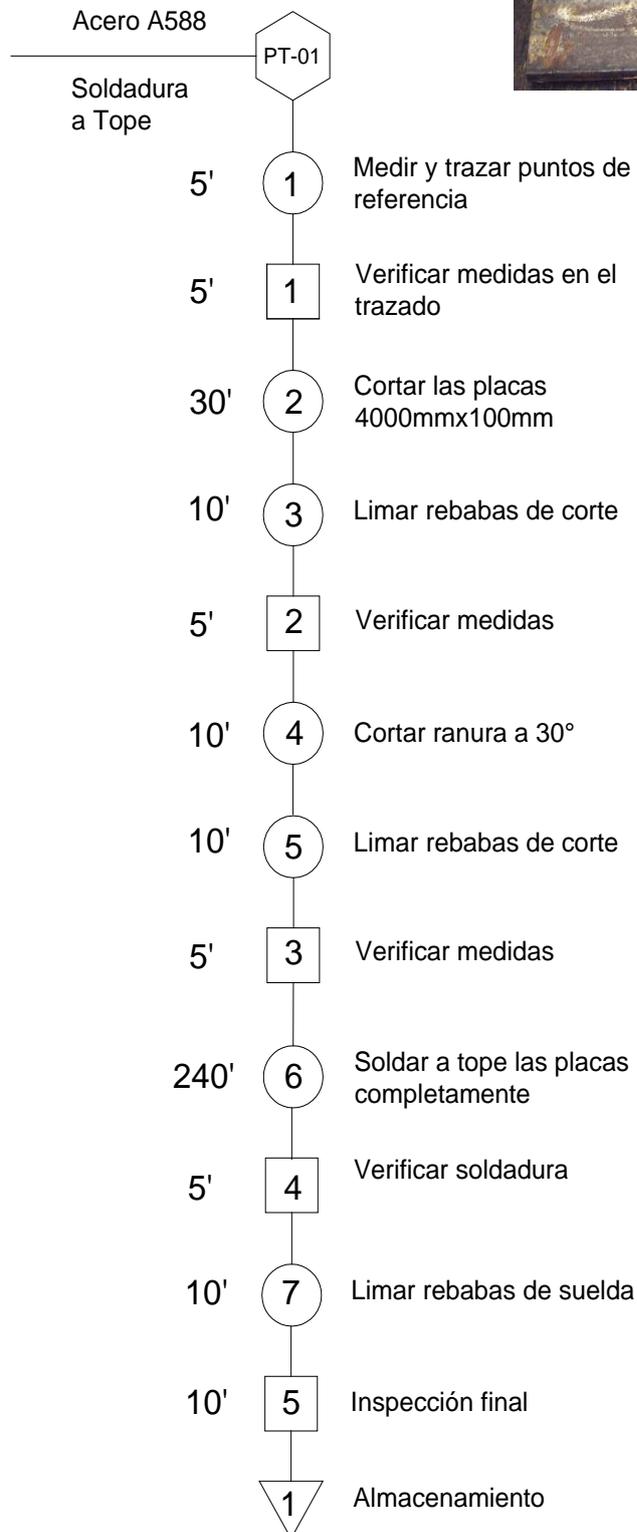
Ensayo/Unión	A Tope								Filete								Total
	A36				A588				A36				A588				
	Temp Amb.	300°C	600°C	900°C	Temp Amb.	300°C	600°C	900°C	Temp Amb.	300°C	600°C	900°C	Temp Amb.	300°C	600°C	900°C	
Tracción (Mat. Aporte)	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	24
Tracción (aporte y base)	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	16
Dureza	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Impacto	3	3	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	24
Macrográfico	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	24
Micrográfico	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Doblez	4	4	4	4	4	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	32
Rotura	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
Ultrasonido	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	8
Tintas Penetrantes	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	8
<b>Total</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>160</b>							

Fuente: Propia

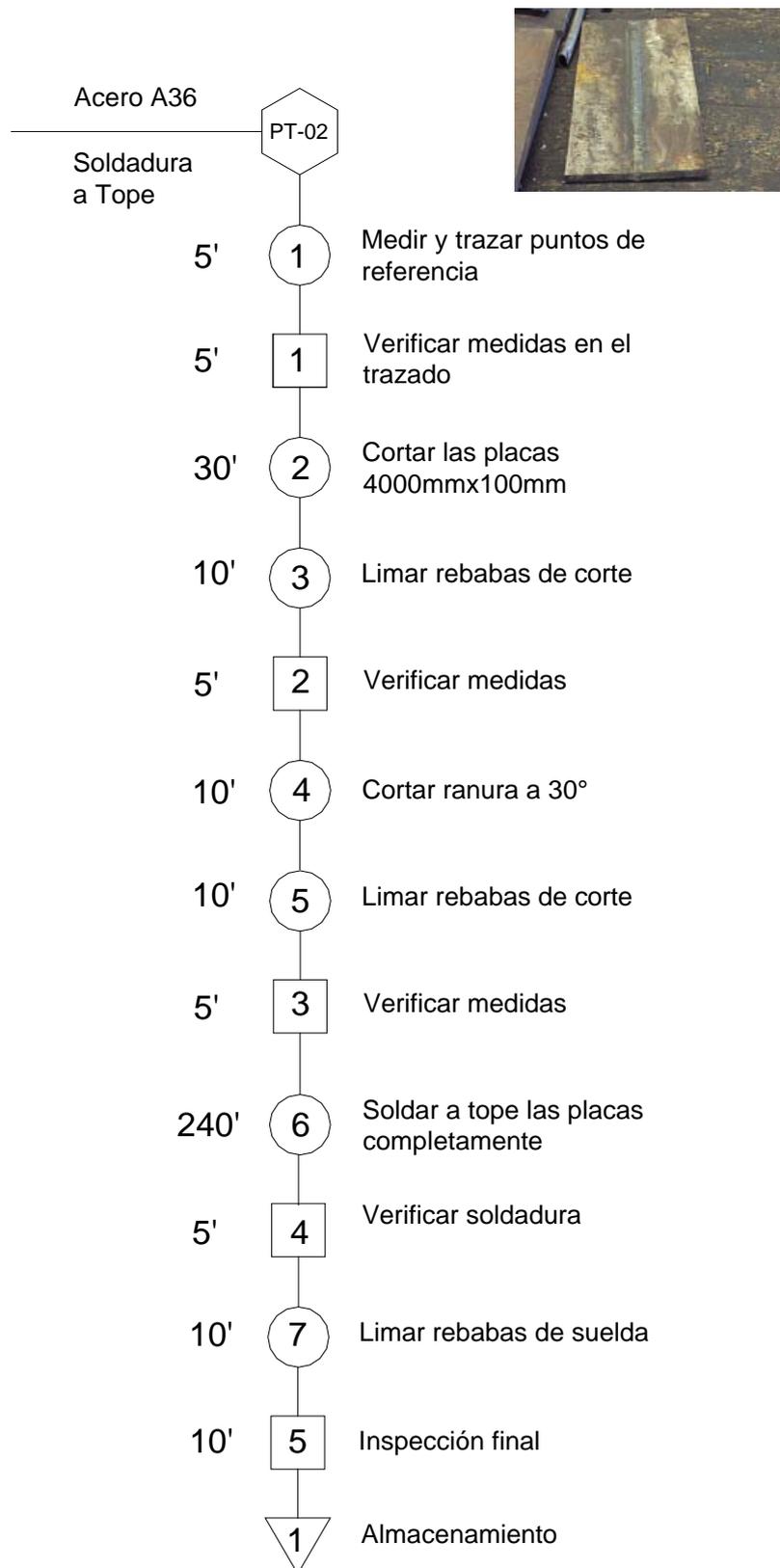
### 3.3 DIAGRAMAS DE FABRICACION DE PLACAS

#### Soldadura a tope en placas de acero

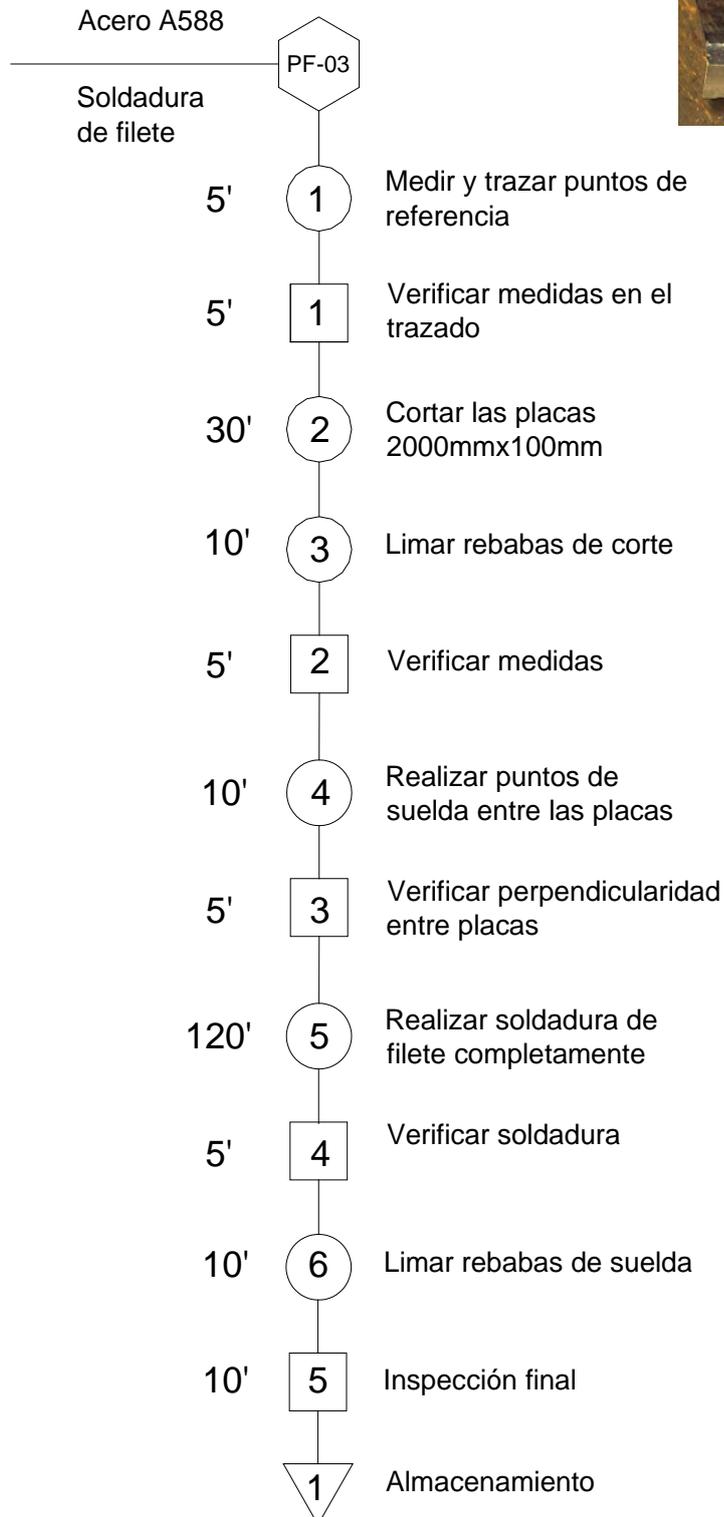
A588



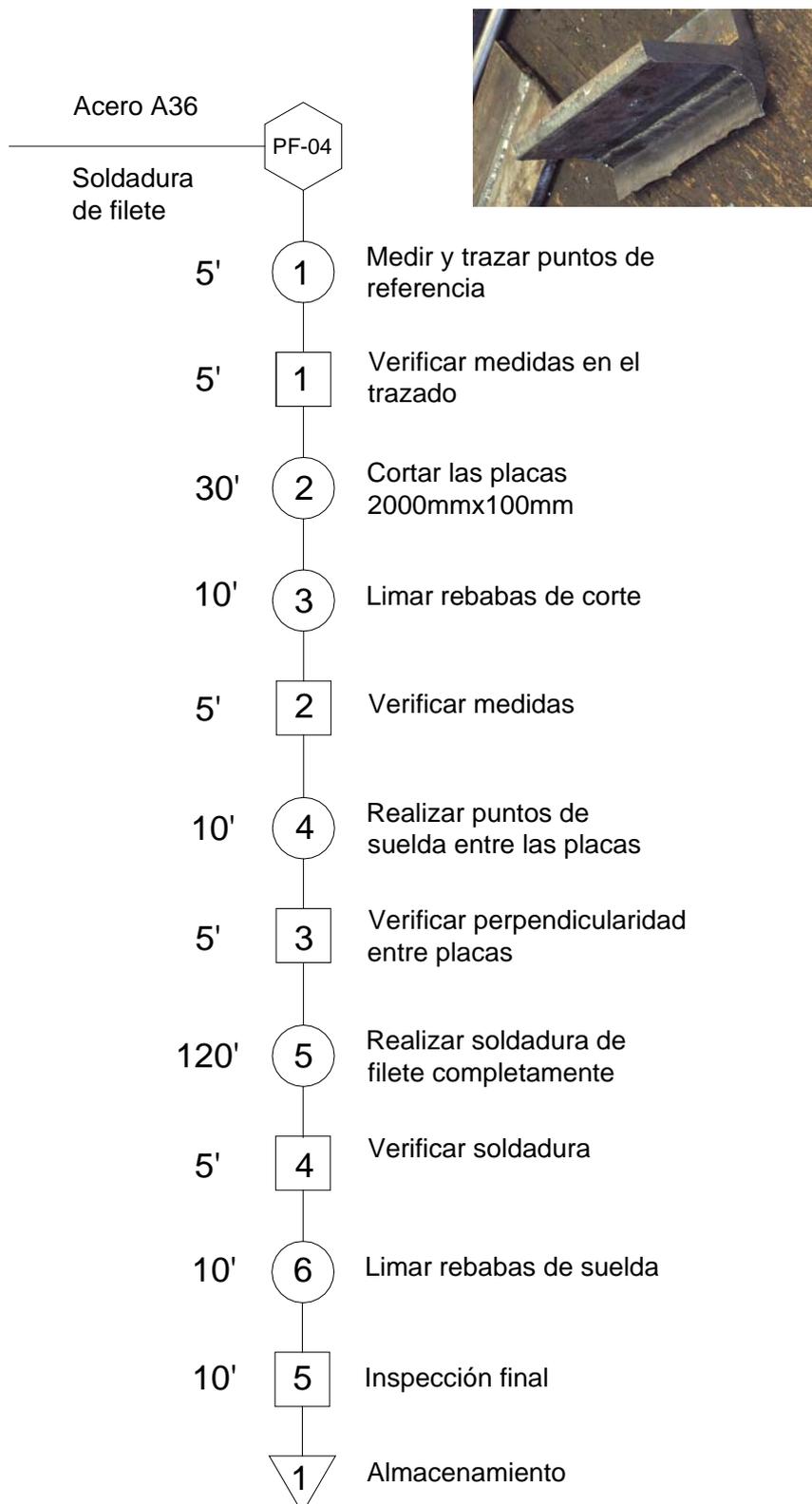
## Soldadura a tope en placas de acero A36



## Soldadura de filete en placas de acero A588

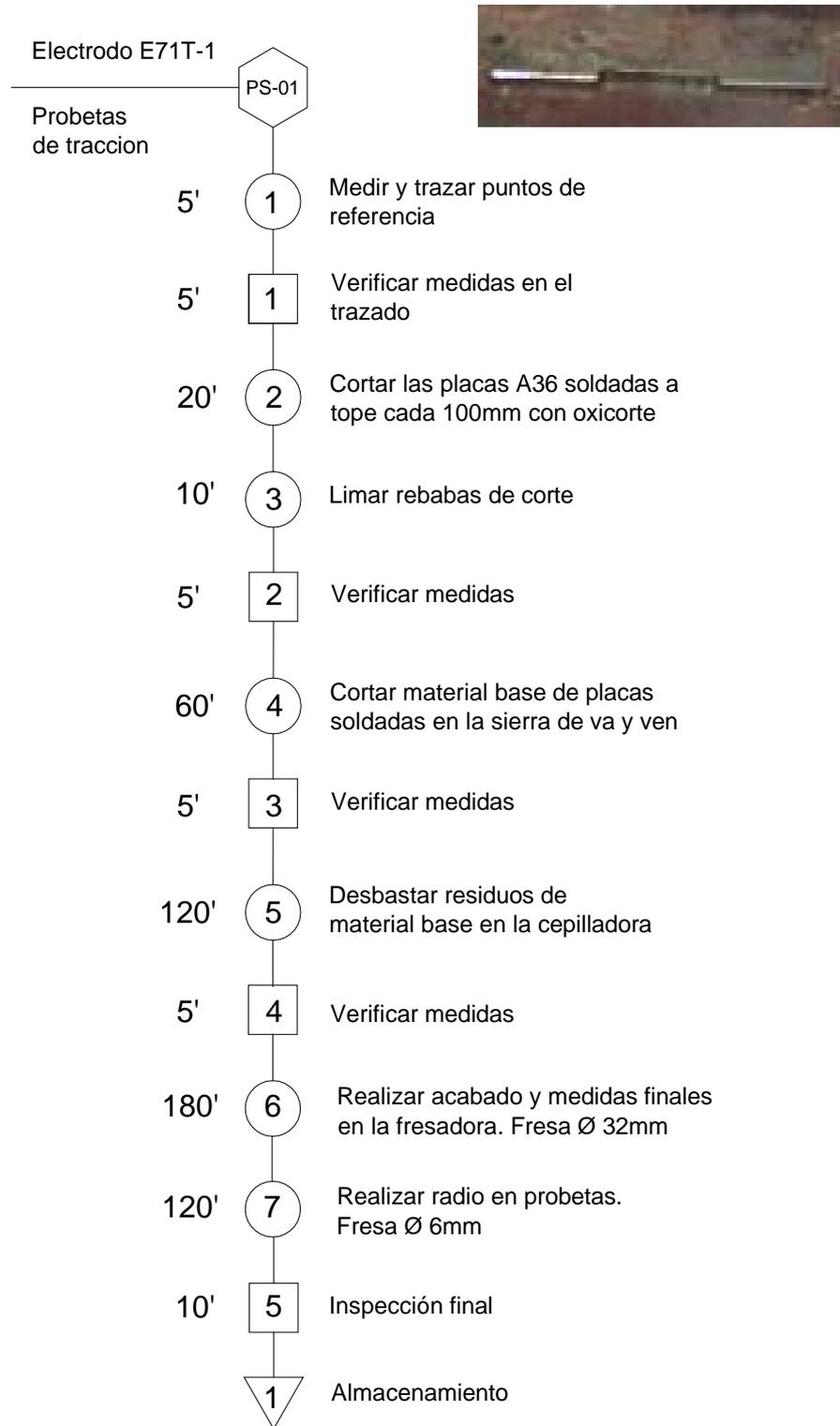


## Soldadura de filete en placas de acero A36



### 3.4 DIAGRAMAS DE FABRICACION DE PROBETAS

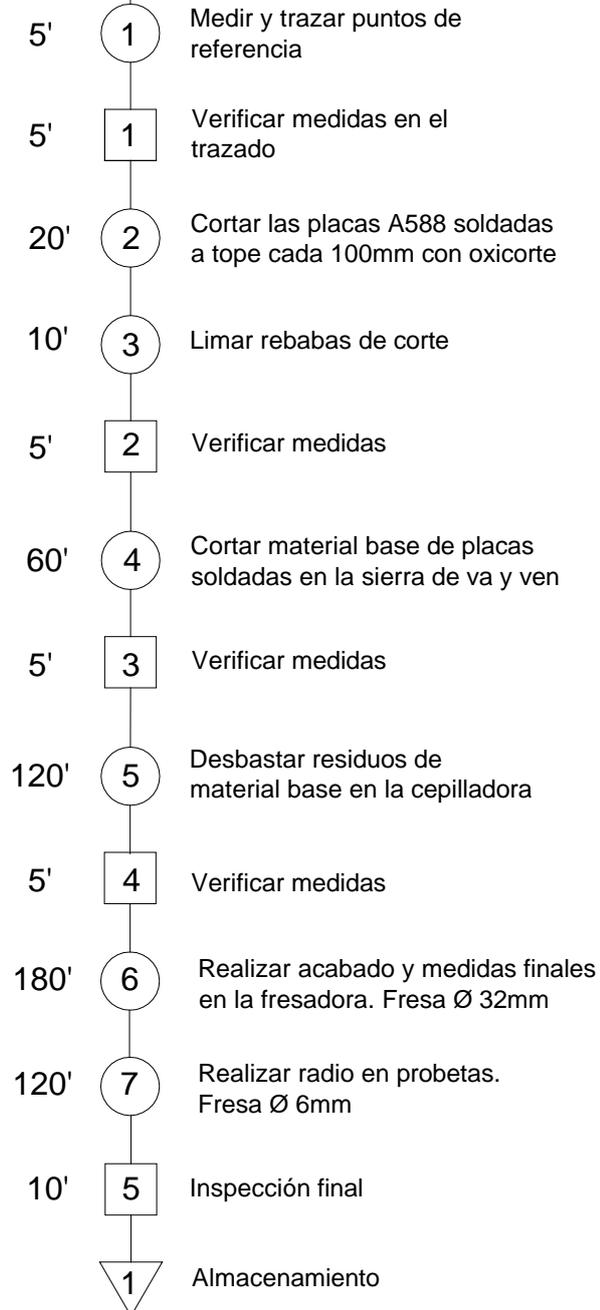
#### Probetas con electrodo E71T-1 para ensayo de tracción



## Probetas con electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de tracción

Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1  
Probetas  
de traccion

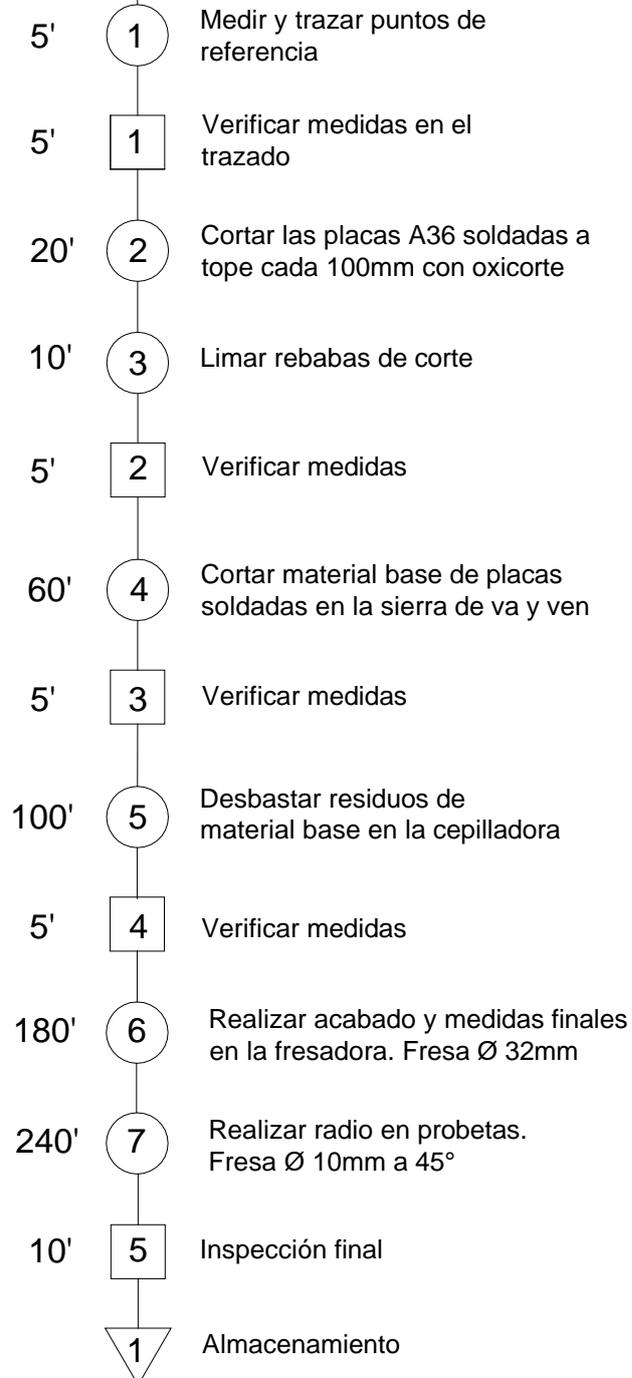
PS-02



## Probetas con electrodo E71T-1 para ensayo de impacto

Electrodo E71T-1  
 Probetas para ensayos de impacto

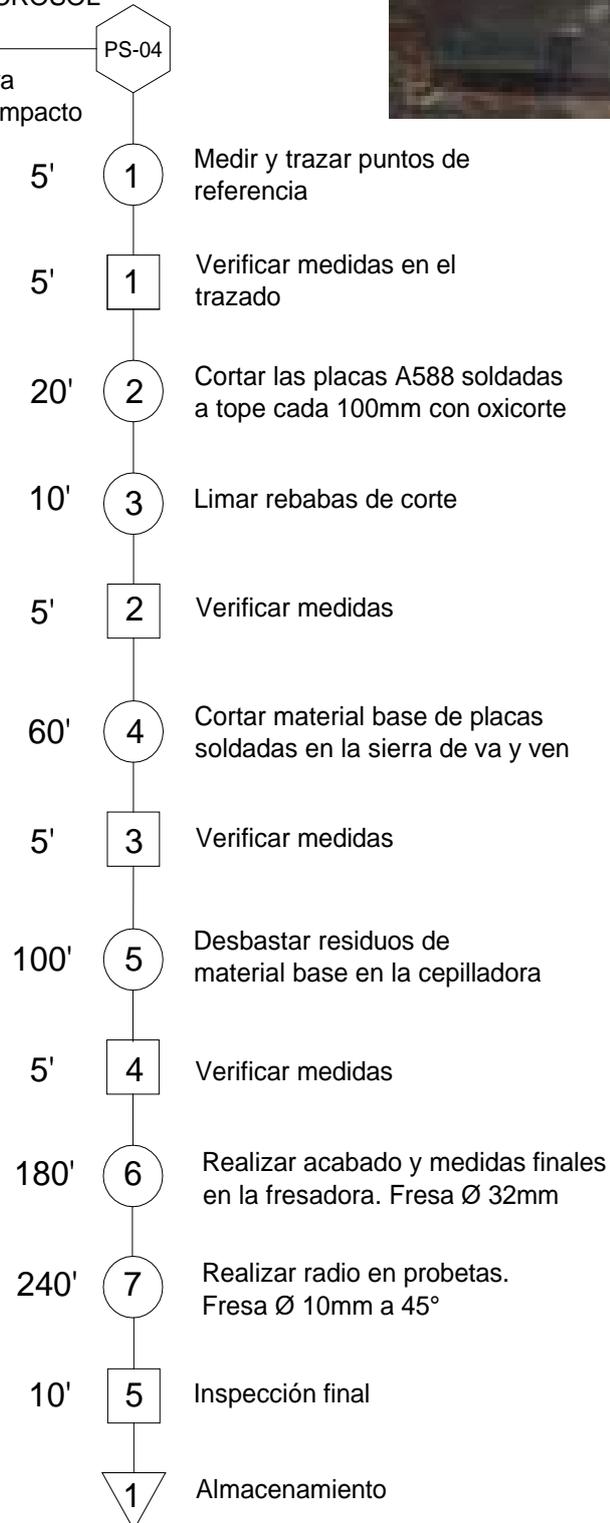
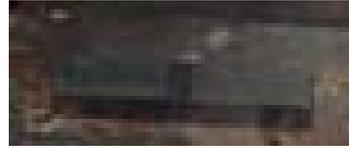
PS-03



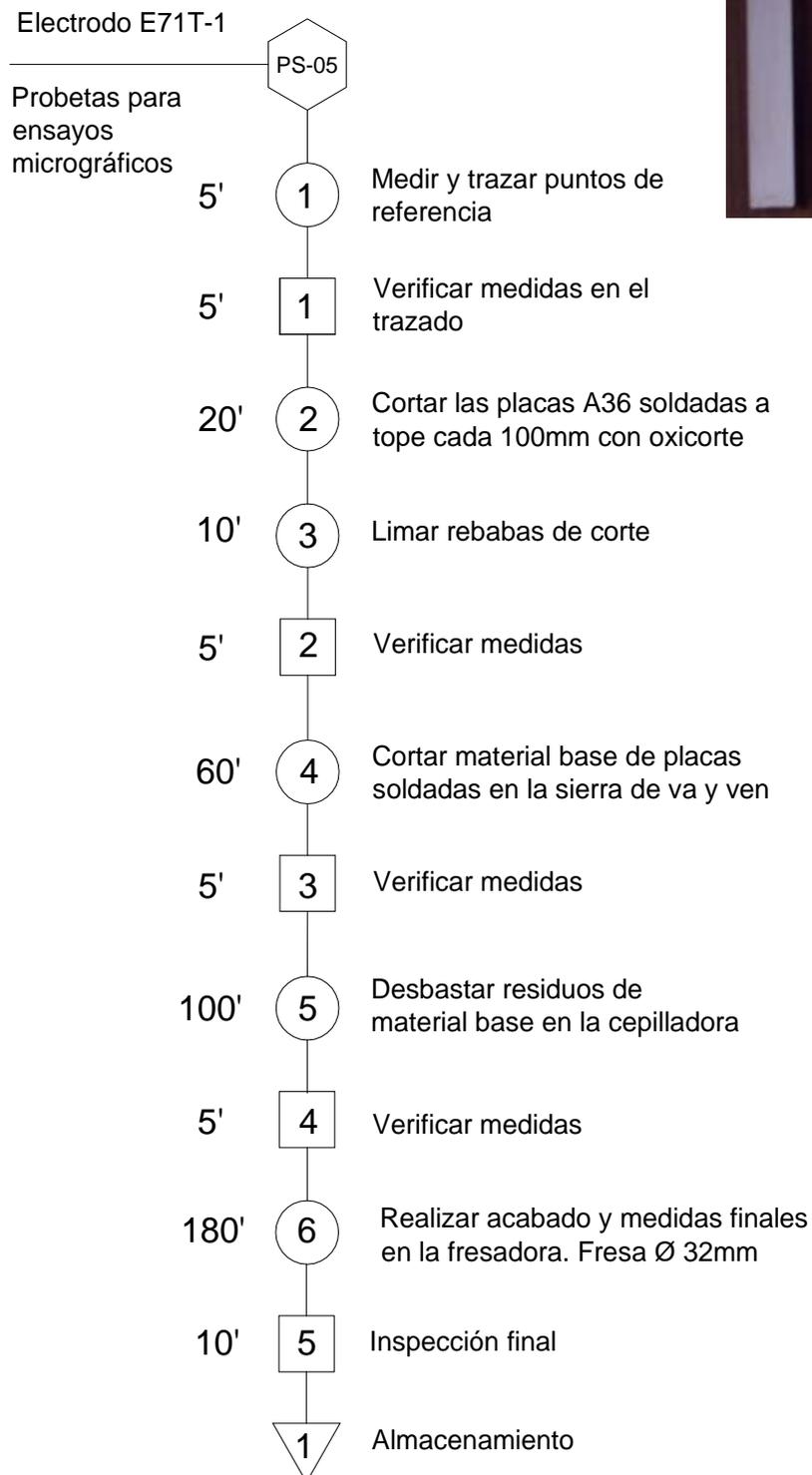
## Probetas con electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de impacto

Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1

Probetas para  
ensayos de impacto



## Probetas con electrodo E71T-1 para ensayos micrográficos

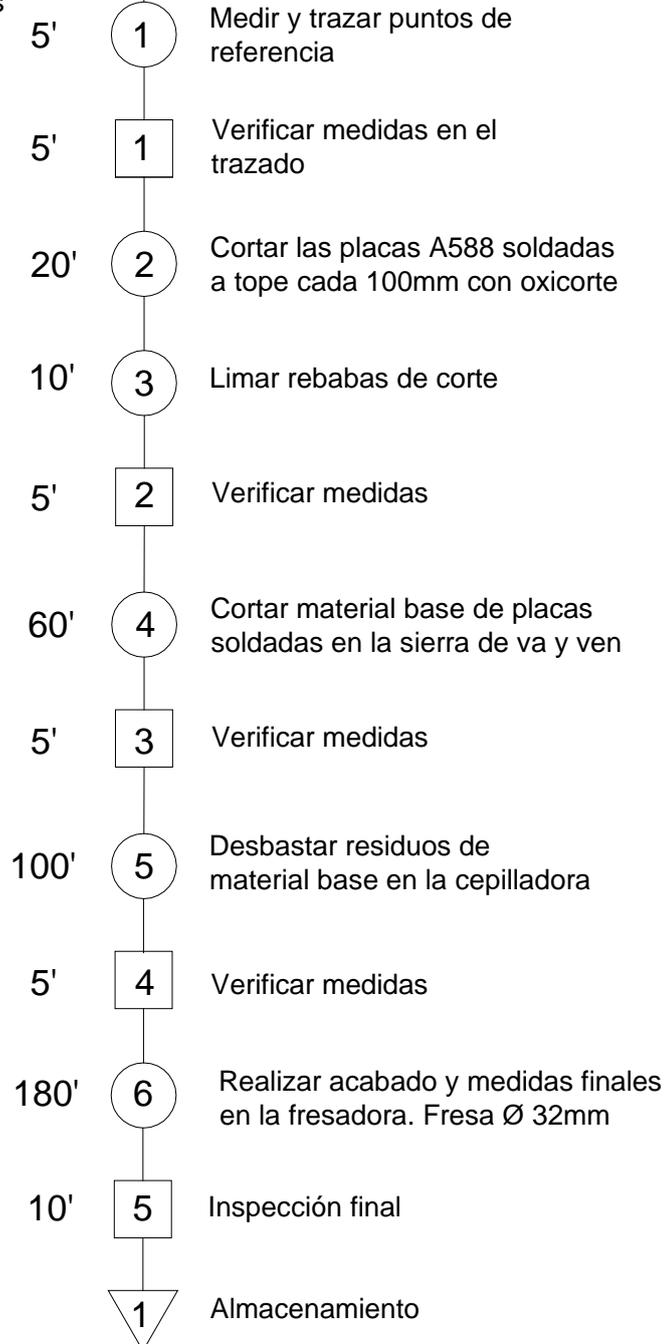
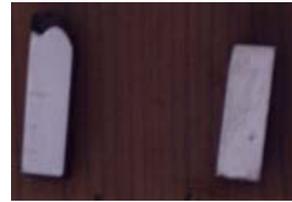


## Probetas con electrodo E81T1-Ni1 para ensayos micrográficos

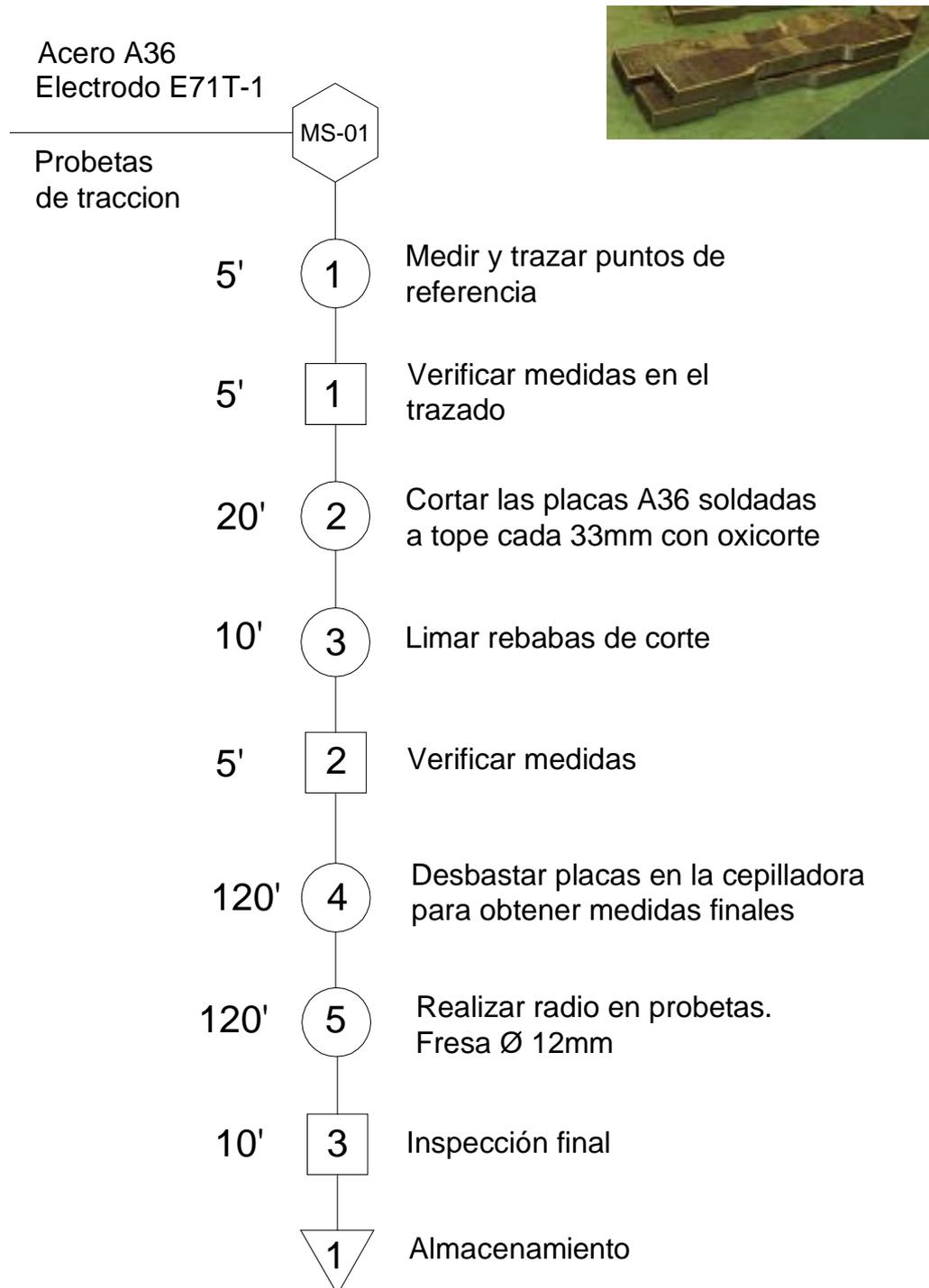
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1

Probetas para  
ensayos  
micrográficos

PS-06

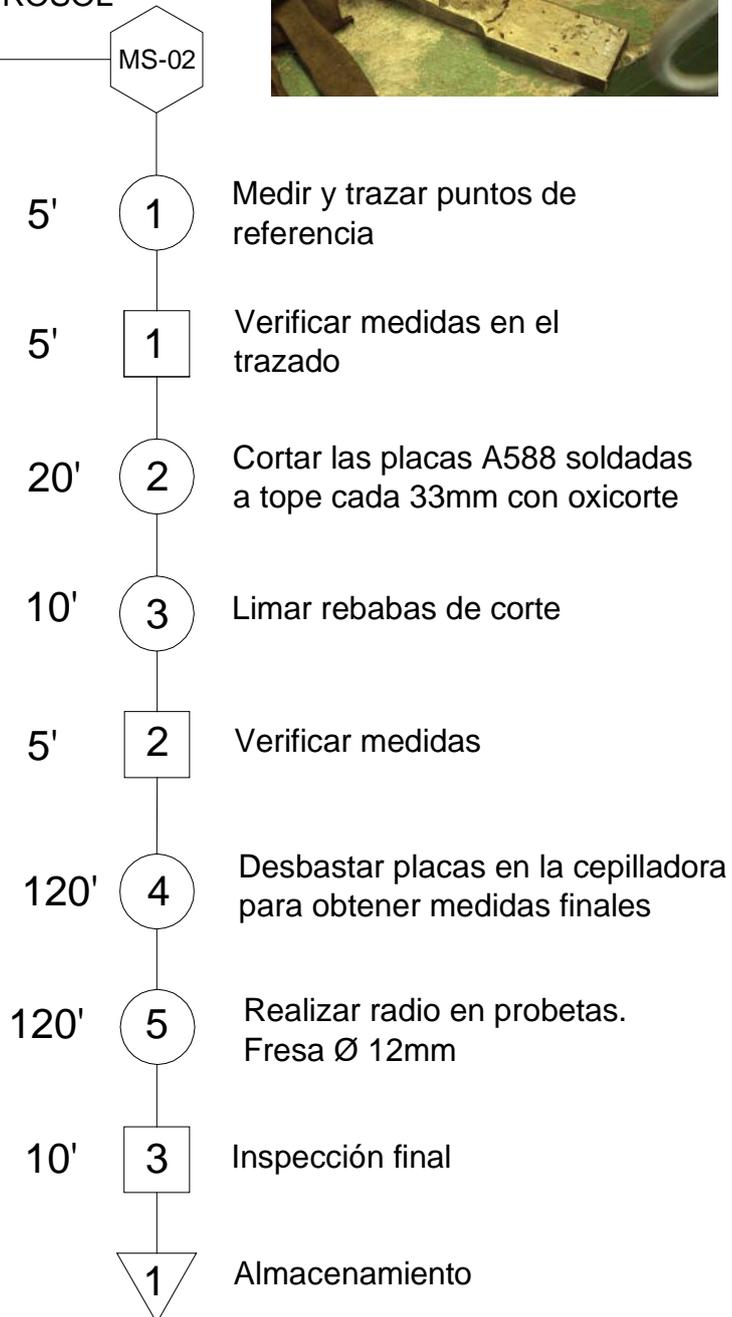


## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayo de tracción.

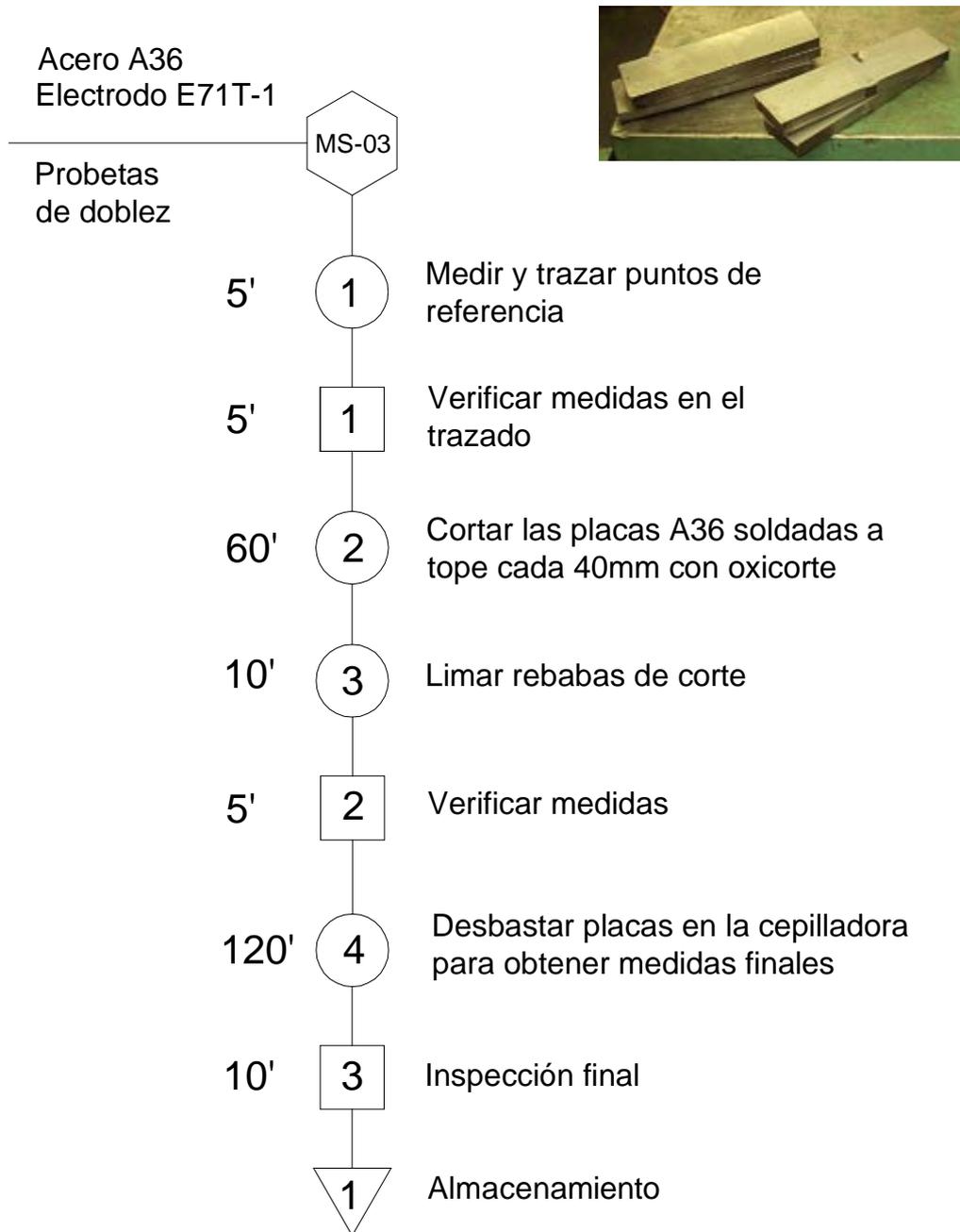


## Probetas con acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de tracción

Acero A588  
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1  
Probetas  
de traccion



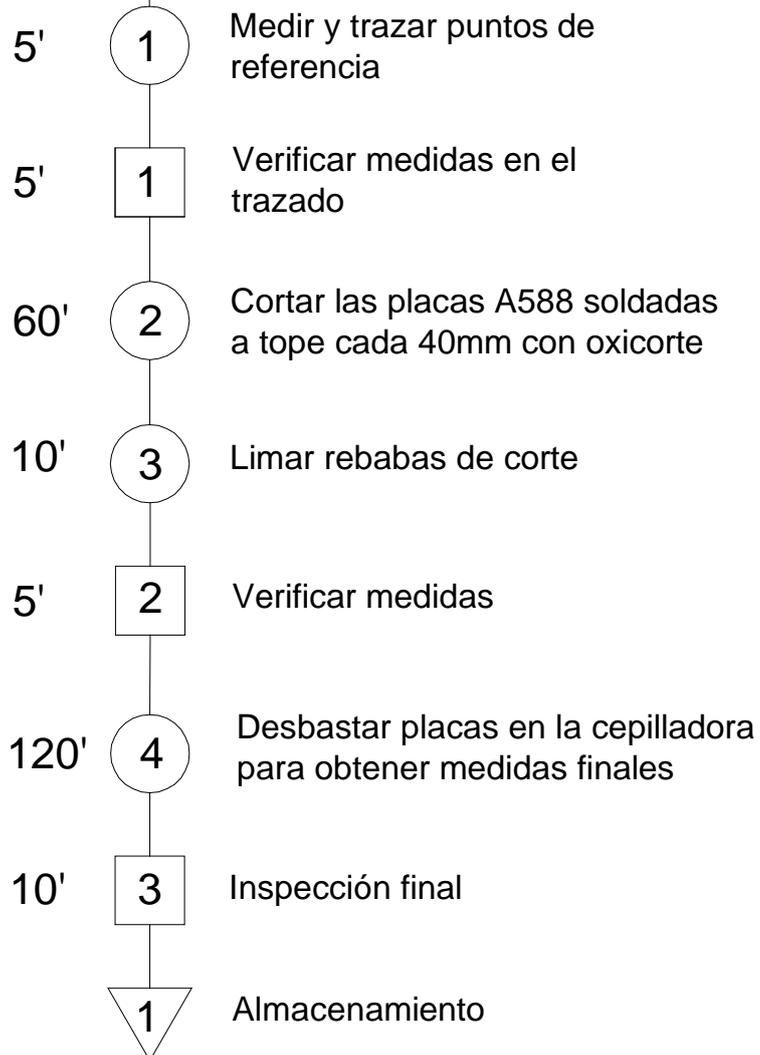
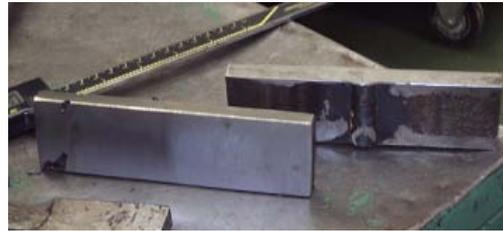
## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayo de doblez



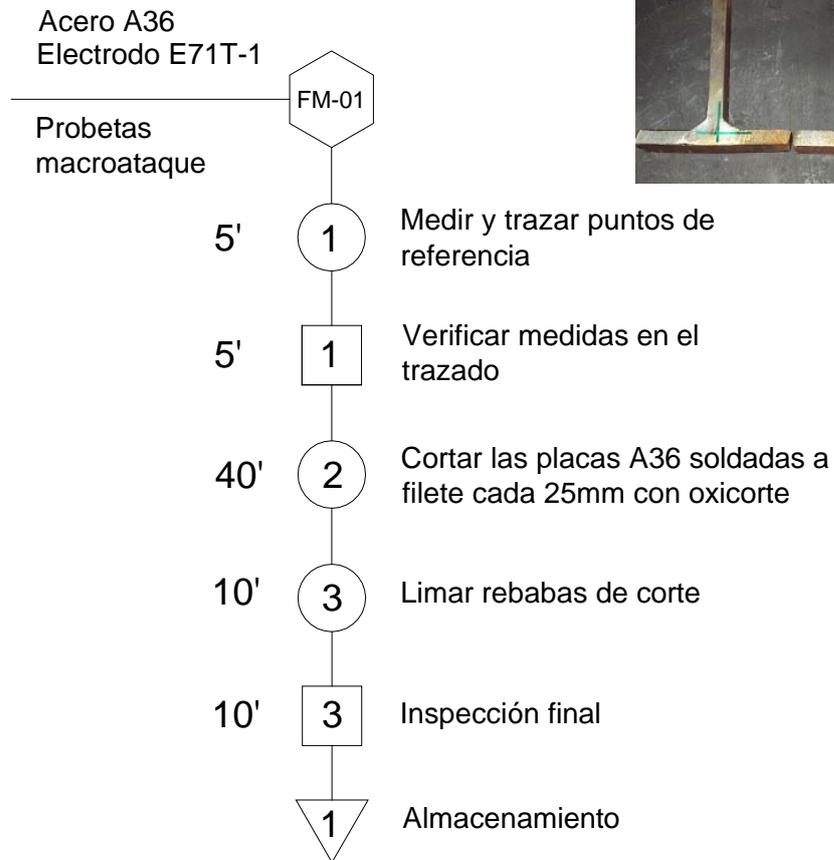
## Probetas con acero A588 con electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de doblez

Acero A588  
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1  
Probetas  
de doblez

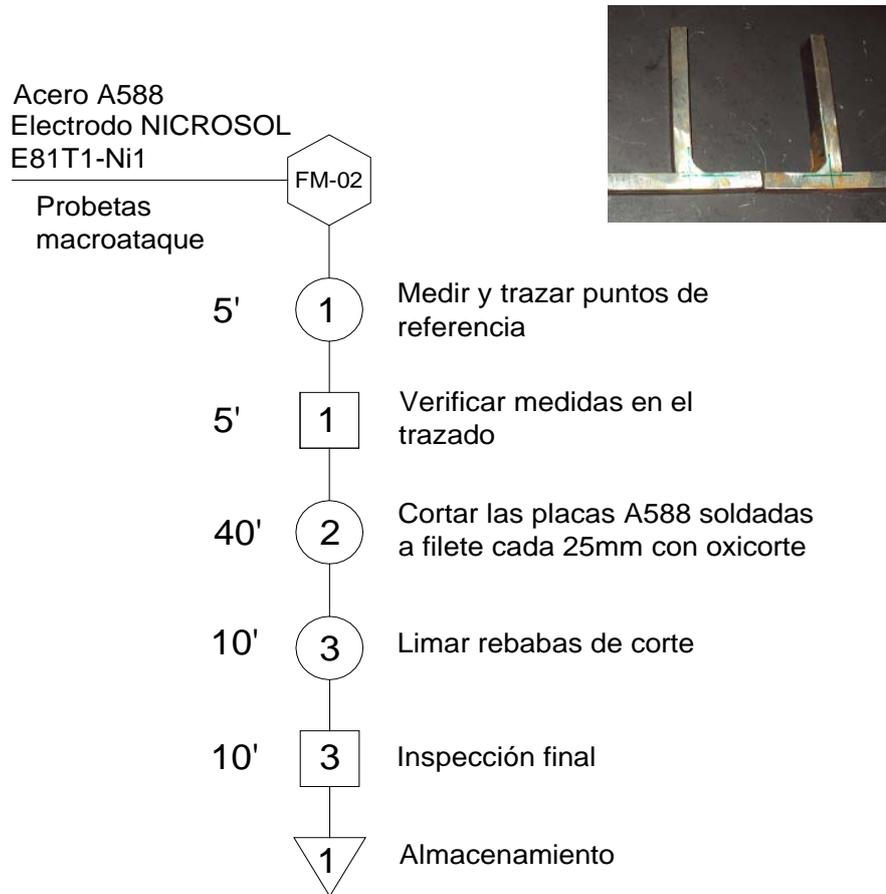
MS-04



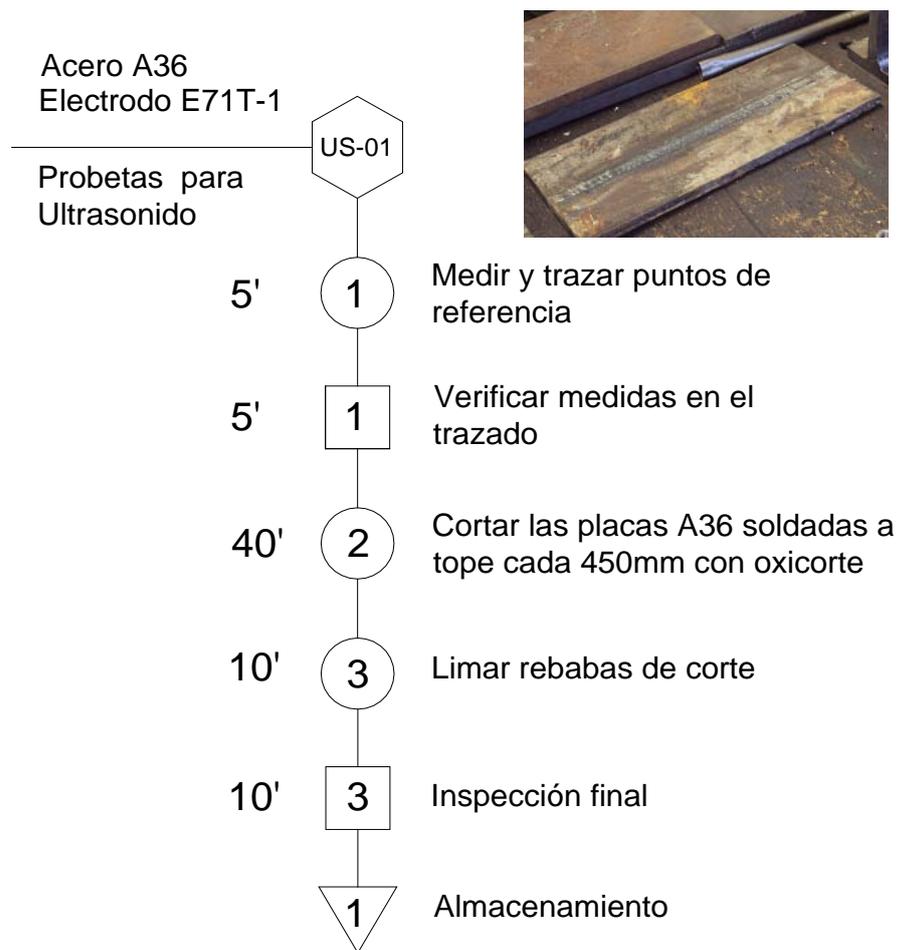
## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayos macrográficos



## Probetas con acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 para ensayos macrográficos



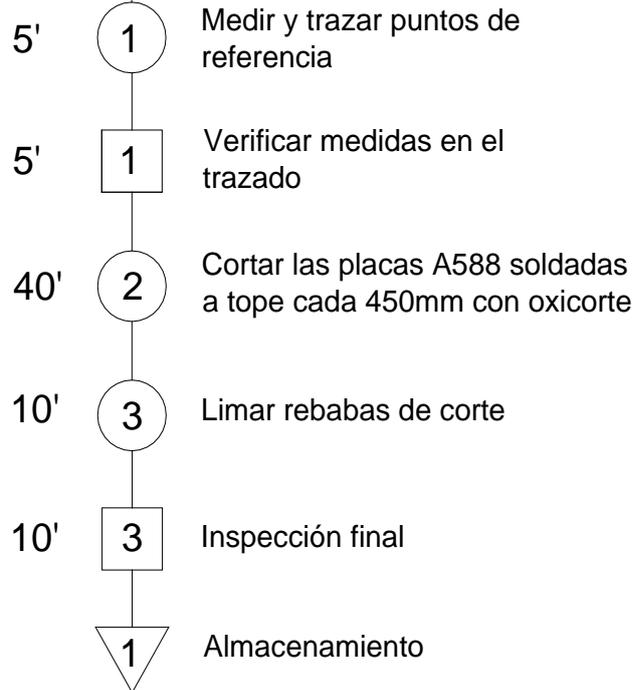
## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayo de ultrasonido



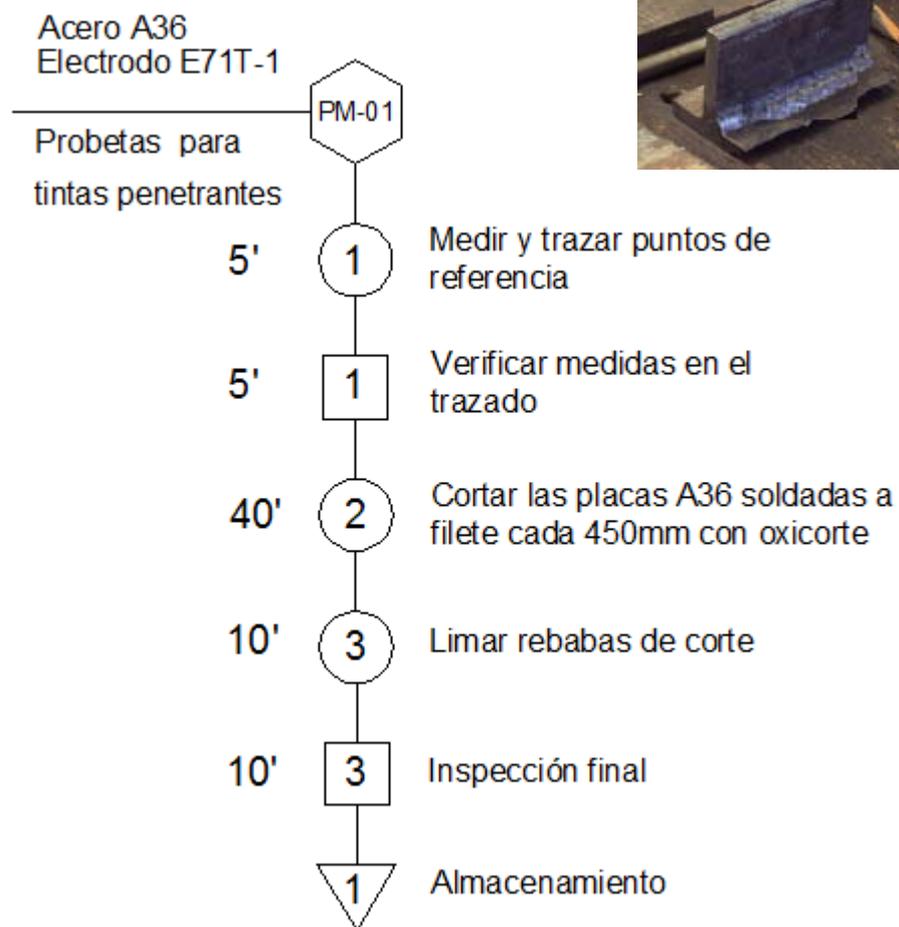
## Probetas con acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de ultrasonido

Acero A588  
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1  
Probetas para  
Ultrasonido

US-02



## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayos con tintas penetrantes

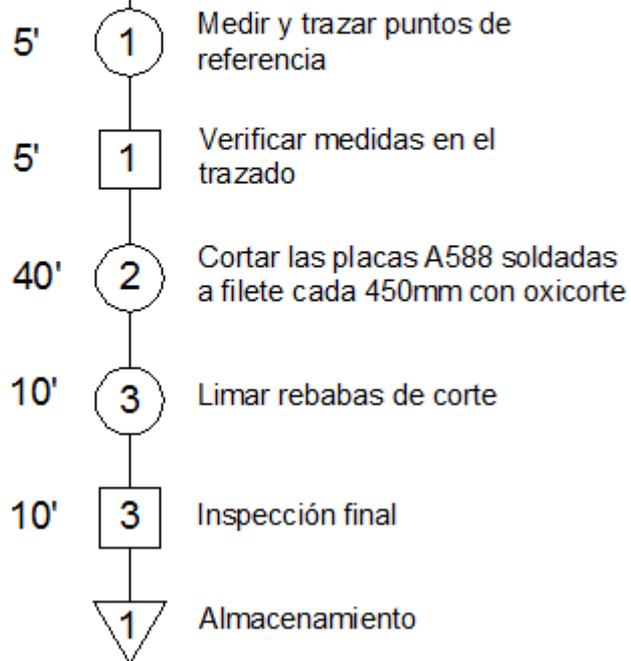


## Probetas con acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 para ensayos con tintas penetrantes

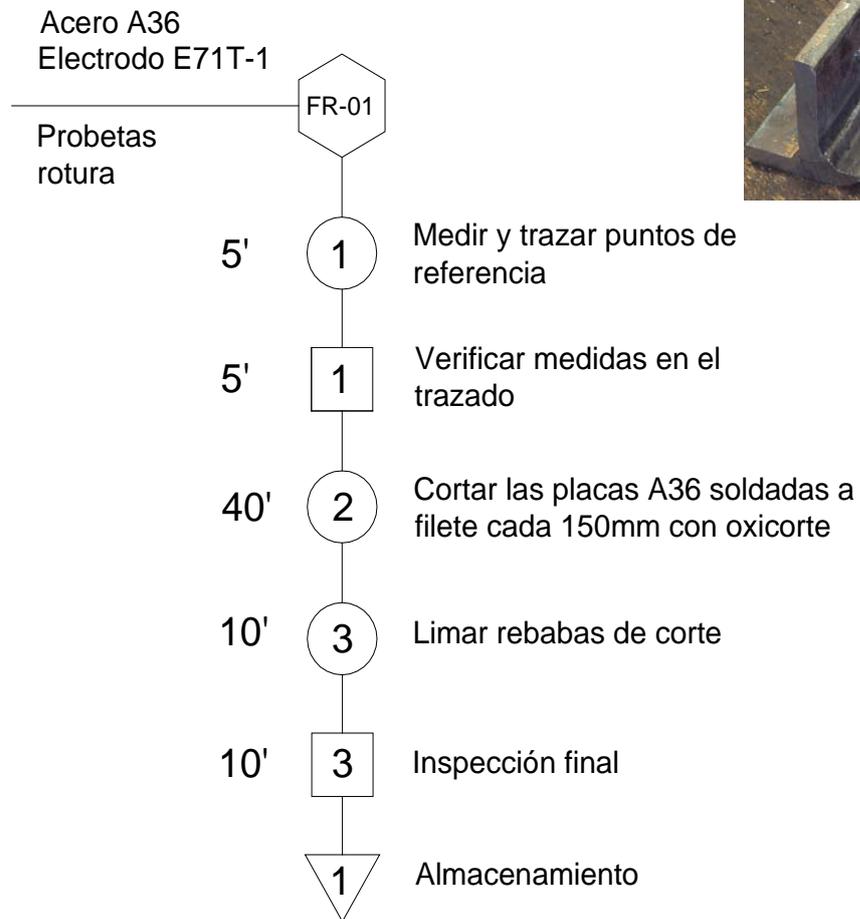
Acero A588  
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1

Probetas para  
Tintas Penetrantes

US-02



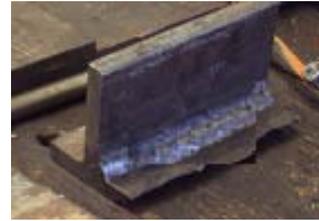
## Probetas con acero A36 y electrodo E71T-1 para ensayo de rotura



## Probetas con acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 para ensayo de rotura

Acero A588  
Electrodo NICROSOL  
E81T1-Ni1  
Probetas  
rotura

FR-02



## **CAPITULO 4**

### **EXPOSICIÓN A ALTAS TEMPERATURAS**

#### **4.1 RECURSOS TECNOLÓGICOS**

El proceso para alcanzar altas temperaturas fue realizado en el laboratorio de Máquinas y Herramientas perteneciente al DECEM, y los equipos utilizados en la exposición a altas temperaturas, son los que se listan a continuación:

- Soplete, con el que se apuntó directamente sobre las probetas durante un tiempo suficiente para que éstas alcancen las temperaturas deseadas.
- Gas doméstico, fueron necesarios dos tanques para la exposición de todas las probetas.
- Termocupla, de alta temperatura y ubicada directamente sobre la soldadura.
- Termómetro digital, conectado a la termocupla a fin de verificar la temperatura alcanzada.
- Caja soldada, utilizada para concentrar el fuego y los gases a fin de llegar a altas temperaturas en un lapso menor de tiempo.

#### **4.2 RESISTENCIA AL FUEGO**

##### **4.2.1 CÓDIGO IBC**

Definir el uso de los edificios es muy importante para determinar el "Equivalente de riesgo", o la prestación de un nivel razonable de protección o seguridad de la vida de los ocupantes del mismo, y además establece el tono para los capítulos del código. La determinación de riesgo equivalente implica tres consideraciones interdependientes: (1) el nivel de riesgo de incendio asociado a la ocupación específica de la instalación, (2) la reducción de riesgo de incendio mediante la limitación de la superficie del suelo (s) y la altura del edificio sobre la base de la carga de combustible (combustible contenidos y componentes incinerables) y (3) el nivel de resistencia al fuego general proporcionada por el tipo de material utilizado para la construcción.

La clasificación de ocupación también desempeña un papel clave en la organización y la prescripción de las medidas de protección adecuadas.

La interdependencia de estas consideraciones de seguridad contra incendios se puede ver, primero buscando en las Tablas 601 y 602 de la norma, que muestran los índices de resistencia al fuego de los elementos estructurales principales que comprende un edificio en relación con los cinco clasificaciones de los tipos de construcción. Tipo I de la construcción es la clasificación que generalmente requiere la más alta resistencia al fuego, mientras que el tipo de construcción V, que se designa como un tipo de combustible de la construcción, en general, requiere una menor cantidad de elementos estructurales resistentes al fuego.

La resistencia al fuego en columnas estructurales protegidas con materiales resistentes al fuego, puede ser determinada con la siguiente expresión:<sup>19</sup>

$$R = \left[ C1 \left( \frac{W}{D} \right) + C2 \right] h \quad 4.1$$

Donde:

R= Resistencia al fuego (minutos)

h= Espesor del material resistente al fuego (pulgadas)

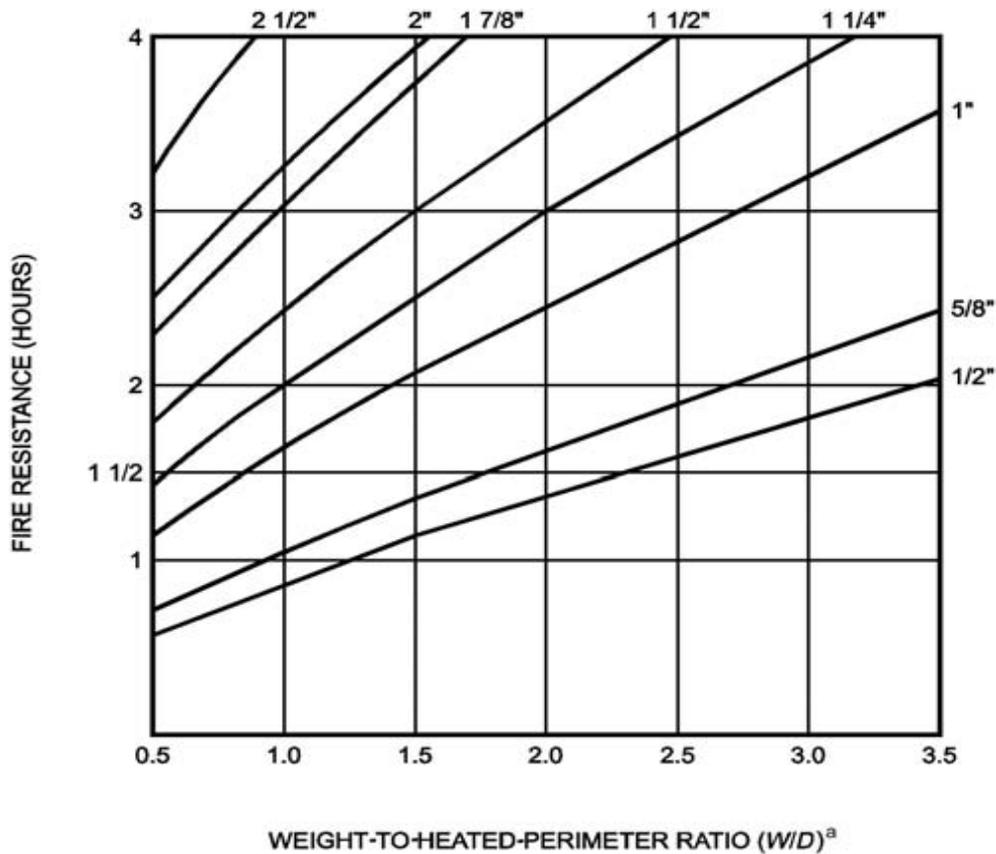
D= Perímetro calentado de la columna de acero estructural (pulgadas)

C1 y C2= Constantes que dependen del material

W= Peso de la columna de acero estructural (libras por pie lineal)

---

<sup>19</sup> Código IBC 2009, Capítulo 7, página 159



**Gráfica 4. 1 Resistencia al fuego de columnas de acero estructural protegido con varios espesores de tipo yeso**

Fuente (Código IBC 2009, página 159)

Los edificios y estructuras levantadas o por construirse, modificarse o ampliarse en la altura o el área se clasificarán en uno de los cinco tipos de construcción que se define en las secciones 602.2 de la norma IBC 2009. Los elementos de construcción tendrán una resistencia al fuego con calificación no inferior a la especificada en el cuadro 601 y el exterior de las paredes tendrán una clasificación de resistencia al fuego no inferior a la especificada en el cuadro 602. La protección de las aberturas, conductos y aberturas de aire en la transferencia de elementos de construcción no será necesario a menos que sea requerido por otras disposiciones de este código.

Los materiales y métodos de construcción usados para proteger uniones y penetraciones no reducirán el grado requerido de resistencia al fuego.

## 4.2.2 NORMA ASTM

Estos estándares norteamericanos son usados en gran escala en las pruebas de resistencia al fuego para evaluar el rendimiento de los materiales de construcción y elementos estructurales.

La curva de tiempo y temperatura utilizada en las pruebas de resistencia al fuego se llama incendio estándar.

Pruebas en tamaño real son preferibles ante pruebas en pequeña escala ya que permiten analizar el método de construcción utilizado, así como los efectos de la expansión térmica, la contracción, el daño local y la deformación bajo carga.

En EE.UU., las pruebas estándar de resistencia al fuego se llevan a cabo según las especificaciones de la ASTM en la sección E119.

La curva estándar de tiempo-temperatura de ASTM E119 e ISO 834 se compara en la Gráfica 4.3, donde se observa que son bastante similares. Todas las demás normas internacionales para pruebas de resistencia contra el fuego tienen curvas similares de tiempo-temperatura.

### 4.2.2.1 Capítulo E-Sección 119

En caso de un incendio completamente desarrollado, la acción del fuego es generalmente representada por una curva temperatura-tiempo, por ejemplo una ecuación que describe la evolución en el tiempo de la temperatura depende del entorno en el que la estructura se encuentra. La ecuación 4.2 representa una de las curvas nominales dadas en la norma europea ISO 834.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad 4.2$$

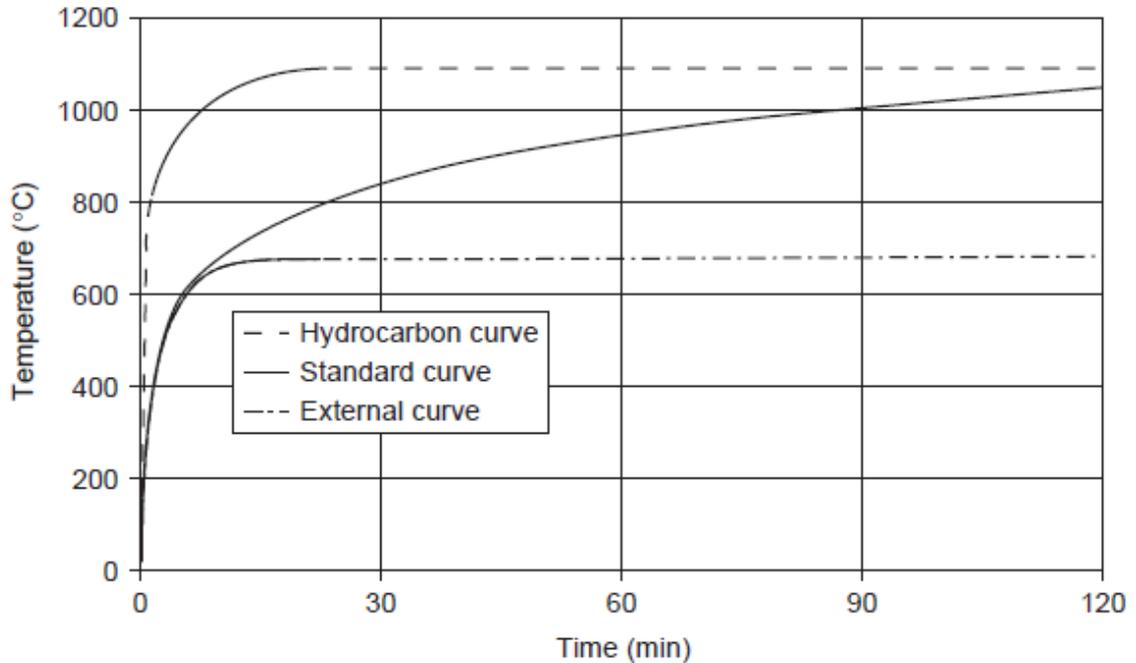
donde:

$\theta_g$  Es la temperatura del gas en el compartimiento o cerca del miembro de acero, en °C

$t$  es el tiempo, en minutos

Esta curva se utiliza como modelo para la representación de un incendio totalmente desarrollado en un compartimiento.

La ecuación varía dependiendo del entorno; es así que se puede ver en la gráfica 4.2 la evolución de la temperatura basada en tres entornos en donde la estructura puede localizarse.



**Gráfica 4. 2Tres curvas nominales diferentes en incendios, como se especifica en el código europeo**

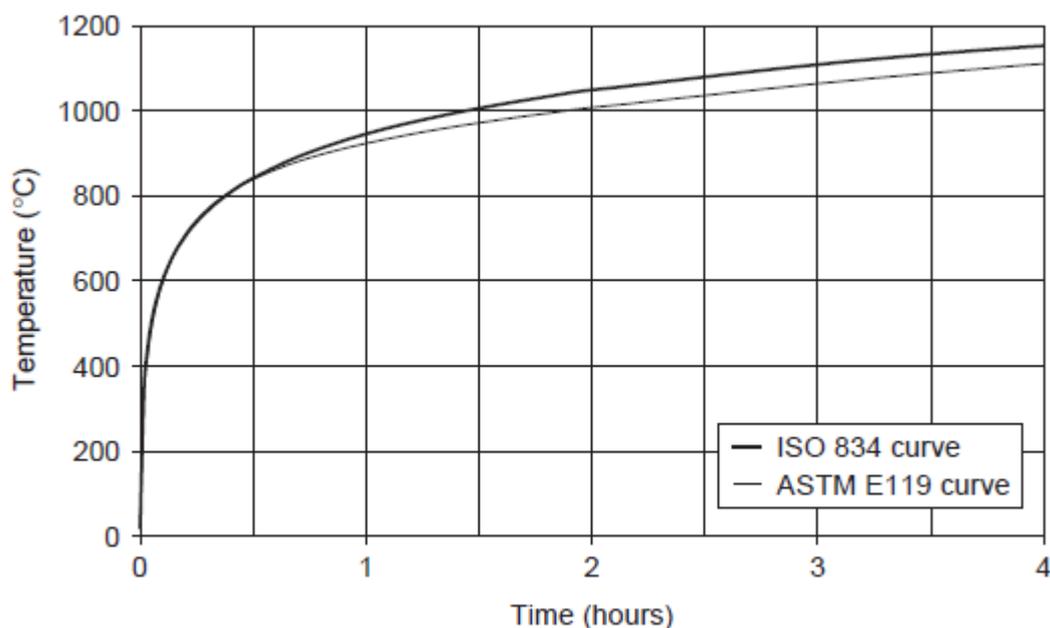
Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 22)

Varias ecuaciones de aproximación de la curva se utilizan en la norma ASTM E119 y fueron desarrolladas por Lie (1995), la más simple de ellas es la ecuación 4.3 donde la temperatura  $T$  (° C)

$$T = 750 \left[ 1 - e(-3.79553\sqrt{th}) \right] + 170.41\sqrt{th} + T_o \quad 4.3$$

donde  $th$  es el tiempo en horas

En la gráfica 4.3 se muestra la curva tiempo temperatura resultante según la norma E119; además se sobrepone la curva resultante de la ISO 834 a fin de realizar una comparación entre ellas.



**Gráfica 4. 3 Comparación de curvas en incendios entre ASTM E119 e ISO 834**

Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 32)

La curva de la norma ASTM E 119 se define por una serie de puntos discretos, que se muestran en la Tabla 4.1, junto con la correspondiente ISO 834 temperaturas.

**Tabla 4. 1 Valores en curvas tiempo-temperatura**

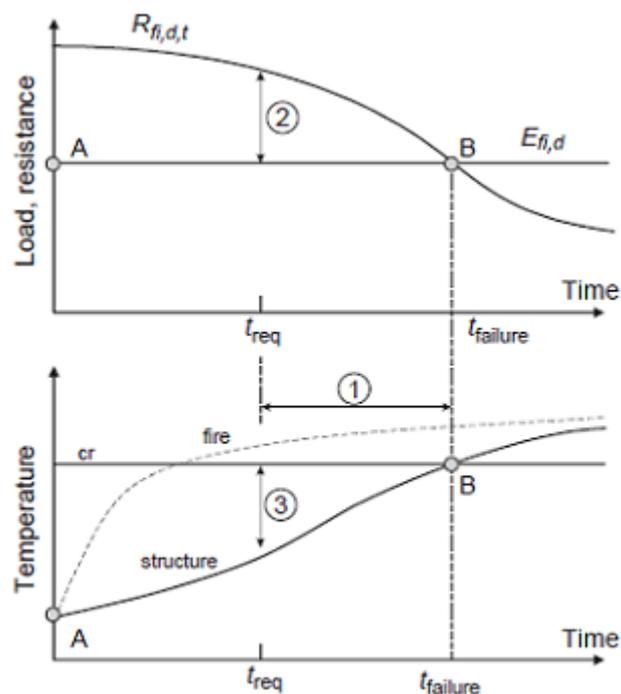
<i>Time (min)</i>	<i>ASTM E119 Temperature (°C)</i>	<i>ISO 834 Temperature (°C)</i>
0	20	20
5	538	576
10	704	678
30	843	842
60	927	945
120	1010	1049
240	1093	1153
480	1260	1257

Fuente: Normas ASTM E119 e ISO 834

Se puede determinar el menor tiempo posible de la T lim en la fase de calentamiento en horas, dependiendo de la tasa de crecimiento del fuego. T lim = 25 minutos, es decir, 05.12 horas, en tasa de crecimiento lenta; T lim =

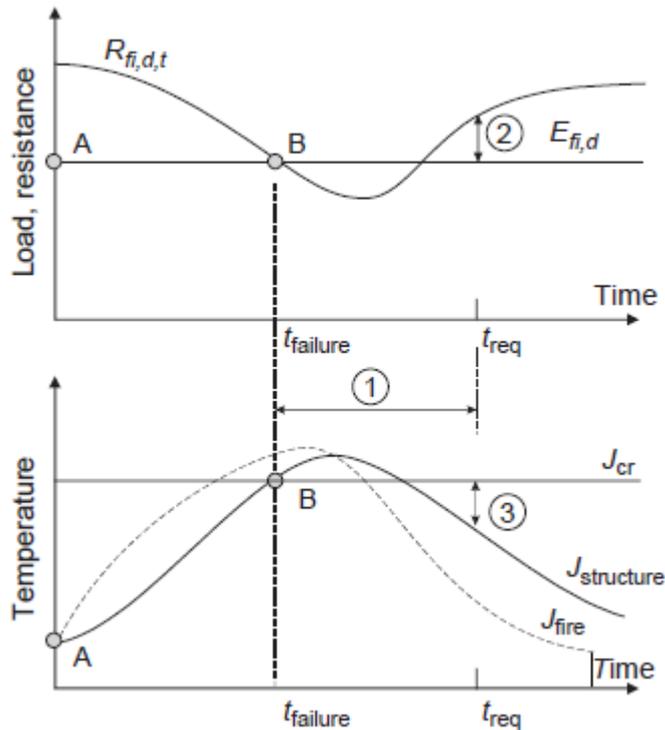
20 minutos, es decir, 1.3 horas, para la tasa de crecimiento media de fuego;  $T_{lim} = 15$  minutos, es decir,  $\frac{1}{4}$  de hora, de ritmo rápido de crecimiento del fuego.

La gráfica 4.4 se refiere al caso de un incendio nominal en el que la temperatura del fuego, está aumentando continuamente. Las temperaturas en la estructura, por lo tanto, también tienen un continuo aumento en función del tiempo y, aunque esto no se demostró en teoría, se supone que esto induce una continua disminución de la capacidad de carga.



**Gráfica 4. 4 Carga-tiempo o temperatura-tiempo en incendio nominal**

Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 64)



**Gráfica 4. 5 Carga-tiempo o temperatura-tiempo en incendio natural**

Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 64)

La situación es diferente en el caso de un incendio natural en el que la temperatura del fuego tiene una fase de creciente sistemática seguida por una fase de enfriamiento, gráfica 4.5.

Para las estructuras de acero, la capacidad de carga de la estructura que podría ser calculada en diferentes momentos en el tiempo produce un patrón como se muestra en la gráfica 4.5, con una primera fase donde la carga se reduce capacidad de carga en función del tiempo, y una segunda fase cuando la estructura se recupera su capacidad de carga, sobre todo porque de acero recupera su fuerza, ya sea total o parcialmente, al enfriarse a la temperatura ambiente.

Las conexiones entre los miembros de acero en construcciones modernas pueden estar ya sea soldadas o emperradas; la mayoría de códigos y normas requieren que éstas conexiones tengan algún nivel de protección contra el fuego; sin embargo, muchos de éstos códigos no especifican el grado de resistencia al fuego para conexiones; además, en el establecimiento de

resistencia al fuego a través de los enfoques normativos, las conexiones por lo general no se incluyen como parte del conjunto en las tradicionales pruebas de resistencia al fuego. Por otra parte, los esfuerzos de la mayoría de modelos asumen en los incendios, las características de una conexión se conservan durante la exposición al fuego.

Los códigos de EE.UU. en general, dan poca orientación sobre el diseño de las conexiones contra fuego. En una mirada más detallada, se dispone por lo general que las conexiones deban ser protegidas con el mismo nivel de resistencia al fuego como el de los miembros de conexión.

En Europa, es también comúnmente asumido desde los 70s que no es necesario tomar previsiones especiales para las conexiones, más allá de que éstas sean protegidas de la misma manera como los miembros adyacentes que se conectan; esto implica que si ninguno de los miembros conectados está protegido, entonces la unión tampoco necesita protección. Este concepto estuvo basado en la idea de que la concentración térmica en la unión debe ser más alta que la de los miembros adyacentes. Esto también se basó en la observación de numerosas construcciones de acero que no estaban protegidas contra el fuego y colapsaron, y donde las vigas de acero estaban seriamente deterioradas, pero rara vez separadas de las columnas.

La percepción se ha cambiado en la última década debido a de la aparición del diseño conceptual de los edificios de varios pisos donde las columnas están protegidos, mientras que las vigas y las juntas no. La demanda de las conexiones en estos sistemas es, por supuesto, mucho más alta. Este es especialmente el caso cuando el esfuerzo axial induce fuerzas axiales en las vigas y por lo tanto en las conexiones. Las primeras fuerzas de compresión se desarrollan en las vigas debido a la restricción a la expansión térmica y las fuerzas de tensión se desarrollan en una fase posterior, cuando importantes desviaciones verticales en las vigas transformar las vigas de elementos en flexión a elementos en tensión, más parecido a los cables. Más tensión, incluso se puede desarrollar en las vigas, y por lo tanto en las articulaciones, en la fase de enfriamiento de un fuego natural. También se ha observado que no sólo la resistencia a las fuerzas que varían, sino también la ductilidad de las

conexiones debe ser muy importante para dar cabida a las rotaciones grandes vinculadas a los grandes desplazamientos que se desarrollan cuando las vigas actúan en un modo de catenaria.

El código europeo establece que la resistencia al fuego en uniones atornilladas o soldadas se puede suponer suficiente si cumple con los siguientes requisitos:

. El conjunto tiene por lo menos la misma protección contra incendios que todos los miembros conectados. En particular, esto significa que no es necesario verificar las uniones de un acero sin protección en su estructura, si los demás requisitos, especialmente el relativo a la utilización de los conjuntos, se cumplen.

. La carga de la articulación es igual o menor que el valor más alto de carga de cualquiera de los miembros conectados.

La justificación general dada de esta recomendación es que debido al material adicional en las articulaciones y también a los efectos de sombra creada por los miembros conectados, las temperaturas son más bajas en las articulaciones que las contempladas en los miembros adyacentes. Otra explicación para las temperaturas más bajas en las juntas está vinculada a la geometría del compartimiento de fuego, que da lugar a temperaturas más bajas en las esquinas, en las articulaciones que se encuentran normalmente. Pero si esto es generalmente cierto para uniones viga-columna, no es el caso por ejemplo para una unión continua en el centro de la cuerda inferior de una viga del techo.

La verificación de la resistencia en las uniones se basa en la fuerza, determinada a temperatura ambiente, multiplicado por los factores de reducción de resistencia de los tornillos y soldaduras dados en la tabla 4.2.

#### Soldadura de filete

El cálculo de la resistencia por unidad de longitud de una soldadura en filete en un incendio debe ser determinado a partir de la ecuación 4.4.

$$F_{w,t,Rd} = F_{w,Rd} k_{w,\theta} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M,fi}} \quad 4.4$$

Donde:

$k_{w,\theta}$  es obtenido de la tabla 4.2 para la correspondiente temperatura de la soldadura.

$F_{w,Rd}$  es la resistencia de diseño de la soldadura de filete a temperatura normal

$\gamma_{M2}$  es el factor de seguridad parcial en temperatura normal

$\gamma_{M,fi}$  es el factor de seguridad parcial para condiciones de incendio.

Soldaduras a tope

Para temperaturas normales, la resistencia de diseño de una soldadura a tope con penetración completa debe ser tomada como igual a la resistencia de cálculo de las partes más débiles conectadas.

La resistencia de diseño al fuego<sup>20</sup> de una soldadura a tope con penetración total se calcula utilizando el diseño de resistencia a la temperatura normal, corregida por la reducción de los factores siguientes:

- Para temperaturas de hasta 700 ° C, los factores de reducción para el acero estructural en situación de fuego.
- Para temperaturas por encima de 700 C, la reducción de factores  $k_{w,\theta}$  dados en la Tabla 4.2

---

<sup>20</sup> Designing Steel Structures for Fire Safety Pag. 105

**Tabla 4. 2 Factores de reducción de la fuerza en pernos y soldaduras a diferentes temperaturas.**

$\theta_a$ [°C]	$k_{b,\theta}$	$k_{w,\theta}$
20	1,000	1,000
100	0,968	1,000
150	0,952	1,000
200	0,935	1,000
300	0,903	1,000
400	0,775	0,876
500	0,550	0,627
600	0,220	0,378
700	0,100	0,130
800	0,067	0,074
900	0,033	0,018
1000	0,000	0,000

Fuente (Publicaciones de Kirby (1995), Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 105)

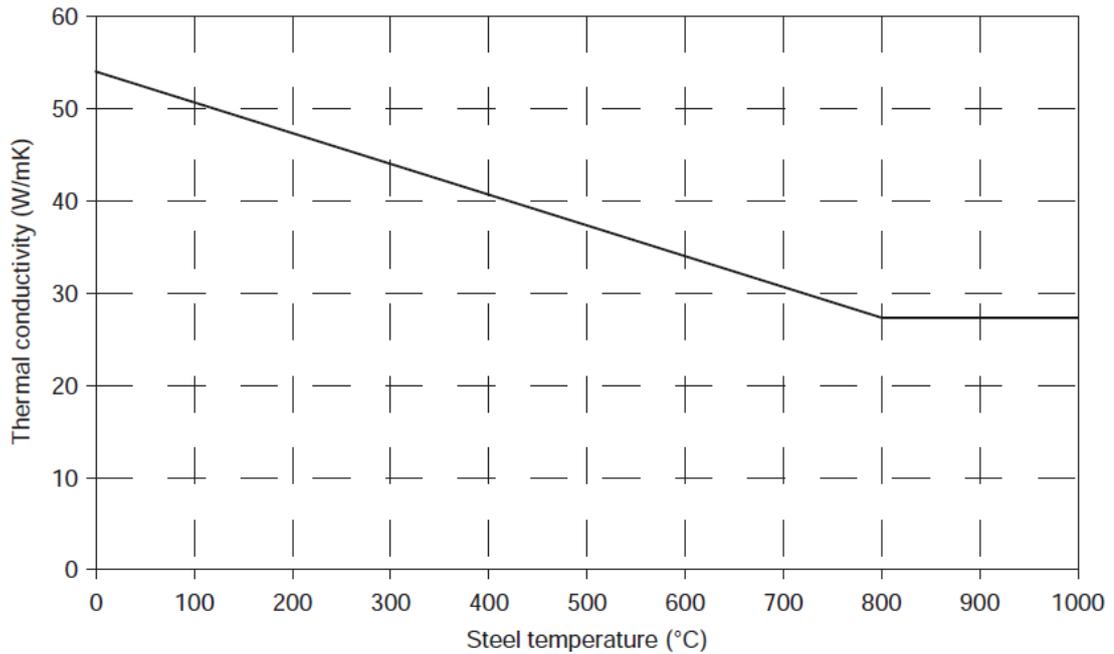
Propiedades térmicas del acero al carbono

Conductividad térmica

La conductividad térmica de los aceros al carbono decrece de la manera descrita en la ecuación 4.5.

$$\lambda_a = 54 - \theta_a/30 \geq 27.333 \quad \mathbf{4.5}$$

donde  $\theta_a$  es la temperatura del acero en °C



**Gráfica 4.6 Conductividad térmica del acero al carbono**

Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 140)

#### Calor específico

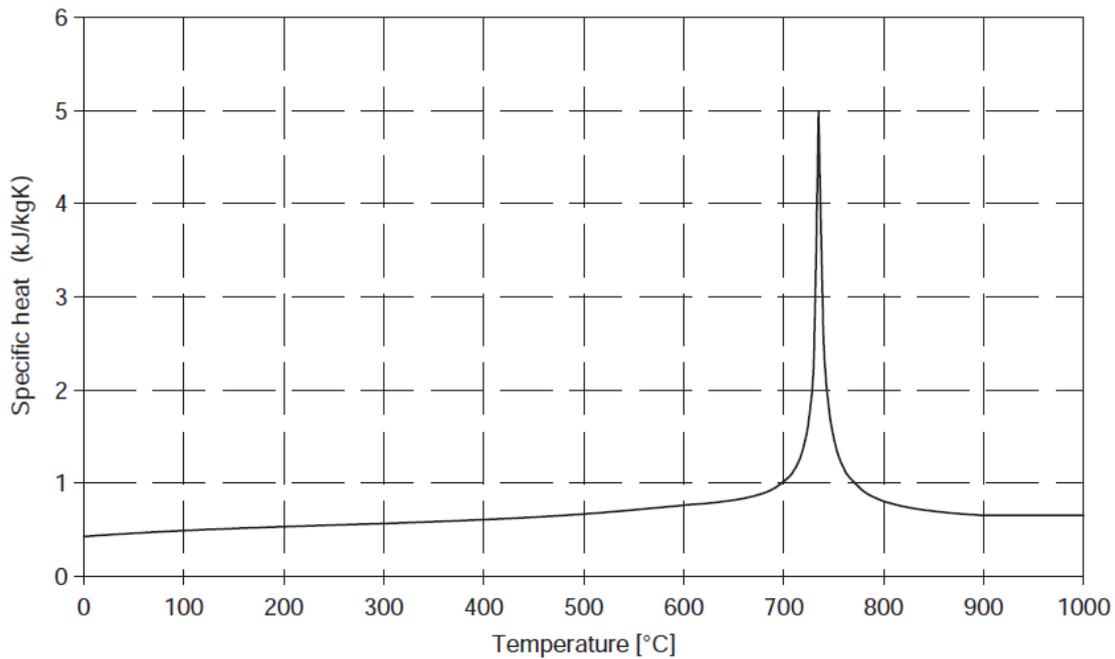
El calor específico del acero al carbono en J / kgK es variable con la temperatura de la manera descrita en las ecuaciones 4.6.1, 4.6.2, 4.6.3 y 4.6.4.

$$C_a = 425 + 0.773v_a - 1.69 \times 10^{-3} v_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} v_a^3 \quad \text{para } v_a < 600^\circ\text{C} \quad \mathbf{4.6.1}$$

$$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - v_a} \quad \text{para } 600^\circ\text{C} \leq v_a < 735^\circ\text{C} \quad \mathbf{4.6.2}$$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{v_a - 731} \quad \text{para } 735^\circ\text{C} \leq v_a < 900^\circ\text{C} \quad \mathbf{4.6.3}$$

$$C_a = 650 \quad \text{para } 900^\circ\text{C} \leq v_a \quad \mathbf{4.6.4}$$



**Gráfica 4. 7 Calor específico del acero al carbono**

Fuente (Designing Steel Structures for Fire Safety, Jean-Marc Franssen, pág. 140)

El pico de la curva en torno a 735 ° C se debe al cambio de fase cristalográfica del material. Este pico toma una forma de S en las curvas que muestran la evolución de la perfiles de acero con el tiempo, el aumento de la temperatura se está desacelerando en torno a 735 ° C, sólo para acelerar de nuevo por las altas temperaturas.

Las temperaturas en secciones de acero no protegidas varían con el tiempo según la ISO de acuerdo a la tabla 4.3

**Tabla 4. 3 Temperatura en secciones de acero no protegidas.**

$A_m^*/V [m^{-1}]$ $V/A_m^* [mm]$	400 2.5	200 5.0	100 10.0	60 16.7	40 25.0	25 40.0
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
5	430	291	177	121	90	65
10	640	552	392	276	204	142
11	661	587	432	308	228	159
12	678	616	469	340	253	177
13	693	642	503	371	278	194
14	705	663	535	402	303	212
15	716	682	565	432	328	230
16	725	698	591	460	353	249
17	732	711	616	487	377	267
18	736	721	638	513	401	286
19	743	729	658	538	425	304
20	754	734	676	561	447	323
21	767	738	692	583	470	341
22	780	744	706	604	491	360
23	790	754	717	623	512	378
24	799	767	726	641	532	396
25	807	780	732	658	551	414
26	813	792	735	674	570	431
27	820	803	740	688	588	449
28	826	813	746	701	604	466
29	831	821	756	712	621	482
30	837	828	767	721	636	498
31	842	835	780	728	651	514
32	847	841	793	733	665	530
33	852	846	805	736	678	545
34	856	851	816	740	690	559
35	861	856	827	745	701	573
36	865	861	836	753	711	587
37	870	866	844	763	719	601
38	874	870	852	774	726	614
39	878	874	859	786	731	626
40	882	878	865	798	734	638
45	900	897	890	852	761	692

Fuente: Normas ISO 834

Donde :

$A_m^*/V$  = Factor de masividad

$V/A_m^*$  = Perímetro de sección expuesta

Para secciones protegidas se produce una disminución en la temperatura como se muestra en la tabla 4.4 de la misma norma.

**Tabla 4. 4 Temperatura en secciones de acero protegidas**

$k_p$ [ $W/m^2K$ ]	200	400	600	800	1200	2000
Time [min.]	Steel temperature in °C					
0	20	20	20	20	20	20
10	37	54	70	85	113	163
20	60	97	130	160	215	304
30	84	139	188	232	306	421
40	108	181	244	298	388	514
50	132	222	296	359	459	589
60	156	260	345	414	520	650
70	179	298	391	465	573	699
80	202	333	433	510	620	730
90	225	367	472	552	661	743
100	247	399	509	589	695	773
110	268	430	542	623	721	816
120	289	459	573	654	734	859
130	310	486	602	681	744	900
140	330	512	629	705	765	935
150	349	537	654	723	795	965
160	368	560	677	733	828	990
170	386	582	697	739	861	1013
180	404	603	714	751	892	1032
190	422	623	727	769	921	1049
200	439	642	734	792	948	1065
210	455	660	738	817	972	1078
220	471	677	747	843	993	1090
230	487	692	760	869	1013	1101
240	502	706	777	893	1031	1112

Fuente: Normas ISO 834

Donde :

$K_p$ = Factor de protección del material

### 4.3 EXPOSICIÓN DE PROBETAS A ALTAS TEMPERATURAS.

El proceso elegido para alcanzar temperaturas elevadas en las distintas probetas es el siguiente:

1. Colocar las probetas dentro de una caja de acero soldada con placas de 1" de espesor, de tal forma que todas y cada una de ellas reciba el fuego directamente y que se cubra la mayor parte de su superficie.
2. Abrir el paso de gas y encender el soplete, tomando en cuenta la ubicación lejana de elementos combustibles de la llama y verificando fugas de gas, ya sea en el trayecto (manguera) o en las uniones respectivas, a fin de evitar accidentes debido al peligro que supone el trabajar con fuego y a tan elevadas temperaturas.
3. Apuntar la llama a las probetas, verificando que todas sean calentadas por igual.

4. Hacer contacto la punta de la termocupla con las probetas y verificar su temperatura mediante un termómetro digital.
5. Alcanzar la temperatura de 300°C y mantenerla durante 15 minutos, que es un tiempo aproximado en el cual el acero cambia sus propiedades en función de la temperatura.
6. Enfriamiento brusco utilizando agua potable hasta llegar a una temperatura ambiente.
7. Repetir el mismo procedimiento cambiando de probetas y alcanzando temperaturas de 600°C y 900°C.
8. Finalmente identificar las probetas con el tipo de acero y la temperatura alcanzada en cada una.

#### **4.3.1 COMPORTAMIENTO DEL ACERO A DISTINTAS TEMPERATURAS.**

Las propiedades físicas de los aceros y su comportamiento a distintas temperaturas dependen sobre todo de la cantidad de carbono y de su distribución en el hierro. Antes del tratamiento térmico, la mayor parte de los aceros son una mezcla de tres sustancias: ferrita, perlita y cementita. La ferrita, blanda y dúctil, es hierro con pequeñas cantidades de carbono y otros elementos en disolución. La cementita, un compuesto de hierro con el 7% de carbono aproximadamente, es de gran dureza y muy quebradiza. La perlita es una profunda mezcla de ferrita y cementita, con una composición específica y una estructura característica, y sus propiedades físicas son intermedias entre las de sus dos componentes.

La resistencia y dureza de un acero que no ha sido tratado térmicamente depende de las proporciones de estos tres ingredientes. Cuanto mayor es el contenido en carbono de un acero, menor es la cantidad de ferrita y mayor la de perlita: cuando el acero tiene un 0,8% de carbono, está por completo compuesto de perlita. El acero con cantidades de carbono aún mayores es una mezcla de perlita y cementita.

Al elevarse la temperatura del acero, la ferrita y la perlita se transforman en una forma alotrópica de aleación de hierro y carbono conocida como austenita,

que tiene la propiedad de disolver todo el carbono libre presente en el metal. Si el acero se enfría despacio, la austenita vuelve a convertirse en ferrita y perlita, pero si el enfriamiento es repentino la austenita se convierte en martensita, una modificación alotrópica de gran dureza similar a la ferrita pero con carbono en solución sólida.

A temperaturas menores de 910 °C y por encima de 1400 °C el hierro tiene una red espacial cubica centrada. En el primer caso se le llama hierro alfa y en el segundo hierro gamma, entre las temperaturas de 910-1400 °C el hierro tiene la red cúbica centrada en las caras y se le llama hierro delta.

Los hierros alfa y gamma disuelven muy poco carbono (entre 0,025 y 0.1%), y a esas soluciones se les denomina ferrita. La ferrita es muy blanda y plástica según el tamaño de sus granos; por debajo de 768 °C tiene propiedades ferromagnéticas muy acentuadas. La solubilidad del carbono en el hierro delta es mucho mayor, y puede alcanzar el 2% en peso a 1130 °C. Esta solución se llama austenita y existe comúnmente por encima de 723 °C (por métodos especiales puede obtenerse austenita a temperaturas menores). La austenita es blanda y plástica, no es magnética y peor conductor del calor que la ferrita.

El hierro forma con el carbono el carburo de hierro,  $Fe_3C$ , que se denomina cementita y contiene 6.67 % de carbono en peso. La cementita es frágil y muy dura; a temperaturas superiores a 210 °C no tiene propiedades magnéticas. La cementita pura no es estable, especialmente a altas temperaturas, y se desintegra en grafito y solución sólida: ferrita o austenita, según la temperatura.

Sin embargo, en las aleaciones de bajo contenido de carbono la cementita existente es estable hasta altas temperaturas y por eso se le puede considerar como un componente autónomo dentro de la masa del acero.

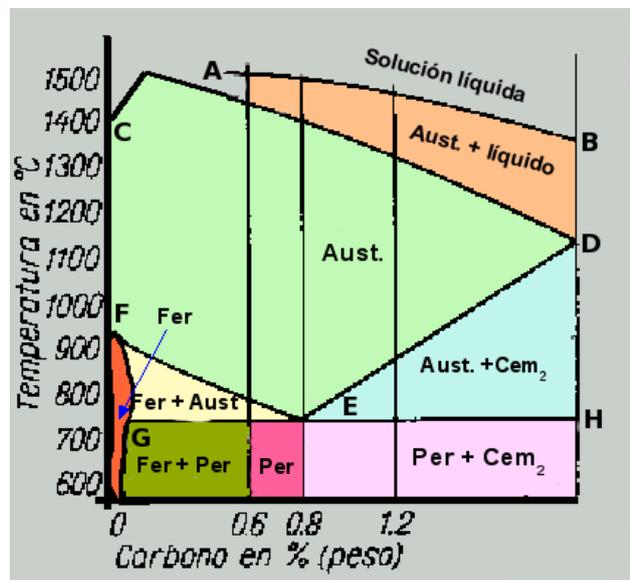
La cementita en el acero puede tener tres orígenes y se llaman:

1. Primaria: Segregada a partir de la reacción del hierro y el carbono en la solución líquida.
2. Secundaria: La que se precipita de la austenita al enfriarse.

3. Terciaria: La que se desprende de la ferrita al enfriarse por debajo de 910 °C.

La cementita puede mezclarse mecánicamente con la austenita desde la solución líquida, la mezcla eutéctica de cementita y austenita se denomina ledeburita. De la misma forma la cementita puede mezclarse desde la solución sólida con la ferrita procedente de la desintegración de la austenita a menos de 723 °C y concentración de carbono de 0.8 %. La mezcla eutectoide<sup>21</sup> de ferrita y cementita se llama perlita.

Si el acero se enfría rápidamente desde la zona de austenita el carbono no puede desprenderse, y como es imposible detener la transformación de hierro gamma a hierro alfa con capacidades de disolución de carbono muy diferentes, se produce una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro alfa que se conoce como martensita. La estructura de la martensita es inestable, con una gran dureza y fragilidad considerable.



**Gráfica 4. 8 Variación en los compuestos de acero según el porcentaje de carbono y la temperatura.**

Fuente (<http://www.sabelotodo.org/metalurgia/tratatermacero.html>)

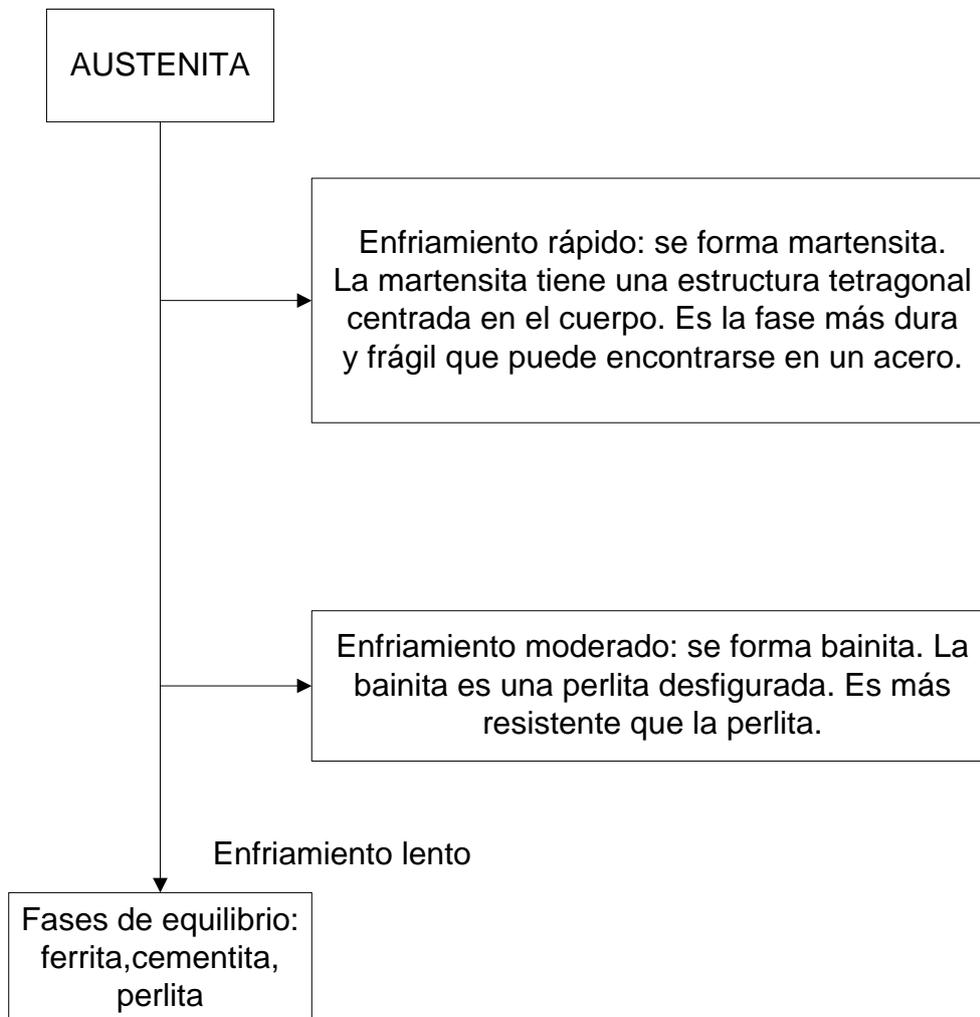
<sup>21</sup> Se le denomina eutectoide porque se produce en la solución sólida y no en la líquida como en el caso de una mezcla eutéctica.<sup>21</sup>

La dureza de la martensita es tanto mayor, cuando más cantidad de carbono esté disuelto en esta, y se explica por el fenómeno de que su red cristalina está muy deformada por los átomos de carbono. Esto hace que el cristal elemental de la red cristalina de la martensita no sea cúbico sino tetragonal, lo que a su vez dificulta su deformación plástica.

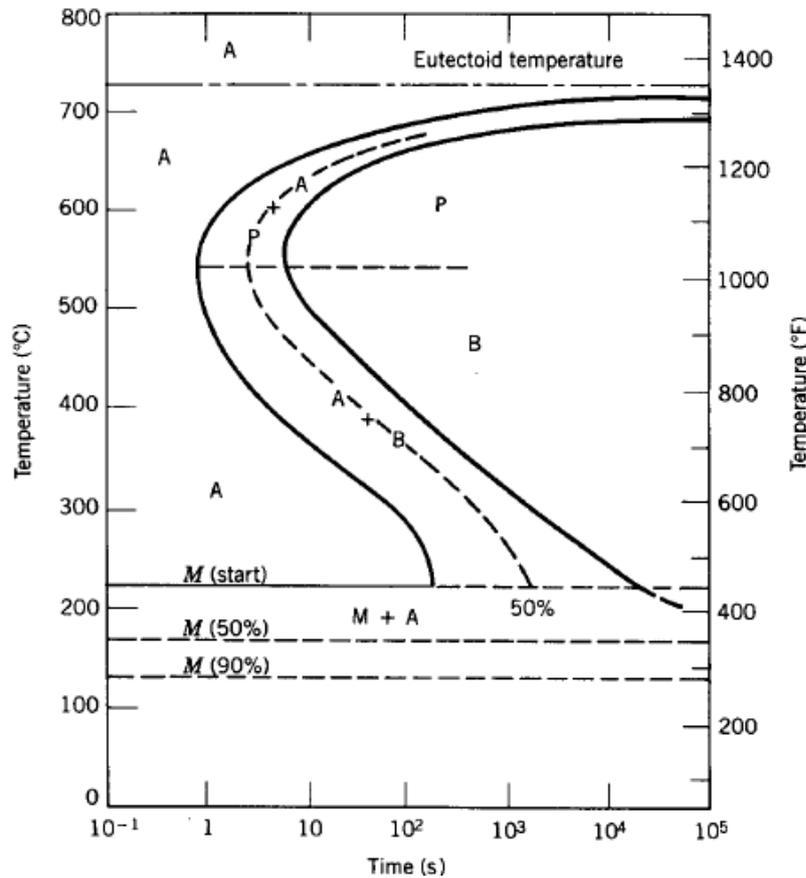
## 4.4 ENFRIAMIENTO

### 4.4.1 ROCIADO CON AGUA

Las fases en equilibrio solamente pueden darse cuando el material se enfría muy lentamente desde la fase de austenita. Cuando el enfriamiento de un acero no es lento (fuera de equilibrio) se forman fases en su microestructura que no están representadas en el diagrama hierro - carbono.



Los tratamientos térmicos pueden bosquejarse en un diagrama de Temperatura –Tiempo - Transformación. Uno de estos diagramas para un acero eutectoide se muestra a continuación:



**Gráfica 4. 9 Diagrama de transformación isotérmica completa para aleaciones de hierro-carbono de mezcla eutectoide: A, austenita; B, bainita; M, martensita; P, perlita**

Fuente (<http://practicalmaintenance.net/?p=1345>)

La forma como se enfría una pieza de acero durante un tratamiento térmico hace que la superficie del mismo se enfríe con mayor rapidez que el interior del material. Esta diferencia en las propiedades de la superficie se mide con el concepto de templabilidad.

La templabilidad es la facilidad con la cual se puede formar martensita en el acero. Los aceros de bajo carbono tienen baja templabilidad, es decir, forman martensita con mucha dificultad o simplemente no pueden formar martensita. Los aceros de alto carbono o los aceros aleados tienen alta templabilidad, lo que significa que forman martensita con mucha facilidad.

## CAPITULO 5

### ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

#### 5.1 END CON ULTRASONIDO

Los ensayos con ultrasonido fueron realizados con el equipo OLYMPUS EPOCH 1000i, que pertenece a la Escuela Politécnica del Ejército y que se encuentra ubicado en el laboratorio de Ciencia de los Materiales del DECEM.

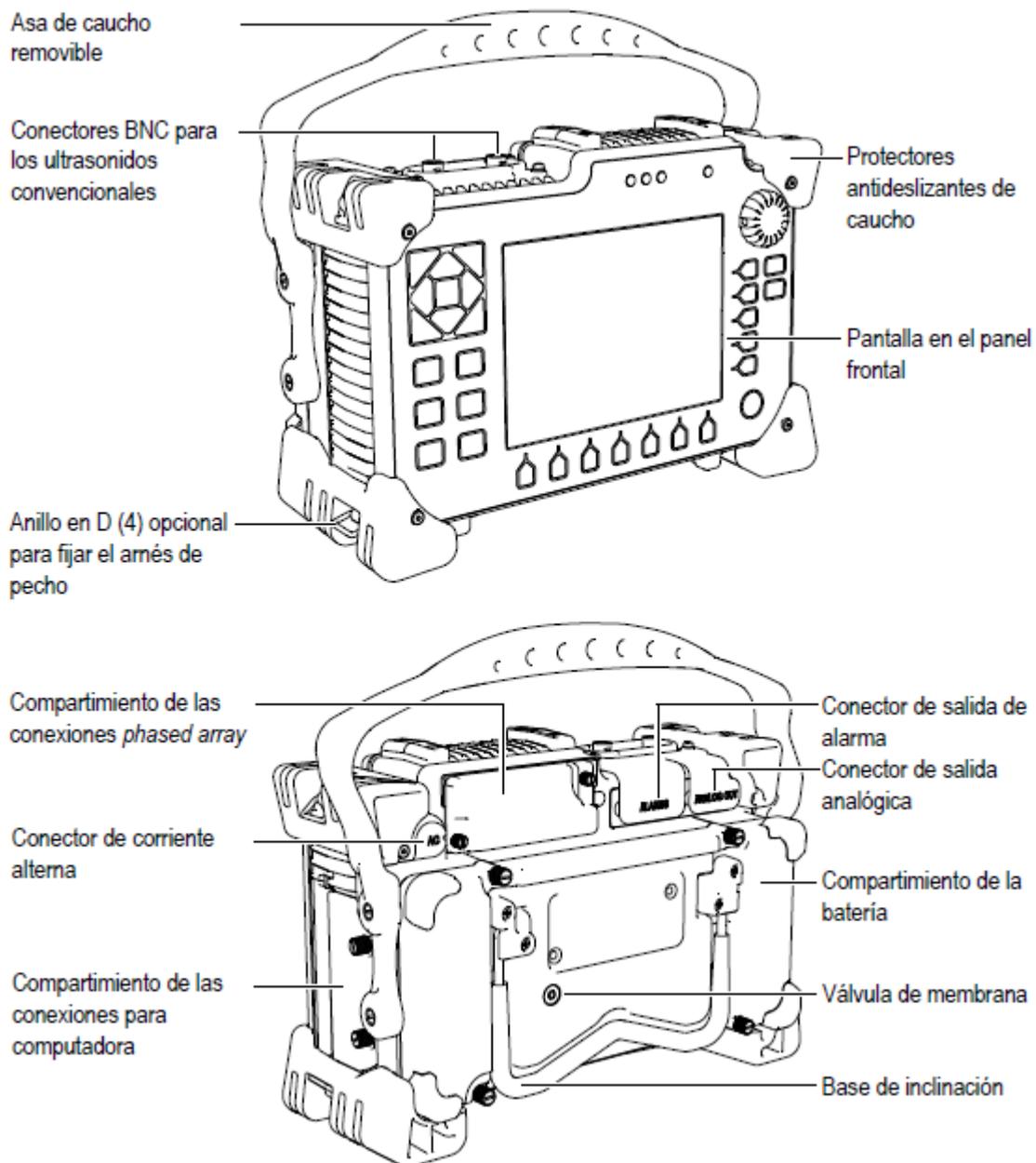
##### 5.1.1 DATOS DEL EQUIPO

Los datos de la tabla 5.1 corresponden al equipo OLYMPUS EPOCH 1000i.

**Tabla 5. 1 Datos del equipo de ultrasonido “EPOCH”**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Dimensiones globales (L x A x P)	292 mm x 196 mm x 123 mm
Peso	3,67 kg, con la batería de Li-ion
Teclado	Inglés, japonés, chino e internacional.
Idiomas	Español, inglés, francés, alemán, italiano, japonés, chino y ruso
Conectores de palpador	BNC o LEMO 01®
Tipo de batería	Li-ion recargable
Carga de la batería	8 horas (modo ultrasonidos convencionales) 7 horas (modo representación phased array)
Fuente de energía	Red CA de 100 V CA a 120 V CA, 200 V CA a 240 V CA, 50 Hz a 60 Hz.
Tipo de pantalla	Transflectiva de cristal líquido VGA (640 x 480 píxeles), color y velocidad de actualización de 60 Hz
Dimensiones de la pantalla (L x A; diagonal)	132,5 mm 99,4 mm; 165,1 mm
Tipo de garantía	Limitada de 1 año

Fuente: Manual del equipo



**Figura 5. 1 Esquema del equipo**

Fuente (Manual del equipo, capítulo 1, pág. 20)

### Limitaciones

- Está limitado por la geometría, estructura interna, espesor y acabado superficial de los materiales sujetos a inspección.
- Localiza mejor aquellas discontinuidades que son perpendiculares al haz de sonido.

- Las partes pequeñas o delgadas son difíciles de inspeccionar por este método.
- El equipo puede tener un costo elevado, que depende del nivel de sensibilidad y de sofisticación requerido.
- El personal debe estar calificado y generalmente requiere de mucho mayor entrenamiento y experiencia para este método que para cualquier otro de los métodos de inspección.
- Se pueden evaluar materiales de grano fino, como el acero, con frecuencias comprendidas entre 2 y 5MHz; pudiendo ser detectadas discontinuidades desde 0,9 mm.
- En materiales con grano grueso conviene usar frecuencias bajas, del orden de 0,5 a 2MHz, pudiéndose incluso evaluar materiales con un coeficiente de atenuación alto, tal y como pueden ser fundiciones, plásticos, etc.<sup>22</sup>

## 5.1.2 PROCEDIMIENTO

### 5.1.2.1 Calibración del equipo OLYMPUS EPOCH 1000i

#### *Modo ultrasonidos convencionales*

El procedimiento de calibración del EPOCH 1000i se realiza según cuatro configuraciones de palpador de base: palpador recto, palpador de línea de retardo, palpador dual y palpador angular.

Los equipos de la serie EPOCH™ 1000i pueden ser calibrados de diferentes maneras para obtener ajustes precisos según el palpador, el bloque de calibración y la aplicación. Estos tipos de calibración pueden ser ajustados en el submenú **1/5 >Auto CAL**. Existen dos tipos de calibración cuando se utilizan palpadores rectos y dos, cuando se utilizan palpadores angulares.

Existen dos tipos de calibración del equipo para inspecciones con palpadores rectos. El término *palpador recto* significa todos los palpadores de cero grados, incluso los de contacto, duales, de línea de retardo, de inmersión, etc. Los dos tipos de calibración con palpadores rectos son:

---

<sup>22</sup> Curso de ultrasonido básico, Facultad de Ingeniería en la Universidad Central de Venezuela

### Espesor

Para este tipo de calibración estándar, es necesario introducir dos diferentes espesores conocidos. El espesor delgado sirve para efectuar la calibración del desplazamiento del cero, mientras que el espesor grueso, para la calibración de la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material.

### Mediciones eco a eco

Este tipo de calibración permite utilizar cualquier medida eco a eco para calibrar solamente la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material. El desplazamiento del cero no es necesario en este tipo de calibración, ya que la indicación en la primera puerta sirve de punto de inicio de la medición, y que la segunda puerta —o puerta de rastreo— sigue dicha señal para tomar la medida. Así, solamente es necesario calibrar la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material de la pieza bajo ensayo para obtener medidas eco a eco precisas. La medición eco a eco puede efectuarse con entre la puerta 2 y puerta 1 (**G2 - G1**), entre la puerta 2 y puerta de interfaz (**G2 - IF**) o entre la puerta 1 y puerta de interfaz (**G1 - IF**).

Existen dos tipos de calibración del equipo para inspecciones con palpadores angulares:

### Trayectoria acústica

Para este tipo de calibración estándar, es necesario introducir la medida de la trayectoria acústica de dos diferentes espesores conocidos. Generalmente, estas medidas se toman en el radio del bloque de calibración. El espesor delgado sirve para efectuar la calibración del desplazamiento del cero mientras que el espesor grueso, para la calibración de la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material.

### Profundidad

Para este tipo de calibración, es necesario introducir la profundidad conocida de dos reflectores diferentes. Generalmente, estas medidas se toman en barrenos laterales de igual tamaño. Para tomar medidas precisas, verifique primero el ángulo de refracción del palpador, ya que el cálculo de la profundidad se basa en la trayectoria acústica y en el ángulo de refracción

conocido. El reflector menos profundo sirve para calibrar el desplazamiento del cero y el reflector más profundo, para calibrar la velocidad de propagación de la onda ultrasonora.

### *Modo representación Phased Array*

La calibración *phased array* es el proceso de ajuste del equipo para que realice mediciones precisas en un material dado, con un palpador específico y a una temperatura determinada, a través de todas las leyes focales activas.

Durante la calibración, se debe ajustar los parámetros de la velocidad de propagación de las ondas ultrasonoras en el material, del retardo de la zapata y de la sensibilidad (ganancia). Los equipos de la serie EPOCH 1000 están dotados de la herramienta *software* avanzada de autocalibración que permite una calibración fácil y rápida. La mayoría de los parámetros de configuración inicial del equipo en modo representación *phased array* se encuentran en la página de configuración del haz **Beam (1/5> PA Probe > Beam**. La definición automática o manual del palpador permite ajustar fácilmente y en tiempo real el tipo de inspección y los parámetros necesarios del palpador y de la zapata *phased array* seleccionados.

En el modo representación *phased array*, los equipos de la serie EPOCH™ 1000 necesitan hasta tres tipos de calibración para obtener medidas precisas de la distancia y de la amplitud en todas las leyes focales del área de escaneo.

#### 1.-Velocidad de propagación de la onda ultrasonora

La calibración de tipo velocidad **Velocity** permite calibrar correctamente la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material. Este tipo de calibración se puede efectuar con un solo reflector de la trayectoria acústica conocida (generalmente, la curva o la pared de fondo del bloque de calibración).

#### 2.- Retardo de la zapata

La calibración de tipo retardo de la zapata **Wedge Delay** permite calibrar correctamente el retardo entre el disparo electrónico del palpador y el momento en el que el haz acústico entra en la pieza bajo ensayo. En el modo ultrasonidos convencionales, este parámetro tiene el nombre de desplazamiento del cero.

En el modo representación *phased array*, el ajuste de este parámetro es más complejo que en el modo ultrasonidos convencionales. En la mayoría de aplicaciones *phased array*, es necesario definir un retardo de la zapata para cada ley focal. De hecho, cada una de las leyes focales tiene generalmente un ángulo de inspección específico y un punto de incidencia en la zapata diferente y, en consecuencia, una trayectoria acústica en la zapata distinta antes de alcanzar la superficie de la pieza bajo ensayo.

En el modo representación *phased array*, el equipo calcula el valor del retardo de la zapata de cada ley focal. Cuando la ley focal seleccionada cambia, el equipo aplica dinámicamente el retardo de la zapata correspondiente a las lecturas de la medición.

Los equipos de la serie EPOCH 1000 permiten calcular el retardo de la zapata de todas las leyes focales en una sola etapa durante la calibración. Así, es posible obtener, con una única calibración, lecturas precisas de la medición de la trayectoria acústica, de la profundidad y de la distancia proyectada en todos los ángulos de inspección.

### 3.- Sensibilidad (ganancia)

La calibración de tipo sensibilidad (ganancia) **Sensitivity** sirve para calibrar correctamente las variaciones de la sensibilidad del equipo a un reflector detectado por todas las leyes focales. Ésta representa la cuarta etapa de calibración con un palpador angular de ultrasonidos convencionales, y permite definir la sensibilidad del sistema en función a un reflector conocido, y la ganancia de referencia. La calibración de la sensibilidad (ganancia) sirve principalmente a definir una ganancia de referencia para cada ley focal en el área de escaneo.

La sensibilidad del sistema a un reflector dado varía en función a la trayectoria acústica y al retardo de la zapata. Contrariamente a los haces de ángulo pequeño, la trayectoria acústica que los haces de ángulo grande deben recorrer en el material para alcanzar un reflector dado es más larga. Mientras más larga es la trayectoria acústica, mayor es la dispersión y atenuación del haz y, como resultado, la señal del reflector que aparece en la pantalla es de baja amplitud.

Los equipos de la serie EPOCH 1000 permiten calcular, en una sola etapa de calibración, la amplitud de un reflector específico en todas las leyes focales de

un área de escaneo y, después, ajustar las leyes focales por separado para normalizar la respuesta de amplitud de dicho reflector.

### 3.1.- Calibración de la sensibilidad (ganancia) con un solo reflector

Los equipos de la serie EPOCH™ 1000 permiten calibrar la sensibilidad (ganancia) con un solo reflector. Esta calibración permite normalizar la respuesta de amplitud de los defectos ubicados, exacta o aproximadamente, en la trayectoria acústica/profundidad del reflector calibrado.

### 3.2.- Calibración de la sensibilidad (ganancia) con diversos reflectores

Los equipos de la serie EPOCH™ 1000 permiten calibrar la sensibilidad (ganancia) en diversos puntos (profundidades) de una pieza bajo ensayo. Esta calibración permite normalizar la respuesta de un reflector dado en cualquier lugar de la trayectoria acústica/profundidad del área de inspección, y no en una sola ley focal. Asimismo, esta calibración genera una configuración TVG para todas las leyes focales dentro del área calibrada; lo que facilita la inspección y crea una imagen nítida de los defectos potenciales en cualquier parte del área de inspección.

## **5.1.2.2 PROCEDIMIENTO PARA LA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDO EN JUNTAS SOLDADAS A TOPE CON PROCESO FCAW**

### **INTRODUCCIÓN**

Todas las normas aplicables a la inspección por ensayos no destructivos, especialmente las que se refieren a la técnica de ultrasonido industrial, exigen como un requisito inicial que se realice la inspección a partir de las instrucciones detalladas en un Procedimiento.

### **OBJETIVO**

- Establecer los parámetros necesarios y elaborar el procedimiento para la inspección por ultrasonido de uniones soldadas.
- Fijar las condiciones necesarias para realizar la inspección por ultrasonido industrial.

### **ALCANCE**

Este procedimiento describe los métodos y técnicas de calibración del equipo para la inspección por ultrasonido empleando exploración manual.

Este método es para la detección de discontinuidades en el interior de las piezas, tales como grietas, laminaciones, faltas de fusión, faltas de penetración, poros, inclusiones no metálicas, etc.

### **RESPONSABILIDADES**

Es responsabilidad del personal en entrenamiento realizar sus prácticas de acuerdo a lo estipulado en este procedimiento.

Es responsabilidad del instructor revisar y evaluar los reportes de resultados de las prácticas correspondientes.

### **NORMAS Y DOCUMENTOS DE REFERENCIA**

- ANSI/AWS D1.1
- Manual de usuario de equipo de ultrasonido serie EPOCH 1000i
- ANSI/AWS D1.5
- Centro Técnico Indura – Ensayos no Destructivos RT / UT
- DP-ISO-9712, editada por ISO,ASNT

- Practica recomendada por la A.S.N.T., SNT-TC-1A

## **PERSONAL END**

### Nivel I

Es el individuo calificado para efectuar calibraciones específicas, para efectuar P.N.D. específicas, para realizar evaluaciones específicas para la aceptación o rechazo de materiales de acuerdo a instrucciones escritas, y para realizar el registro de resultados. Debe recibir la instrucción o supervisión necesaria de un nivel III o su designado.

### Nivel II

Es el individuo calificado para ajustar y calibrar el equipo y para interpretar y evaluar los resultados de prueba con respecto a códigos, normas y especificaciones. Está familiarizado con los alcances y limitaciones del método y puede tener la responsabilidad asignada del entrenamiento en el lugar de trabajo de los niveles I y aprendices. Es capaz de preparar instrucciones escritas y organizar y reportar los resultados de prueba.

### Nivel III

Es el individuo calificado para ser el responsable de establecer técnicas y procedimientos; interpretar códigos, normas y especificaciones para establecer el método de prueba y técnica a utilizarse para satisfacer los requisitos; debe tener respaldo práctico en tecnología de materiales y procesos de manufactura y estar familiarizado con métodos de P.N.D. comúnmente empleados; es responsable del entrenamiento y exámenes de niveles I y II para su calificación.

## **MATERIAL REQUERIDO PARA REALIZAR EL ENSAYO**

### **EQUIPO PRINCIPAL DE END**

EPOCH 1000*i* es un equipo portátil para ensayos no destructivos (END) por ultrasonidos que sirven para detectar defectos en soldaduras, tubos y muchos otros materiales estructurales e industriales. Una gran variedad de palpadores convencionales o *phased array* son compatibles con este equipo para su uso

al interior o al exterior. Estos equipos ofrecen prestaciones ultrasónicas excelentes y la creación de imágenes *phased array* de base. Además, están dotados de una interfaz gráfica intuitiva, un gran rango dinámico, una gran resolución de medida y una pantalla transreflectiva de cristal líquido VGA (640 x 480 píxeles) color para una mejor visibilidad.

El EPOCH 1000i ofrece alto rendimiento y durabilidad, así como ventajas operacionales, entre las cuales cabe mencionar:

- Carcasa sellada conforme a la norma medioambiental IP66.
- Pantalla transreflectiva de cristal líquido VGA color.
- Conformidad a la norma europea EN12668-1.
- Receptor totalmente digital con un rango dinámico de alto alcance.
- Más de 30 filtros digitales para el receptor.
- Frecuencia máxima de repetición de impulsos de 6000 Hz para escaneos de alta velocidad.
- Representaciones *phased array*.
- Curvas DAC/TVG dinámicas creadas por el programa informático.
- Curvas DGS/AVG creadas por el programa informático.
- Cursores de referencia y de medición.
- Cuatro salidas analógicas programables.
- Seis salidas de alarma programables.
- Conectividad con puertos USB y RS-232.
- Perilla de ajuste y teclas de dirección.
- Tarjeta estándar CompactFlash® de 2 GB.
- Salida VGA.

### **OPERACIONES PREVIAS A LA CALIBRACIÓN.**

- Antes de iniciar una práctica o inspección, es recomendable revisar el texto, en el capítulo referente al equipo de ultrasonido y repasar la función de cada uno de los controles de operación.
- Observar el tipo de conectores del equipo de ultrasonido y del palpador para la selección adecuada del cable coaxial a ser empleado. Por regla general, la mayoría de los equipos norteamericanos cuentan con conectores del tipo BNC y los transductores de doble cristal emplean conectores microdot.

- Verificar que todos los conectores del equipo estén en la posición de cero, en el valor mínimo, en la posición de apagado o totalmente girados a la izquierda, antes de operar el instrumento.
- Conectar el palpador al cable coaxial; en algunos casos el palpador ya viene con el cable coaxial integrado.
- Conectar el cable coaxial al equipo. La conexión en la terminal T (transmisión) debe ser para el cristal emisor (esto se distingue en algunas marcas comerciales porque la identificación del cristal está en esta conexión). La terminal R (receptor) debe ir conectada al cristal receptor.
- Seleccionar la función adecuada para el tipo de palpador a emplear, la mayoría de los equipos poseen un selector para ajustar el instrumento para trabajar con doble cristal, o con cristal sencillo; los ajustes deben ser los que se marcan en la siguiente tabla.

TIPO DE OPERACIÓN	POSICIÓN DEL SELECTOR
Cristal sencillo en modo de pulso-eco.	Normal, sencillo T/R
Cristal sencillo en modo de transparencia o envío-recibo.	Dual, trans/rec.
Haz angular.	Normal, sencillo T/R
Doble cristal.	Dual, trans/rec.

- Localizar el control de encendido y energizar el sistema. En algunos instrumentos éste se encuentra integrado al selector de frecuencia o al selector del transductor, y en otros es independiente. La mayoría de los equipos opera con baterías recargables. Siempre que sea posible, el instrumento debe operarse conectándolo a una línea de 110/120 volts de corriente alterna.
- Una vez que el instrumento haya encendido y se observe el trazo de la línea de tiempo base, ésta debe ajustarse con el control de enfoque, para que sea clara y bien definida.
- Posicionar el control de frecuencia de acuerdo a la marcada en el cuerpo del palpador o en uno de los extremos del cable coaxial. La forma más efectiva para ajustar el control de frecuencia es fijar éste en el paso donde se obtenga

la máxima amplitud proveniente de un reflector. En caso de que el equipo carezca de este control, la frecuencia se ajustará automáticamente.

- Para todas las calibraciones y durante la inspección empleando los palpadores de haz recto y haz angular, la función de rechazo debe estar apagada, ya que puede alterar la linealidad del instrumento e invalidar los resultados de las pruebas.

- La calibración de distancia y sensibilidad se efectuará justo antes de iniciar la inspección y en el mismo lugar donde esto ocurra.

- Para configurar el EPOCH 1000 en modo ultrasonidos convencionales antes de la calibración:

1. Pulse la tecla **[GAIN]** para seleccionar el valor inicial de la ganancia apropiada para la calibración.

Si se desconoce el valor inicial de la ganancia apropiada, defínalo a 20 dB y, de ser necesario, ajústelo durante la calibración.

2. Seleccione **1/5 > Basic > Velocity** e introduzca la velocidad de propagación aproximada en el material de la pieza bajo ensayo.

3. Seleccione **1/5 > Basic > Zero** y ajuste el desplazamiento del cero a 0,000  $\mu$ s.

4. Seleccione **1/5 > Basic > Range** y ajuste la base de tiempos según el rango de la trayectoria acústica en el bloque de calibración seleccionado.

5. Seleccione **1/5 > Basic > Delay** y ajuste el retardo a 0,00 mm ó 0,000 pulg.

6. Seleccione **1/5 > TRIG > Angle** e introduzca el ángulo de refracción correcto para el palpador (0 para un palpador recto o de 90°, 45 para un palpador de 45°, etc).

7. Seleccione **1/5 > TRIG > Thick** e introduzca el espesor de la pieza a 0,00 mm ó 0,00 pulg.

8. Seleccione **1/5 > Receiver > Reject** y ajuste el umbral de la supresión a 0%.

9. Seleccione **2/5 > Gate 1 > Status = On** para activar la puerta 1.

10. Coloque el palpador en el bloque y ajuste el emisor y el filtro para crear un A-scan nítido.

- Durante la calibración del EPOCH 1000i, es necesario ajustar el parámetro del desplazamiento del cero y de la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material. El parámetro del desplazamiento del cero (a veces

denominado retardo del palpador) compensa el tiempo entre el impulso inicial y la entrada de la onda ultrasonora en la pieza bajo ensayo. Es necesario definir correctamente el parámetro de la velocidad para que corresponda a la velocidad de propagación de la onda ultrasonora en el material de la pieza bajo ensayo.

## **PROCESO DE INSPECCIÓN**

Es necesario seguir un orden adecuado a fin realizar una buena inspección y preservar el correcto funcionamiento del equipo; dicho orden se recomienda sea el siguiente:

1. Limpieza y de ser necesario pulido de la pieza a ser inspeccionada.
2. Calibración del equipo empleando el haz correspondiente.
3. Trazo del área en la pieza, por la cual se desplazará el palpador.
4. Untar el acoplante tanto en la pieza como en el palpador.
5. Realizar la inspección dentro del área antes definida, preferentemente barriendo repetidamente con el palpador y con la suficiente cantidad de acoplante; y marcar los puntos donde se detectaron las fallas basados en la normativa correspondiente.
6. Guardar los resultados obtenidos, de ser posible en una memoria externa al equipo.
7. Documentar los resultados obtenidos con las respectivas aclaraciones.
8. Finalmente apagado del equipo y limpieza de los palpadores.

### **Calibración con palpadores de haz angular.**

1. Siga el procedimiento de configuración inicial.
2. Conecte el palpador al cable apropiado y éste a uno de los conectores de palpadores de ultrasonidos convencionales, ubicados en la parte superior del equipo.
3. Seleccione **1/5 > TRIG > Angle** e introduzca el ángulo de refracción apropiado para el palpador de zapata integrada.
4. Seleccione **1/5 > Basic > Velocity** e introduzca la velocidad aproximada de la onda transversal en la pieza bajo ensayo (0,1280 pulg./ $\mu$ s en acero. Si utiliza el sistema métrico internacional, 3251 m/ $\mu$ s).

5. Seleccione **1/5 > Basic > Range** e introduzca la distancia de inspección del bloque de calibración.

### **Calibración en distancia.**

El ajuste o calibración en distancia del recorrido del haz ultrasónico (escala horizontal de la pantalla EHP) sirve para conocer la distancia recorrida por el sonido hasta el punto donde se encuentra una discontinuidad. Para ajustar la EHP a un valor preestablecido, se emplean los bloques de calibración que tienen un espesor o un recorrido del sonido conocido y el proceso es el siguiente:

1. Seleccione **1/5 > Basic > Range** e introduzca 12,00 pulgadas (si utiliza el sistema métrico internacional, 300 mm). Esto asegura que los ecos sean visibles en la pantalla.

2. Seleccione **1/5 > Auto CAL > CAL Mode = Soundpath** para calibrar la trayectoria acústica.

3. Coloque el palpador en el bloque de calibración de manera que el punto de incidencia se encuentre directamente por encima de la marca «0» del bloque ASTM. No mueva el palpador durante el resto de las etapas de la calibración de la distancia.

4. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 de manera que el primero eco proveniente del reflector del arco sobrepase el umbral de la puerta.

Este reflector debe estar a aproximadamente 4 pulgadas (si se utiliza el sistema métrico internacional, 100 mm).

5. Pulse la tecla **[GAIN]** y ajuste la ganancia para que la amplitud del eco alcance el 80% de la altura de la pantalla completa.

La medida del espesor aparece en número grandes en uno de los campos de lectura.

6. Cuando la lectura se estabilice, seleccione **2/5 > Auto CAL > CAL Zero** para calibrar el desplazamiento del cero.

La imagen se congela y el cuadro de diálogo **Enter Value for Zero Cal** aparece en la pantalla.

7. Introduzca el valor del espesor conocido y seleccione **Continue** para pasar a la segunda etapa de calibración.

8. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 de manera que el segundo eco proveniente del reflector del arco sobrepase el umbral de la puerta. Este reflector debe estar a aproximadamente 9 pulgadas (si se utiliza el sistema métrico internacional, 225 mm).

9. Pulse la tecla **[GAIN]** y ajuste la ganancia para que la amplitud del eco alcance aproximadamente el 80% de la altura de la pantalla completa.

La medida del espesor aparece en número grandes en uno de los campos de lectura.

10. Cuando la lectura se estabilice, seleccione **1/5 > Auto CAL > Cal Velocity** para calibrar la velocidad.

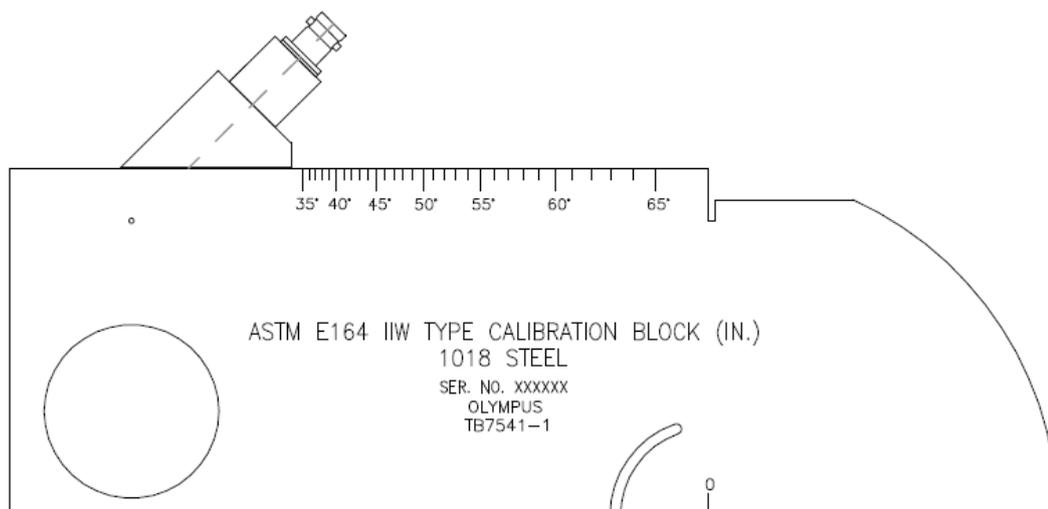
La imagen se congela y el cuadro de diálogo **Enter Value for Velocidad Cal** aparece en la pantalla.

11. Introduzca el valor del espesor conocido (9,000 pulgadas en este ejemplo) y seleccione **Continue** para completar el proceso de calibración.

### **Ajuste de sensibilidad.**

En esta etapa, se ajusta el nivel de la ganancia de referencia.

1. Coloque el palpador en el bloque de calibración IIW, enfocando el barreno lateral de 0,60 pulgadas (si se utiliza el sistema métrico internacional, 1,5 mm) de diámetro que sirve de reflector.



**Figura 5. 2 Bloque de calibración**

2. Mueva el palpador hacia adelante y hacia atrás para maximizar la amplitud del eco proveniente del barreno lateral del bloque de calibración. Asegúrese de

no confundir el eco de referencia del reflector con aquel del lado del bloque de calibración.

3. Una vez el eco maximizado, ajuste la sensibilidad del sistema (ganancia) para que la señal del reflector de referencia alcance la línea de referencia predeterminada en la pantalla. En este ejemplo, el eco alcanza el 80% de la altura de la pantalla completa.

4. Pulse las teclas **[2nd F]**, **[GAIN] (REF dB)** para bloquear el nivel de la ganancia de referencia y para añadir o sustraer la ganancia de inspección separadamente.

5. Si la ganancia de referencia (**Ref**) está activada, seleccione los parámetros **1/5 >Basic > Add, Scan dB y Off** para ajustar la ganancia de inspección.<sup>23</sup>

### CALIBRACIÓN EN MODO REPRESENTACIÓN *PHASED ARRAY*.

1. Defina el palpador, la zapata, la forma de la pieza bajo ensayo, las leyes focales y otros parámetros generales de inspección en la página de configuración del haz **Beam**.



Beam	
ScanType	S-Scan
Probe ID	5L16-A10
Wedge ID	SA10-N55S
Thick	0.000 in
Geometry	Plate
Inner Dia.	10.000 in
Outer Dia.	25.000 in
CSC	Off
Velocity	0.1232 in/ $\mu$ s
Start Angle	40 °
End Angle	69 °
Angle Step	1.0 °
Focus Depth	10.000 in

**Figura 5.3** Página de configuración **Beam**

2. Pulse la tecla **[GAIN]** para seleccionar la ganancia inicial apropiada para la calibración y ajuste su valor con la perilla de ajuste o con las teclas de dirección **[ARRIBA]** y **[ABAJO]**. Si se desconoce el valor inicial de la ganancia apropiada, defínalo a 12 dB y, de ser necesario, ajústelo durante la calibración.

<sup>23</sup> Manual del equipo

3. Ajuste la distancia de la trayectoria acústica en el bloque de calibración en el parámetro del rango **Range**.

### **Calibración con un palpador angular**

1. Siga el procedimiento de configuración inicial.
2. Abra la página de configuración del haz **Beam (1/5 > PA Probe > Beam)**.
3. Resalte el parámetro del ID de la zapata **Wedge ID** y seleccione la zapata.
4. Ajuste el ángulo de inicio y el de fin según la zapata utilizada.

### **Para calibrar la velocidad de propagación de la onda ultrasonora con un palpador angular:**

1. Pulse la tecla **[RANGE]** e introduzca la distancia de calibración. En éste caso 10 pulgadas.
2. Seleccione **1/5 > PA CAL > Calibration = CALVelocity** para calibrar la velocidad de propagación de la onda ultrasonora.
3. Pulse la tecla **[ANGLE]** y ajuste la ley focal (ángulo) seleccionada a 45°.
4. Coloque el palpador en la marca «0» ubicada en la muesca del bloque de calibración ASTM E164 IIW.
5. Mueva el palpador hacia adelante y hacia atrás hasta que el eco alcance su máxima amplitud (pico). Asegúrese de que los ecos no sobrepasen el 100% de la altura de la pantalla completa. De ser necesario, disminuya la ganancia.
6. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 sobre el primer eco de fondo.
7. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 de manera que el primer eco proveniente del arco del bloque sobrepase el umbral de la puerta.
8. Ajuste la ganancia para que la amplitud del eco alcance aproximadamente el 80%.

La medida del espesor aparece en número grandes en la parte superior de la pantalla.

9. Cuando la lectura se estabilice, seleccione **1/5 > PA CAL > Depth. 1** para seleccionar el primer parámetro de la profundidad.

La imagen se congela y el cuadro de diálogo **Enter Value for Thin Standard** aparece en la pantalla.

10. Introduzca el valor del espesor conocido y seleccione **Continue** para pasar a la segunda etapa de calibración.
11. Mantenga el palpador en la marca «0» del bloque de calibración.

12. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 de manera que el segundo eco proveniente del arco del bloque sobrepase el umbral de la puerta.

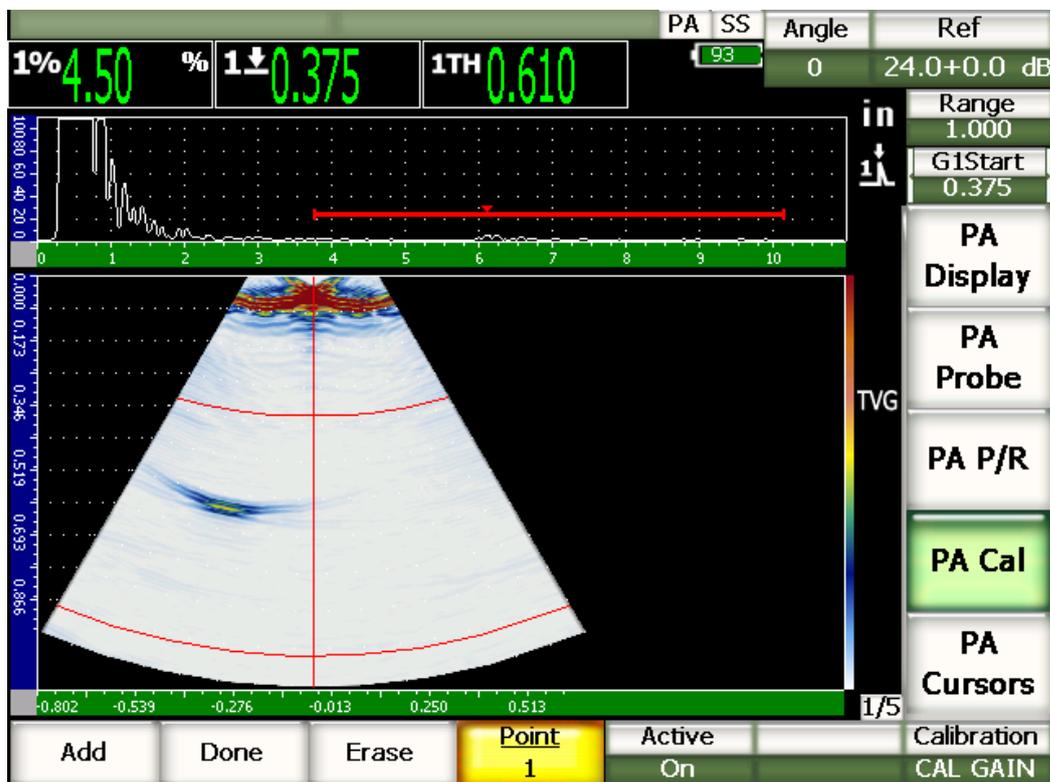
13. Ajuste la ganancia para que la amplitud del eco alcance aproximadamente el 80%.

La medida del espesor aparece en número grandes en uno de los campos de lectura.

14. Cuando la lectura se estabilice, seleccione **1/5 > PA CAL > Depth 2** para seleccionar el segundo parámetro de la profundidad.

La imagen se congela y el cuadro de diálogo **Enter Value for Thick Standard** aparece en la pantalla.

15. Introduzca el valor del espesor conocido y seleccione **Continuar** para completar el proceso de calibración.



**Figura 5.4 Imagen de Phased Array**

### **Calibración de la sensibilidad (ganancia) con un palpador angular**

La calibración de la sensibilidad (ganancia) se puede efectuar con un bloque de calibración que presente un barreno lateral o un eco de fondo como reflector de referencia.

1. Pulse la tecla **[RANGE]** e introduzca la distancia de calibración. En éste caso 2in.
2. Seleccione **1/5 > PA CAL > Calibration = CAL Gain** para calibrar la ganancia.
3. Pulse la tecla **[ANGLE]** y ajuste la ley focal (ángulo) seleccionada a 45°.
4. Coloque el palpador sobre el barreno lateral del bloque IIW que se muestra en la figura 5.2..
5. Pulse la tecla **[GATE]** y coloque la puerta 1 solamente sobre el primer reflector del barreno lateral.
6. Ajuste la ganancia para que la amplitud del eco alcance aproximadamente el 80%.
7. Seleccione **1/5 > PA CAL > Add** para comenzar la calibración.
8. Mueva el palpador hacia adelante y hacia atrás sobre el barreno lateral para adquirir la lectura de la medición de la amplitud pico no calibrada en todas las leyes focales.
9. Seleccione **1/5 > PA CAL > Erase** para borrar la curva de la ganancia y trazar una nueva curva. Repita la función **Add** y **Erase** hasta conseguir una línea lo más recta posible.
10. Seleccione **1/5 > PA CAL > Done** para aceptar la línea trazada, para calcular la sensibilidad (ganancia) y terminar la calibración.<sup>24</sup>

---

<sup>24</sup> Manual del equipo



**Figura 5.5 Phased Array calibrado**

### **INSPECCIÓN DE ACUERDO A LA NORMA D1.1/D1.5**

Esta inspección fue realizada en las probetas de acero A588 debido a que la distancia en el material base, requerida para la inspección con un ángulo de 70°, es suficiente para el barrido con la zapata.

La herramienta software AWS D1.1 de los equipos de la serie EPOCH™ 1000 ha sido concebida para las inspecciones conformes a la norma de soldadura estructural de acero D1.1 (o D1.5) de la American Welding Society. Esta norma permite clasificar las discontinuidades encontradas en la soldadura. Ésta utiliza la siguiente ecuación para desarrollar los criterios de aceptación de los reflectores detectados durante la inspección:

$$A - B - C = D$$

donde:

A = Nivel de la indicación de discontinuidad (dB)

B = Nivel de la indicación de referencia (dB)

C = Factor de atenuación:  $2 \times (\text{trayectoria acústica en pulgadas} - 1 \text{ pulgada})$  (dB)

D = Clasificación de la indicación (dB)<sup>25</sup>

<sup>25</sup> Norma AWS D1.1 2004, Capítulo 6, pág. 211

En inspecciones conformes a la norma AWS D1.1, se debe verificar la clasificación de la indicación (D) —calculada en función de A, B y C— en la tabla de criterios de aceptación y rechazo para inspecciones por ultrasonidos, elaborada por la AWS para estimar la severidad de las discontinuidades encontradas. Durante la inspección, se debe elaborar un informe AWS que indique los valores de todas las variables arriba mencionadas, la información sobre el palpador, la longitud y la ubicación de la discontinuidad, y la evaluación global de la discontinuidad.

**Tabla 5. 2 Criterios de Aceptación-Rechazo de la Prueba Ultrasónica  
(Conexiones no Tubulares cargadas estáticamente)**

Discontinuity Severity Class	5/16 through 3/4 [8–20]	> 3/4 through 1-1/2 [20–38]	> 1-1/2 through 2-1/2 [38–65]			> 2-1/2 through 4 [65–100]			> 4 through 8 [100–200]		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
Class A	+5 & lower	+2 & lower	-2 & lower	+1 & lower	+3 & lower	-5 & lower	-2 & lower	0 & lower	-7 & lower	-4 & lower	-1 & lower
Class B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
Class C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 to +2	+1 +2	+3 +4	-4 to +2	-1 to +2	+2 +3
Class D	+8 & up	+5 & up	+3 & up	+6 & up	+8 & up	+3 & up	+3 & up	+5 & up	+3 & up	+3 & up	+4 & up

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 227)

donde:

Clase A (discontinuidades grande):

Cualquier indicio de esta categoría deberá ser rechazado (independientemente de la longitud).

Clase B (discontinuidades medio):

Cualquier indicio de esta categoría que tiene una longitud superior a 3 / 4 de pulgada [20 mm] será rechazada.

Clase C (pequeñas discontinuidades):

Cualquier indicio de esta categoría que tiene una longitud superior a 2 pulgadas [50 mm] será rechazada.

Clase D (discontinuidades menores):

Cualquier indicio de esta categoría se aceptará, independientemente de la longitud o ubicación en la soldadura.

### Para activar la herramienta software AWS

- Seleccione **4/6 > Sizing Option > AWS D1.1 = On** para activar la herramienta.

Después de activar la herramienta, ajuste el valor del parámetro **Ref B** para comenzar la inspección. Este valor representa el nivel de la ganancia necesaria para que el eco del reflector de referencia alcance el 80% de la altura de la pantalla completa. En las calibraciones de palpadores angulares, el bloque de calibración presenta generalmente un barreno lateral como reflector de referencia. Sin embargo, es posible utilizar otros reflectores de referencia siempre y cuando respeten las exigencias de la norma AWS para este tipo de inspecciones.<sup>26</sup>

En éste caso se utilizó el bloque de calibración OLYMPUS ASTM E164 IIW con acero 1018.

### Para almacenar el valor Ref B

1. Pulse la tecla **[GATE]** para colocar la puerta sobre el eco del reflector de referencia.
2. Pulse las teclas **[2ND F], [GATE] (AUTO XX%)** para que el eco alcance el 80% de la altura de la pantalla completa.
3. Seleccione **6/6 > AWS > Ref B** para almacenar el reflector ubicado en la puerta como el valor de **Ref B**.

Después de almacenar el valor **Ref B**, el equipo muestra en tiempo real la clasificación «D» de las indicaciones en la puerta. El valor D en tiempo real — el cual representa la clasificación de defecto según los criterios de aceptación y rechazo publicados por la AWS para clasificar los defectos potenciales— aparece en uno de los seis campos de lectura de la medida.

---

<sup>26</sup> Manual del equipo Pag. 233

La norma AWS exige que una ganancia de inspección sea definida para el valor **Ref B** para localizar defectos más pequeños o más profundos que los defectos de referencia.

### **Para añadir la ganancia de inspección**

1. Pulse la tecla **[GAIN]** para ajustar la ganancia de inspección necesaria para efectuar una inspección conforme a la norma AWS.
2. De ser necesario, seleccione **6/6 > AWS > Scan dB** para activar o desactivar la ganancia de inspección.

### **Prueba ultrasónica de soldaduras por técnicas alternativas**

Se utilizó una técnica alternativa en las probetas de acero A36 ya que fue necesario utilizar la zapata de 60° a fin de cumplir con la distancia necesaria de barrido en el material base.

Los métodos de calibración aquí descritos, son considerados aceptables y se usan para lograr estos procedimientos alternos UT. El código reconoce que otros métodos de calibración pueden ser preferidos por el usuario individual.<sup>27</sup>

La sensibilidad estándar debería consistir de la siguiente suma:

- (1) **Sensibilidad Básica.** La indicación maximizada del reflector estándar, más
- (2) **Corrección de Amplitud de la Distancia.** Determinados por indicaciones de reflectores estándar múltiples a profundidades que representan el mínimo, medio y máximo, que vaya a examinarse.
- (3) **Corrección de la Transferencia.** Ajuste para tipo de material, perfil y condiciones scanning de la superficie como se describen a continuación:

Para la estandarización precisa de sensibilidad, la corrección de transferencia deberá efectuarse. Esto asegurará que las diferencias en propiedades acústicas, superficies de scanning y los perfiles entre la calibración estándar y el bloque de calibración se utilicen cuando se realice la calibración estándar de sensibilidad. Los valores de la corrección de transferencia deberían ser determinados inicialmente antes del examen y cuando varía el tipo de material, forma, espesor y superficies de scanning, tales valores diferentes excedan  $\pm 25\%$  de los valores originales esperados.

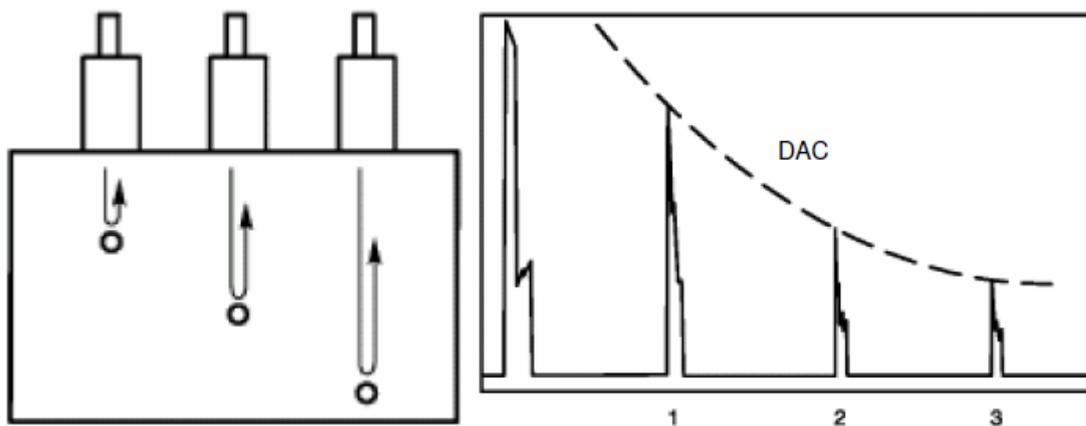
---

<sup>27</sup> Código AWS D1.1, Anexo K

La exactitud de la calibración deberá estar dentro de un  $\pm 5\%$  del espesor real para el examen de los metales base para laminaciones y  $\pm 2\%$  para determinar el tamaño (altura) y posición de la irregularidad.

La unidad de búsqueda debería estar ubicada sobre los reflectores estándar a un mínimo de 3 profundidades para asegurar una cobertura en todo el espesor para ser inspeccionado en conformidad con la Figura 5.3. Los valores de dB obtenidos de las indicaciones maximizadas de cada reflector deberán ser registrados y una (DAC) Curva de Amplitud de la Distancia establecida o métodos electrónicos deberán usarse para conocer la indicación de la ubicación en la pantalla, la cual representa el reflector estándar en varios espesores que vayan a examinarse.

El bloque de calibración utilizado en la inspección es el NAVSHIPS TEST BLOCK con acero 1018 de la compañía STAVELEY SENSORS INC.



**Figura 5. 6 Calibración de la Sensibilidad de la Onda de la Compresión**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, anexo K, pág. 367)

### **Activación de la curva DAC/TVG y corrección de referencia**

Antes de activar la curva DAC/TVG, es necesario calibrar correctamente el equipo según la pieza bajo ensayo. Los parámetros de la herramienta DAC/TVG pueden ser activadas en la página de configuración **DAC/TVG** en **4/5 > Sizing Option > DAC/TVG**.

Después de seleccionar los parámetros DAC/TVG (incluyendo, de ser necesario, la activación de la corrección de referencia), pulse la tecla

[ESCAPE] para regresar al Ascan en tiempo real y comenzar la configuración DAC/TVG.

Para capturar un punto DAC, coloque la puerta 1 sobre el eco y seleccione **6/6 > DAC Setup > Add** para adquirir el punto.

Repita el paso anterior por lo menos con tres profundidades diferentes para generar la curva y al terminar presione **6/6 > DAC Setup > Done**

Para desactivar la función DAC/TVG, abra la página de configuración **DAC/TVG** y seleccione **DAC/TVG Type = Off**.

La curva DAC de tipo 20% - 80% es una combinación de las técnicas DAC y TVG. En la mayoría de normas de medición e inspección que utilizan la curva DAC, es imposible examinar un defecto potencial ubicado por debajo del 20% de la altura de la pantalla completa.

El sistema compensa automáticamente la amplitud del eco adquirido por debajo del 20% de la altura de la pantalla completa.

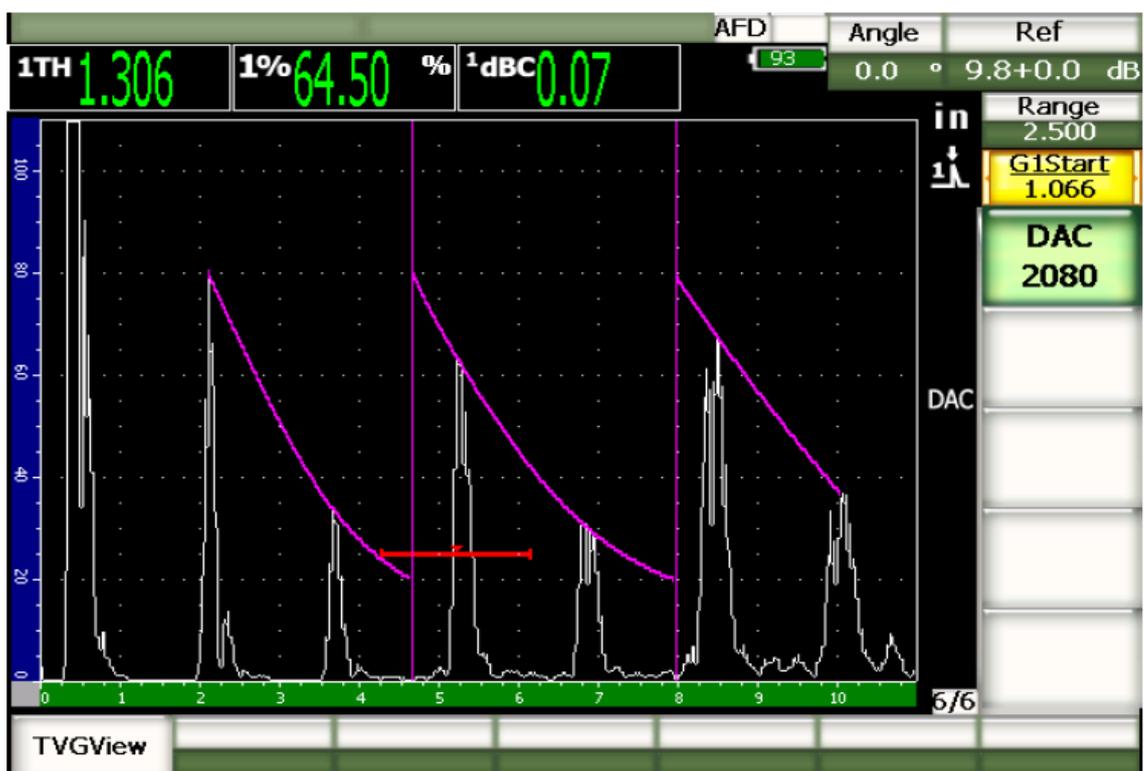


Figura 5.7 Curva DAC completada

## **VERIFICACIÓN DE LA CALIBRACIÓN**

Esta verificación debe ser efectuada cuando suceda alguna de las siguientes condiciones.

- Haya concluido cada inspección.
- Haya transcurrido un lapso máximo de 30 minutos de inspección.
- Se efectúe un cambio de operador.
- Se cambie de palpador o de cable.
- Se cambien las baterías.
- Se cambie de corriente directa (batería) a corriente alterna o viceversa.
- Se sospeche de un mal funcionamiento o anomalía del sistema de inspección.

## **EQUIPO AUXILIAR**

### **ACOPLANTES**

Excepto que se indique algo diferente, sólo se permitirá el empleo de los siguientes acoplantes: pasta de celulosa diluida con agua, vaselina, glicerina o aceite. En éste procedimiento se utilizó una cucharada de CMC (CarboxiMetilCelulosa) diluida en 1 litro de agua hervida.

En caso de cambiar de acoplante durante la inspección, se comprobará toda la calibración.

Se debe emplear el mismo acoplante para calibrar y ajustar el instrumento para efectuar la inspección.

### **BLOQUES DE CALIBRACIÓN DE REFERENCIA.**

- El bloque del Instituto Internacional de Soldadura (IIW) y el bloque de pasos deben ser los bloques básicos para la calibración en distancia.
- Excepto que se indique otro bloque, el bloque IIW, versión 1 ó versión 2, será el bloque de calibración a emplearse en las calibraciones con haz angular y haz longitudinal cristal sencillo.

- Excepto que se indiquen otros bloques, el bloque IIW, versión 1 ó versión 2, y el bloque de pasos serán los bloques de calibración a emplearse en las calibraciones con palpador de doble cristal.
- Para la calibración de palpadores de haz angular, no se permite el empleo de orillas o esquinas del material como punto de calibración.
- La diferencia de temperatura entre el bloque de calibración y la pieza a inspeccionar no debe ser mayor de 10°C.
- El juego de bloques Distancia-Amplitud con agujero de fondo plano de 5/64" de diámetro será empleado para el trazo de la Curva de Corrección Distancia-Amplitud (DAC) o la Línea de Amplitud de Referencia (ARL) para palpadores de haz recto.
- El bloque básico de calibración ASME será empleado para el trazo de la curva DAC o la ARL para palpadores de haz angular.

### **PIEZA DE ENSAYO**

a) Condición física y preparación de la superficie (temperatura, acceso, remoción de recubrimientos de protección, rugosidad, etc.)

La superficie de barrido deberá estar libre de pintura, cascarilla, óxido y cualquier otro material extraño o irregularidad que pueda afectar la transmisión del sonido en la pieza, que impida el libre movimiento del palpador o que cause errores en la interpretación y evaluación de las indicaciones.

Excepto que se especifique otra condición, la rugosidad superficial máxima permisible no deberá exceder de 12.5  $\mu\text{m}$  (500 rms) para superficies granalladas (sandblasteadas) y 6.3  $\mu\text{m}$  (250 rms) para superficies con maquinado burdo (desbaste) o esmeriladas.

La velocidad de desplazamiento del palpador no debe ser superior a 150 mm/seg (6" seg).

Excepto que exista alguna otra instrucción, durante la exploración o barrido, la ganancia debe incrementarse en 6 o 12 dB por arriba del nivel de referencia de la sensibilidad, para facilitar la detección de posibles discontinuidades. Estos dB adicionales se restarán cuando se inicie la evaluación de las indicaciones.

Generalmente es posible hacer mediciones a través de capas delgadas de óxido, siempre y cuando el óxido sea uniforme y esté bien adherido al metal.

Algunas superficies rugosas o corroídas deberán ser limadas o esmeriladas para asegurar un acoplamiento adecuado, también, puede ser necesario remover la pintura si ha sido aplicada en capas gruesas o si se encuentra desprendida del metal.

En algunas ocasiones es posible realizar mediciones a través de recubrimientos delgados de pintura (aproximadamente de 0.004" a 0.008"), pero generalmente capas gruesas de pintura atenuarán las señales o posiblemente sean creados ecos falsos, causando mediciones erróneas.

Sobre algunas superficies rugosas, el uso de un gel o grasa más que de un líquido acoplante ayudará a transmitir la energía ultrasónica dentro de la pieza de prueba, pero en casos extremos será necesario esmerilar la superficie lo suficiente para permitir el contacto con la superficie del transductor.

En aplicaciones donde se encuentran picaduras profundas en la superficie externa de una tubería o tanque, es necesario medir el espesor remanente del metal desde la base de la picadura hasta la superficie interna. Existen técnicas ultrasónicas sofisticadas que utilizan transductores de inmersión focalizados que pueden medir directamente desde la base de la picadura hasta la pared interna, pero en general, para efectos prácticos, no es posible debido a las condiciones de trabajo.

La técnica convencional es medir con ultrasonido una parte del material libre de picaduras, medir la profundidad de la picadura por medios mecánicos, y restar la profundidad de la picadura al espesor obtenido, como alternativa, podría limarse o esmerilarse la superficie, debajo de la base de la picadura y medir normalmente.

Como con cualquier inspección difícil, la experimentación con muestras de la pieza a medir es el mejor camino para determinar las limitantes de la inspección en combinaciones particulares de instrumento / transductor para una superficie dada.

b) Descripción de área o volumen por ensayar, incluidos los datos de referencia.

Cuando la superficie posterior no es paralela a la superficie frontal, o cuando la divergencia del haz alcanza una superficie lateral de la pieza, se puede

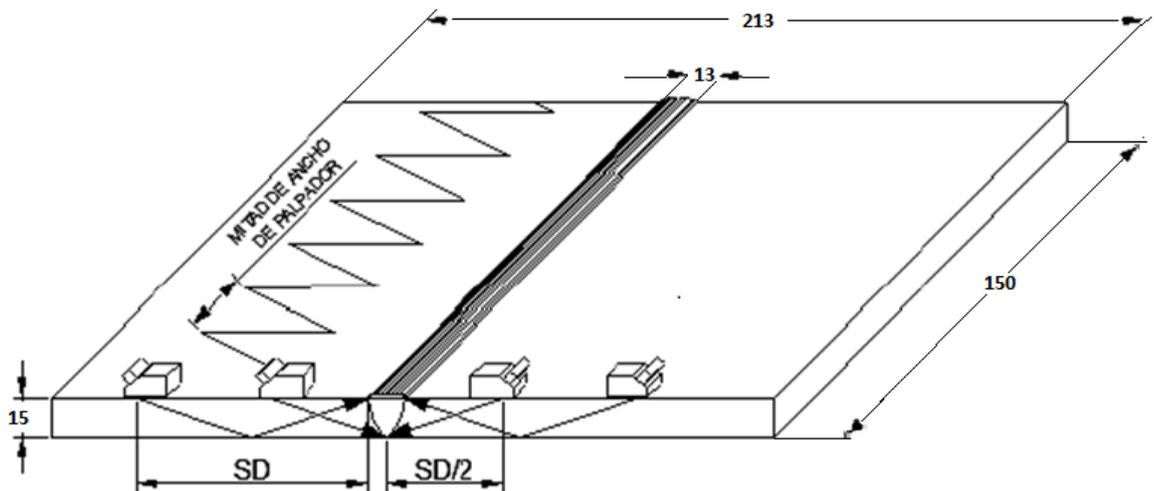
producir dispersión y conversión de modo, por lo cual se pueden generar indicaciones sobre la pantalla del instrumento que puedan crear confusión. En la inspección de piezas con superficies paralelas es importante monitorear la reflexión de pared posterior para evaluar y asegurar que la onda ultrasónica pasa adecuadamente a través de la pieza, para lo cual se aplica la siguiente fórmula:

$$SD=2*T*\text{tang}\theta$$

Donde:

T: Espesor de la pieza a ensayar

$\theta$ : Ángulo del palpador



**Figura 5. 8 Barrido del palpador en la pieza de ensayo**

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, sección 6, pág. 213)

c) Discontinuidades buscadas

Indicación puntual: Una indicación es llamada puntual si el umbral de su atenuación es alcanzado en cualquier dirección para un desplazamiento máximo igual al diámetro del transductor.

Discontinuidad Lineal: Una discontinuidad es considerada lineal si su tamaño menor (ancho) es considerado puntual.

Discontinuidad volumétrica: Se llama discontinuidad volumétrica a aquella que presenta una superficie (área dentro de un contorno) y un desarrollo en profundidad.

Discontinuidad Aislada: Si la discontinuidad más cercana está localizada a una distancia mayor a 40mm en cualquier dirección.

Discontinuidades Acumuladas: Si dos discontinuidades adyacentes están localizadas a una distancia menor a 40mm, pero con menos de cinco discontinuidades contenidas en el volumen cúbico de 50mm por lado.

Discontinuidades agrupadas: Si cinco o más discontinuidades son encontradas en un volumen cúbico de 50mm por lado.

Indicación viajera: Es aquella cuya inflexión se desplaza sobre la línea de barrido a una distancia equivalente a 1" o más de profundidad, por el movimiento del palpador sobre la superficie de barrido.

## **REQUISITOS DE EXPLORACIÓN Y BARRIDO.**

### **Cobertura de exploración.**

La cobertura al examinar un volumen o zona de interés dependerá de la relación del tamaño de discontinuidad que se espera encontrar y la magnitud de la selección transversal del haz ultrasónico que se esté empleando. Con base en esto las discontinuidades se clasifican en mayores y menores.

### **Condiciones de barrido en la examinación de una unión soldada empleando haz angular.**

Delimitar la zona de barrido a ambos lados del cordón sobre la superficie desde la cual se llevará a cabo la exploración.

Inicialmente la exploración de la soldadura es llevada a cabo dirigiendo el haz perpendicular al eje de la soldadura y posteriormente a lo largo de las líneas paralelas e inclinando el haz ligeramente hacia la soldadura con un ángulo aproximado de 15°.

Siempre que sea posible se debe efectuar un mínimo de seis barridos con un haz angular para la examinación de soldaduras a tope.

Antes de iniciar con la exploración empleando haz angular, es necesario efectuar una exploración al 100%, empleando haz longitudinal sobre el material base con una cobertura desde el límite lejano de las zonas de barrido hasta el borde de la soldadura; esto es con la finalidad de registrar cualquier indicación que pudiera interferir la inspección con haz angular.

Los movimientos que deben efectuarse con el palpador de haz angular al estar explorando la soldadura son:

- De rotación, ángulo “a” 0 10°\*
- Transversal \*
- Zig-Zag, distancia “c” igual a la mitad del ancho del palpador.\*
- Orbital
- Lateral.

\*Son movimientos combinados durante la exploración perpendicular del haz con respecto al eje de la soldadura.

### UMBRAL DE REGISTRO DE INDICACIONES

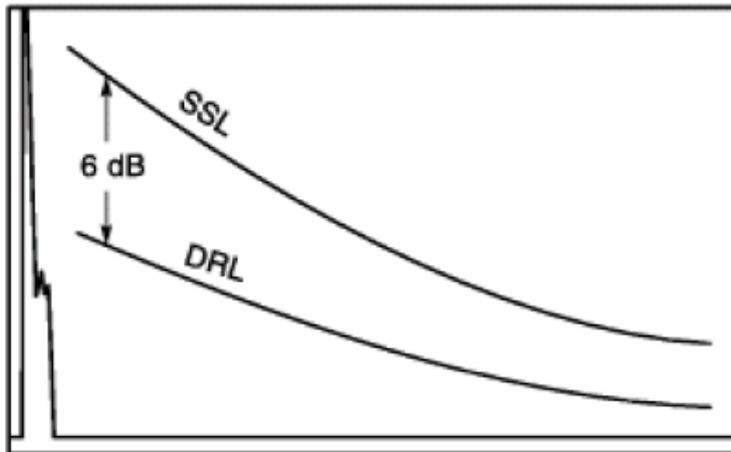
#### Indicaciones reportables para el método de evaluación basada en la curva DAC ó ARL

1. Una indicación de discontinuidad es inaceptable si su amplitud iguala o supera a la curva DAC o a la ARL.
2. Se debe registrar y reportar indicaciones dudosas o cuestionables que tengan una amplitud igual o mayor al 20% de DAC ó ARL.

**Tabla 5. 3 Criterio de Aceptación-Rechazo en curvas DAC**

Criterio de Aceptación-Rechazo				
Nivel máximo logrado de la Amplitud de la Irregularidad	Longitudes Máximas de la Discontinuidad por Clases de Soldadura			
	Cargada Estáticamente	Cargada Ciclicamente	Clase Tubular R	Clase Tubular X
Nivel 1 - Igual o mayor que SSL	5dB sobre SSL = ninguno permitido 0 a 5 dB y mayores SSL = 3/4 pulgadas [20mm]	5dB sobre SSL = ninguno permitido 0 a 5 dB y mayores SSL = 1/2 pulgadas [12mm]	Ver Figura 6.7	Ver Figura 6.8 (utiliza altura)
Nivel 2 - Entre el SSL y el DRL	2 pulgadas [50mm]	Mitad 1/2 de soldadura = 2pulgadas [50mm] Tope y fondo 1/4 de soldadura 3/4 pulgadas [20mm]	Ver Figura 6.7	Ver Figura 6.8 (utiliza altura)
Nivel 3 - Igual a o menor que el DRL	No considerar (cuando esté especificado por el Ingeniero, registre información)			

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, anexo K, pág. 371)



Nota General: La pantalla visual se puede marcar para mostrar el SSL establecido durante la calibración de sensibilidad con el DRL localizado 6 dB más abajo.

### Gráfica 5. 1 Curvas DRL y SSL

Fuente (Norma AWS D1.1 2002, anexo K, pág. 373)

SSL= Nivel de sensibilidad Estandar

DRL= Nivel no considerado= 6dB menor que SSL

#### LIMPIEZA POSTERIOR:

Si no se especifica otra actividad, una vez concluido el examen, los residuos del acoplante se removerán de las superficies. Primero con material absorbente seco y posteriormente, para concluir, se emplea un solvente y se frota la superficie con un material absorbente.

#### REPORTE DE RESULTADOS:

##### Para crear un archivo en el equipo

1. Seleccione **5/5 > Files > Create** para abrir la página de configuración de creación de archivos. En esta página de configuración, seleccione **File** e introduzca un nombre de archivo de 8 caracteres con el teclado virtual o con el teclado USB.

3. De ser necesario, introduzca asimismo la siguiente información:

a) la descripción del archivo en el campo **Description**;

b) los datos de identificación del inspector en el campo **Inspector ID**; y Ingrese todos los parámetros necesarios para el tipo de archivo.

4. Después de completar la configuración del archivo, seleccione el botón **Create** para salir de la página de configuración y crear el archivo.

5. Abra el archivo creado antes de guardar información en él. El parámetro para abrir archivos **Open** es independiente del parámetro para crear archivos **Create**.

Para consultar la lista de archivos disponibles en el equipo, seleccione **5/5 > Files > Open** para abrir la página de configuración de apertura de archivos **Open**.

Para consultar la lista de lecturas de medidas de un archivo, selecciónelo y pulse la tecla **[ACEPTAR]**. La lista las lecturas de las medidas y sus íconos respectivos aparecen en la parte inferior de la pantalla y la imagen puede ser archivada en un USB.

Los resultados de cada examen efectuado se registrarán en el siguiente formato.

### **Información mínima que debe incluir el reporte de resultados.**

- a. Identificación del procedimiento de inspección empleado
- b. Marca comercial, modelo y número de serie del equipo ultrasónico.
- c. Nombre y firma del inspector.
- d. Identificación de la pieza o soldadura examinada, indicando tipo de material y su proceso de fabricación.
- e. Croquis de la pieza o soldadura examinada.
- f. Superficie desde la cual se efectuó el examen.
- g. Mapeo de las discontinuidades encontradas iguales o mayores al umbral de registro
- h. Fecha y hora del examen
- i. Acoplante empleado
- j. Identificación de los bloques empleados.
- k. Acabado superficial.
- l. Frecuencia de excitación (MHz).

### 5.1.2.3 Reporte de resultados

	ORDEN DE TRABAJO:		<h1 style="color: #0070C0;">CIME</h1>
	CLIENTE :		
	PROYECTO :		
	LOCACION :	FECHA :	

<b>REPORTE DE INSPECCION CON ULTRASONIDO</b>	<b>No:</b>
--	------------

<b>1. EQUIPO EMPLEADO</b>		
EQUIPO :	Fecha de Calibración :	
TRANSDUCTOR:	Elementos :	Frecuencia :
<b>2. PARAMETROS DE INSPECCION</b>		
Tipo de Inspección:	Método de Calibración:	Procedimiento:
Bloque de Calibración:	Ajuste de Sensibilidad:	Norma Aplicable:
Condición Superficial:	Acoplante:	

<b>3. DESCRIPCIÓN :</b> _____ _____ _____
<b>4. ESQUEMA :</b>

<b>5. CARACTERÍSTICAS GENERALES</b>		
<b>SOLDADURA :</b> Tipo de Unión :	Proceso de Soldadura : Posición de Soldadura :	Espesor de Placa :
Tipo de Soldadura :		

<b>6. RESULTADOS OBTENIDOS:</b>	<b>7. OBSERVACIONES:</b> _____ _____
---------------------------------	--

<b>INSPECCIONADO POR:</b>		<b>EVALUADO POR:</b>		<b>APROBADO POR:</b>	
Nombre :		Nombre :		Nombre :	
Nivel :		Nivel :		Cargo :	
Fecha :	Firma :	Fecha :	Firma :	Fecha :	Firma :

## **5.1 END CON TINTAS PENETRANTES**

El ensayo no destructivo con tintas penetrantes en la soldadura se realizó en el laboratorio de Ciencia de Materiales perteneciente a la carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE.

### **5.1.1 MATERIALES Y EQUIPO**

La realización de las pruebas con tintas penetrantes se utilizó los siguientes materiales:

- Removedor acuoso "Cleaner" marca ADROX 9PR551.
- Tinta penetrante roja visible marca ADROX 996P
- Revelador Acuoso marca ADROX 901B.

### **5.1.2 PROCEDIMIENTO**

A continuación se detalla el procedimiento para la realización del ensayo:

1- Preparación de la superficie para el ensayo:

a- Remueva pinturas, suciedad, y/u óxidos con cepillo de alambre de dureza menor al del metal base, a fin de no producir rayadura.

b- Aplique limpiador / removedor (CLEANER) marca ADROX 9PR551 sobre la superficie. Luego remueva con un paño limpio o papel absorbente tipo toalla (no utilice estopa). En caso de ser necesario un mayor grado de limpieza repita esta operación.

2- Aplicación del penetrante:

Estando la superficie seca, aplique una película uniforme de penetrante, tinta roja ADROX 996P, manteniendo para esto el aerosol a una distancia de 30 cm. de la superficie. Deje transcurrir un tiempo de penetración de 5 a 10 minutos.

3- Remoción del exceso de penetrante:

Remueva el exceso de la superficie utilizando un paño limpio y seco o papel absorbente tipo toalla (no utilice estopa), levemente humedecido con limpiador / removedor (CLEANER).

Repita esta operación hasta que todo el exceso de penetrante sea removido de la superficie de ensayo.

#### 4- Aplicación del revelador (DEVELOPER):

Agitar bien el aerosol del revelador húmedo no acuoso AROX 901B para homogeneizar la suspensión del mismo.

Aplice enseguida una película fina y uniforme del revelador sobre la superficie, manteniendo el aerosol a una distancia de aproximadamente 30 cm. de la misma.

Aguarde de 3 a 10 minutos antes de iniciar la inspección del área respectiva.



## CAPITULO 6

### ENSAYOS MECANICOS

#### 6.1 ENSAYOS MECÁNICOS DE TRACCIÓN

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM, de la ESPE.

##### 6.1.1 DATOS DEL EQUIPO

Los datos mostrados en la tabla 6.1 corresponden al equipo utilizado para los ensayos en las siguientes probetas:

- Probetas únicamente con material de aporte utilizando los electrodos tubulares E71T-1 y Nicrosol E81T1-Ni 1.
- Probetas con material base, acero ASTM A36, y material de aporte, electrodo tubular E71T-1.

Mientras que en la tabla 6.2 se muestran los datos del equipo utilizado en los ensayos de tracción en:

- Probetas con material base, acero ASTM A588, y material de aporte, electrodo tubular Nicrosol E81T1-Ni.

**Tabla 6. 1 Datos del equipo AMSLER para ensayo de tracción.**

EQUIPO:	MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES		
CODIGO:	RM-29	MARCA:	AMSLER
MANUAL:	MRM-29	MODELO:	FM – 1033

CARACTERISTICAS TECNICAS:			
VOLTAJE:	220 V	REFRIGERANTE:	N/A
FASES:	3	TIPO DE MOTOR:	P - 8
CICLOS:	60 Hz	POTENCIA MOTOR:	2 HP
PESO:	500 Kg	VELOCIDAD MAX MOTOS :	1700 rpm
CAPACIDAD MAX:	Compresión: 200(t) Tracción: 10 (t)	COMBUSTIBLE:	N/A

Fuente: Manual del equipo

**Tabla 6. 2 Datos del equipo MTS para ensayo de tracción.**

EQUIPO:	<b>MÁQUINA DE ENSAYOS UNIVERSALES</b>		
CODIGO:	RM-30	MARCA:	MTS
MANUAL:	MRM-30	MODELO:	810-14-2

<b>CARACTERISTICAS TECNICAS:</b>			
VOLTAJE:	230 V	REFRIGERANTE:	N/A
FASES:	3	TIPO DE MOTOR:	SC
CICLOS:	60 Hz	POTENCIA MOTOR:	40 HP
PESO:	3000 Kg	VELOCIDAD MAX MOTOS :	1765 rpm
CAPACIDAD MAX:	500 KN	COMBUSTIBLE:	N/A

Fuente: Manual del equipo

### 6.1.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento mostrado a continuación corresponde al equipo descrito en la tabla 6.1.

- Preparación de la probeta según los requerimientos del equipo.
- Control del nivel de aceite.
- Abrir las válvulas de M1 y cerrar las válvulas M2 para tracción. Estas válvulas se encuentran atrás de la unidad de control.
- Coloque el resorte correspondiente al ensayo de tracción y la escala en el dinamómetro. Coloque el dial de la escala escogida.
- Conecte a la fuente la alimentación eléctrica.
- Conecte la protección y encienda el equipo.
- Deje pasar 20 minutos de calentamiento.
- Coloque la probeta.
- Proceda al ensayo de acuerdo a los parámetros que se ha establecido. Debe estar abierta la manilla de la derecha y se va cerrando lentamente la manilla de la izquierda.
- Realice las lecturas del dinamómetro. Sacar la probeta.
- Apagar el equipo y desconectar las protecciones eléctricas.

Precauciones:

- La velocidad de ensayo debe ser lenta y continua o de acuerdo a las condiciones.
- Manténgase alejado de las columnas de ensayo.
- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

El procedimiento mostrado a continuación corresponde al equipo descrito en la tabla 6.2.

- Accionar los breakers para energizar el estabilizador de voltaje.
- Energizar la máquina con la perilla ON/OFF del panel 413.
- Deje pasar 1 hora de calentamiento.
- Escoger la función “STROKE PERCENT” del panel 442 para desplazamiento.
- Escoger el rango de escala para carga y desplazamiento; para carga 50% y para desplazamiento 50% en el mismo panel.
- Presionar el botón “RAMP” del panel 410 para ensayo de tracción.
- Determinar la velocidad del ensayo, en nuestro caso 1mm cada 30 segundos para aceros.
- En el panel 413 se sube la presión hidráulica presionando “high”.
- Activamos el control automático del ensayo girando la perilla que se encuentra en el panel 410 a modo “REMOTE”.
- Para iniciar el ensayo presione el botón “RUN” del panel 413.
- Terminado el ensayo presione el botón “STOP” y baje la presión con el botón “LOW”; ambos ubicados en el panel 413.
- Finalmente para apagar el equipo pulse “HIDRAULIC OFF” y gire la perilla de encendido a modo “OFF” en el panel 413 y desconecte los breakers del estabilizador de voltaje.

Precauciones:

- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

### 6.1.3 PARÁMETROS INICIALES

#### 6.1.3.1 Áreas

**Tabla 6. 3 Áreas en mm<sup>2</sup> de sección reducida en probetas Electrodo E71T-1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	24.11	24.06	23.82	23.73
2	23.41	23.22	23.33	23.85
3	23.13	23.74	23.24	24.15

**Tabla 6. 4 Áreas en mm<sup>2</sup> de sección reducida en probetas Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	23.91	23.66	23.63	24.39
2	23.69	24.17	23.83	24.41
3	23.69	23.98	23.79	24.61

**Tabla 6. 5 Áreas en mm<sup>2</sup> en sección reducida de probetas en acero A36 y Electrodo E71T-1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	200.2	205.51	206.03	195.62
2	208.54	197.1	193.27	203.2

**Tabla 6. 6 Areas en mm<sup>2</sup> en sección reducida de probetas en acero A 588 y Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	186.92	200.13	201.33	192.61
2	192.73	186.55	184.35	203.96

### 6.1.4 RESULTADOS

#### 6.1.4.1 Escala en el dinamómetro

Para la elección de la escala con la que se va a trabajar utilizamos los siguientes valores:

- Resistencia a la tracción Electrodo E71T-1: 670 N/mm<sup>2</sup>
- Área de la sección reducida según Norma ASTM A 370: 24mm<sup>2</sup>.

Fuerza = Resistencia x Área

Fuerza = 16080 N

Fuerza = 1640.8 Kgf

- Resistencia a la tracción Electrodo E81T1-Ni 1: 690 N/mm<sup>2</sup>
- Área de la sección reducida según Norma ASTM A 370: 24mm<sup>2</sup>

Fuerza = Resistencia x Área

Fuerza = 16560 N

Fuerza = 1690 Kgf

Basados en los valores de fuerza aplicada se utilizó una escala de 5000 Kgf. en el dinamómetro para las probetas donde sólo se utilizó material de aporte.

- Resistencia a la tracción en acero ASTM A36: 410 N/mm<sup>2</sup>
- Área de la sección reducida según Norma AWS D1.1: 200 mm<sup>2</sup>

Fuerza = Resistencia x Área

Fuerza = 82000 N

Fuerza = 8370 Kgf

Basados en los valores de fuerza aplicada se utilizó una escala de 10000 Kgf. en el dinamómetro para las probetas donde se utilizó material base y de aporte.

- Resistencia a la tracción en acero ASTM A588: 485 N/mm<sup>2</sup>
- Área de la sección reducida en según Norma AWS D1.1: 200mm<sup>2</sup>

Fuerza = Resistencia x Área

Fuerza = 97000 N

Fuerza = 9900 Kgf

Debido a que se recomienda no sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala, y la escala máxima de la máquina de ensayos universales marca

AMSLER es 10000 Kgf; se realizó el ensayo de tracción de éstas probetas en la máquina MTS 810 , cuya escala se basa en una relación en la que 10V es igual 25000 Kgf.

Después de realizar los ensayos de tracción se obtuvieron los siguientes resultados en la máquina de ensayos universales:

**Tabla 6. 7 Fuerza Kg. obtenida en probetas de Electrodo E71 T-1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	1500	1490	1700	1520
2	1610	1620	1640	1510
3	1500	1600	1370	1570

**Tabla 6. 8 Fuerza en Kg obtenida en probetas de Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	1590	1630	1600	1600
2	1650	1660	1680	1800
3	1700	1680	1650	1690

**Tabla 6. 9 Fuerza en kg obtenida en probetas de acero A36 y Electrodo E71T-1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	8730	9060	8750	8430
2	8870	8840	8240	8020

**Tabla 6. 10 Fuerza en Kg obtenida en probetas de acero A36 y Electrodo E71T-1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	11475	10925	11400	10825
2	11325	10825	11350	11250

**Tabla 6. 11 Fuerza en V obtenida en probetas de en  
acero A588 y Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. Ambiente °C	300 °C	600 °C	900 °C
1	4.59	4.37	4.56	4.33
2	4.53	4.33	4.54	4.5

#### 6.1.4.2 Cálculo de resistencia última a la rotura en tracción

En las siguientes tablas se detallan los valores calculados de resistencia última a la rotura en tracción en cada una de las probetas.

**Tabla 6. 12 Resistencia a la rotura en probetas de  
Electrodo E71 T-1**

Nro Probeta	T. ambiente °C		300 °C		600 °C		900 °C	
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi
1	613,01	91,95	606,9	91,04	699,41	104,91	627,73	94,16
2	673,99	101,10	683,72	102,56	688,9	103,34	620,46	93,07
3	635,54	95,33	660,49	99,07	577,71	86,66	637,1	95,57

**Tabla 6. 13 Resistencia a la rotura en probetas de  
Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. ambiente °C		300 °C		600 °C		900 °C	
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi
1	652,36	97,85	675,84	101,38	664,24	99,64	643,54	96,53
2	683,26	102,49	673,75	101,06	691,6	103,74	723,39	108,51
3	703,97	105,60	687,27	103,09	680,39	102,06	673,67	101,05

**Tabla 6. 14 Resistencia a la rotura en probetas de acero A36 y  
Electrodo E71 T-1**

Nro Probeta	T. ambiente °C		300 °C		600 °C		900 °C	
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi
1	427,78	64,17	432,48	64,87	416,63	62,49	422,75	63,41
2	417,26	62,59	439,98	66,00	418,25	62,74	387,19	58,08

**Tabla 6. 15 Resistencia a la rotura en probetas de acero A588 y Electrodo E81T1-Ni 1**

Nro Probeta	T. ambiente °C		300 °C		600 °C		900 °C	
	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi	Mpa	Ksi
1	602,23	90,33	535,52	80,33	555,48	83,32	551,34	82,70
2	576,45	86,47	569,25	85,39	603,98	90,60	541,1	81,17

**Ejemplo de cálculos:**

*Resistencia (Mpa)*

$$\text{Resistencia } (\sigma) = \frac{\text{Fuerza (F)}}{\text{Area (A)}}$$

$$\sigma = \frac{85837.5 (N)}{206.03 (mm^2)}$$

$$\sigma = 416.63 MPa$$

*Resistencia (Ksi)*

$$\sigma = \frac{19.99 (Klbs)}{0.32 (plg^2)}$$

$$\sigma = 62.49 Ksi$$

## **6.2 ENSAYOS METALGRÁFICOS**

### **6.2.1 ENSAYOS MACROGRÁFICOS**

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de Ciencia de materiales perteneciente a la carrera de Ingeniería Mecánica de la ESPE.

Las probetas de ensayo deberán ser preparadas con la terminación adecuada para el ensayo macrográfico. Deberá usarse una solución adecuada para el ataque a fin de obtener una clara definición de la soldadura.

#### **6.2.1.1 Materiales y equipo**

Para el desarrollo del ensayo fue necesario el uso de los siguientes materiales y equipo:

Materiales

- Disco de polifan de 120 dientes.
- Reactivo Persulfato de Amonio  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$

Equipo:

- Amoladora Bosh GWS 24-180 de 120V
- Cámara fotográfica Sony 10x

#### **6.2.1.2 Procedimiento**

El ensayo de macroataque para uniones soldadas deberá tener tres probetas cortadas en los extremos de la soldadura, de acuerdo con las posiciones mostradas en la Figura 2.12. Una de las caras de cada probeta de macroataque deberá ser pulida para el ataque macrográfico hasta obtener una superficie lisa.

Después del pulido se procede a realizar el ataque químico, con Persulfato de Amonio, recomendado en la norma ASTM E 340 para aceros lisos con bajo contenido de carbono.

Finalmente se realiza la inspección visual a fin de comprobar que aparezcan los catetos en la soldadura y se procede a la toma de fotografías con un aumento de 10x.

## **6.2.2 ENSAYOS MICROGRÁFICOS**

Se realizaron utilizando el equipo ubicado en el laboratorio de Ciencia de Materiales del DECEM en la ESPE.

### **6.2.2.1 Materiales y Equipo**

Los ensayos se realizaron utilizando los siguientes materiales y equipo:

Materiales

- Lijas de 120, 360, 500 y 1000.
- Agua
- Alumina
- Nital al 3% ( 3ml HNO<sub>3</sub>, 100ml de etanol al 95%)

Equipo

- Pulidor de presión BUEHLER DE 350 RPM ECOMET I
- Pulidores manuales BUEHLER HANDIMET
- Microscopio MG OLYMPUS TOKYO de 5x 10x 20x 40x aumentos, con cámara fotográfica acoplada.
- Computador con programa Corel Video Studio Movie

### **6.2.2.2 Procedimiento**

Para la realización del ensayo se siguió el siguiente procedimiento:

1. Pulido manual, para lo que se procede a:
  - verificar fugas en las tomas de agua.
  - verificar estado de los abrasivos y cambiar si amerita el caso.
  - realizar el pulido de la muestra empezando por el de menor grano en el sentido de las bandas.
  - para cambiar a la siguiente banda girar a 90° y lavar.
2. Pulido a presión, donde se realiza el siguiente procedimiento:
  - Verificar el estado y correcto posicionamiento del disco abrasivo.
  - Encender el equipo del botón principal.
  - Colocar alúmina y abrasivo para cada práctica dependiendo el material a ser analizado.

- Colocar la muestra a ser analizada suavemente y realizar giros en forma uniforme hasta obtener una superficie tipo espejo.
  - Apagar el botón principal.
3. Limpieza de la probeta con agua destilada.
  4. Frotar la pieza bajo ensayo con el Nital durante 5 segundos y lavarla con agua destilada.
  5. Posicionar la probeta bajo el microscopio y alternar los lentes de 5x, 10x, 20x y 40x.
  6. Si la imagen revela claramente la distribución de los granos, capturar y almacenar las fotografías de la pieza, caso contrario aplicar nuevamente el Nital durante 2 segundos y repetir el procedimiento.

### 6.3 ENSAYOS CHARPY

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM, de la ESPE.

#### 6.3.1 DATOS DEL EQUIPO

Los datos mostrados en la tabla 6.16 corresponden al equipo utilizado para los ensayos en probetas de material de aporte utilizando los electrodos tubulares E71T-1 y Nicrosol E81T1-Ni 1.

**Tabla 6. 16 Datos del equipo AMSLER para ensayo charpy.**

EQUIPO:	<b>PENDULO DE IMPACTO</b>		
CODIGO:	RM-23	MARCA:	AMSLER
MANUAL:	MRM-23	MODELO:	30 HP 130

<b>CARACTERISTICAS TECNICAS:</b>	
PESO:	600 Kg
CAPACIDAD MAX:	30 kpm

Fuente: Manual del equipo

### 6.3.2 PROCEDIMIENTO

- Colocar el brazo de la altura determinada, que depende del tipo de material.
- Trasladar la masa oscilante a posición de brazo y sujetarla a él.
- Encerar el equipo.
- Colocar el indicador de medida de energía en la parte inferior de la guía.
- Coloque la probeta en los puntos de apoyo del equipo.
- Suelte el dispositivo de agarre de la masa oscilante.
- Lea la energía en kg.m

Precauciones:

- Mantenerse alejado del equipo cuando funcione.
- No posicionarse frente a la masa oscilante.
- Al colocar la probeta, asegurarse que la masa oscilante sea cuidadosamente detenida por otras personas.
- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

### 6.3.3 RESULTADOS

En los ensayos de impacto el equipo entrego los resultados siguientes:

**Tabla 6. 17 Fuerza en probetas con electrodo E81T1-Ni1**

Nro. Probeta	T. ambiente °C		300°C		600°C		900°C	
	Kg m	lbs	Kg m	lbs	Kg m	lbs	Kg m	lbs
1	16,4	36,08	17,8	39,16	19	41,8	14	30,8
2	18,2	40,04	21,2	46,64	18,8	41,36	20,6	45,32
3	18,6	40,92	21,6	47,52	12,8	28,16	15	33

**Tabla 6. 18 Fuerza en probetas con electrodo E71T 1**

Nro. Probeta	T. ambiente °C		300°C		600°C		900°C	
	Kg	lbs	Kg	lbs	Kg	lbs	Kg	lbs
1	13,4	29,48	15	33	11,6	25,52	16,6	36,52
2	13,4	29,48	14,2	31,24	24,8	54,56	13,6	29,92
3	13,4	29,48	14	30,8	13,4	29,48	20,2	44,44

**Tabla 6. 19 Energía absorbida por probetas con electrodo E81T1-Ni1**

Nro. Probeta	T. ambiente °C		300°C		600°C		900°C	
	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs
1	160,88	218,16	174,60	236,76	186,40	252,76	137,30	186,18
2	178,54	242,10	208,00	282,05	184,40	250,05	202,10	274,05
3	182,47	247,42	211,90	287,34	125,60	170,31	147,20	199,60

**Tabla 6. 20 Energía absorbida por probetas con electrodo E71T 1**

Nro. Probeta	T. ambiente °C		300°C		600°C		900°C	
	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs	Joules	ft-lbs
1	131,45	178,25	147,20	199,60	147,20	199,60	162,80	220,76
2	131,45	178,25	139,30	188,89	139,30	188,89	133,40	180,89
3	131,45	178,25	137,30	186,18	137,30	186,18	198,20	268,76

## 6.4 ENSAYOS DE DUREZA

La medición de la dureza en las distintas probetas se realizó en el laboratorio de Mecánica de Materiales.

### 6.4.1 DATOS DEL EQUIPO

Los ensayos de dureza se realizaron en el equipo descrito a continuación:

**Tabla 6. 21 Datos del equipo para ensayo de dureza. “RAMS”**

EQUIPO:	<b>DURÓMETRO ROCKWELL</b>		
CODIGO:	RM-07	MARCA:	RAMS
MANUAL:	MRM-07	MODELO:	10 AR 10

<b>CARACTERISTICAS TECNICAS:</b>	
PESO:	30 Kg
CAPACIDAD MAX:	100B; 100C

Fuente: Manual del equipo

### 6.4.2 PROCEDIMIENTO

- Verificar que el señalador de escala se encuentre en la señal de medir.
- Verificar que el penetrador sea el adecuado.
- Verificar que la manija este esté en la posición de partida.

- Colocar la probeta de prueba y acercar al penetrador.
- Girar dos vueltas y partir de cero.
- Empujar la manija hacía atrás lentamente.
- Regresar la manija a la posición inicial.
- Leer la lectura de la escala escogida.

Precauciones:

- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

### 6.4.3 RESULTADOS

Se obtuvieron las siguientes durezas:

**Tabla 6. 22 Dureza Rockwell HRC para probetas de electrodo E81T1-Ni1**

Nro. Probeta	T. Amb. °C	300°C	600°C	900°C
1	11	14	16	13
2	12	17	18	14
3	15	18	16	16
4	13	17	10	16
5	10	16	15	11
Promedio	12.2	16.4	15	14

**Tabla 6. 23 Dureza Rockwell HRB para probetas con elctrodo E71T 1**

Nro. Probeta	T. Amb. °C	300°C	600°C	900°C
1	92.2	91.1	70.3	89.5
2	94.4	94	64.7	73.1
3	95.2	93.9	65.5	70.6
4	91.5	90.8	70.8	81.3
5	96.4	92.1	67.4	79.5
Promedio	93.94	92.38	67.74	78.80

## **6.5 ENSAYOS DE DOBLEZ**

### **6.5.1 DATOS DEL EQUIPO**

El equipo utilizado se describe en la tabla 6.1 y se utilizó además rodillos de 19mm de radio como guías, así como un punzón con el mismo radio.

### **6.5.2 PROCEDIMIENTO**

- Preparación de la probeta según los requerimientos del equipo.
- Control del nivel de aceite.
- Abrir las válvulas de M2 y cerrar las válvulas M1 para compresión. Estas válvulas se encuentran atrás de la unidad de control.
- Coloque el resorte de acuerdo al ensayo de compresión y la escala en el dinamómetro. Coloque el dial de la escala escogida.
- Conecte a la fuente la alimentación eléctrica.
- Conecte la protección y encienda el equipo.
- Deje pasar 20 minutos de calentamiento.
- Coloque la probeta.
- Proceda al ensayo de acuerdo a los parámetros que se ha establecido y aplique la fuerza hasta que la probeta tenga forma de U. Debe estar abierta la manilla de la derecha y se va cerrando lentamente la manilla de la izquierda.
- Apagar el equipo y desconectar las protecciones eléctricas.

Precauciones:

- La velocidad de ensayo debe ser lenta y continua o de acuerdo a las condiciones.
- Manténgase alejado de las columnas de ensayo.
- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

## **6.6 ENSAYOS DE ROTURA**

### **6.6.1 DATOS DEL EQUIPO**

Fue utilizado el equipo descrito en la tabla 6.1.

## 6.6.2 PROCEDIMIENTO

- Preparación de la probeta según los requerimientos del equipo.
- Control del nivel de aceite.
- Abrir las válvulas de M2 y cerrar las válvulas M1 para compresión. Estas válvulas se encuentran atrás de la unidad de control.
- Coloque el resorte de acuerdo al ensayo de compresión y la escala en el dinamómetro. Coloque el dial de la escala escogida.
- Conecte a la fuente la alimentación eléctrica.
- Conecte la protección y encienda el equipo.
- Deje pasar 20 minutos de calentamiento.
- Coloque la probeta.
- Proceda al ensayo de acuerdo a los parámetros que se ha establecido y aplique la fuerza hasta que la probeta sufra una rotura de tal manera que los perfiles queden alineados el uno con el otro. Debe estar abierta la manilla de la derecha y se va cerrando lentamente la manilla de la izquierda.
- Apagar el equipo y desconectar las protecciones eléctricas.

### Precauciones:

- La velocidad de ensayo debe ser lenta y continua o de acuerdo a las condiciones.
- Manténgase alejado de las columnas de ensayo.
- No sobrepasar el 90% de la capacidad máxima de la escala.

## **CAPITULO 7**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **7.1 ULTRASONIDO**

Las pruebas con el equipo de ultrasonido se realizaron únicamente en las probetas soldadas a tope, como recomiendan las normas AWS D1.1 y D1.5.

(Los resultados obtenidos al realizar éste ensayo pueden ser visualizados detalladamente en la hoja de resultados que se encuentra en el ANEXO A)

#### **7.2 TINTAS PENETRANTES**

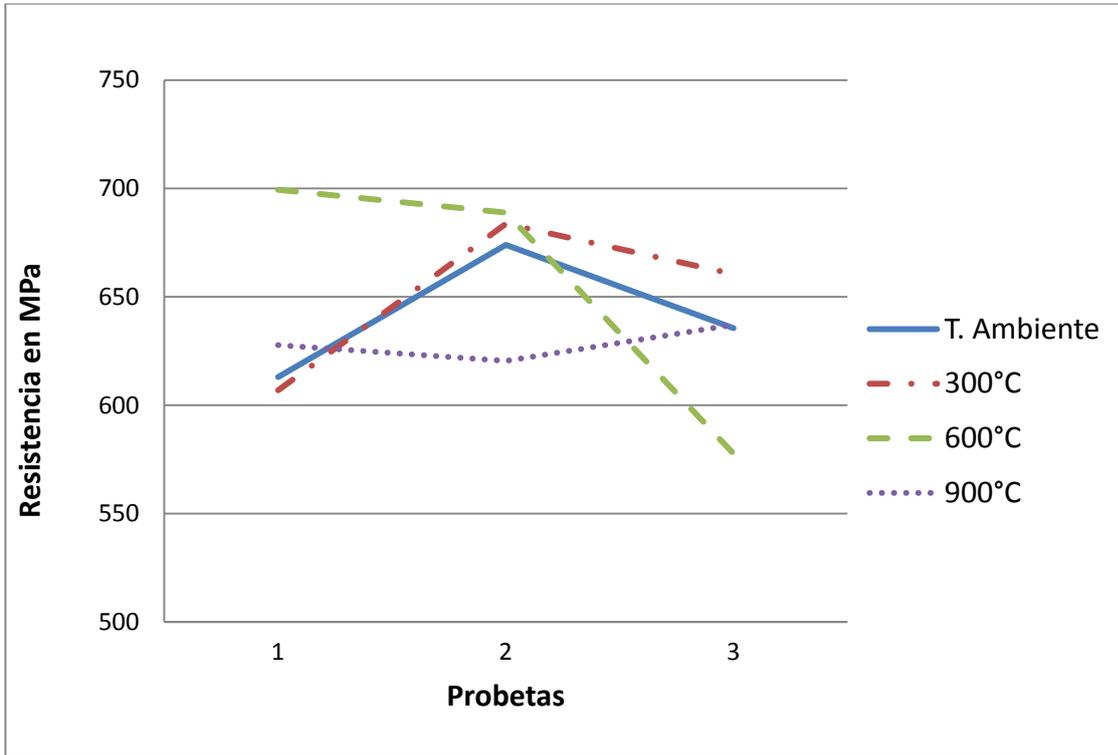
Las normas AWS D1.1 y D1.5 recomiendan que para soldaduras a filete no se utilice equipo de ultrasonido, y en su lugar sean empleadas otras técnicas de END; en nuestro caso se utilizaron los tintas penetrantes.

Al realizar dicho ensayo se pudo observar que las probetas utilizadas, no fueron afectadas por los cambios bruscos de temperatura ya que no se observan defectos superficiales, tales como fisuras o grietas. (Ver detalle en ANEXO B).

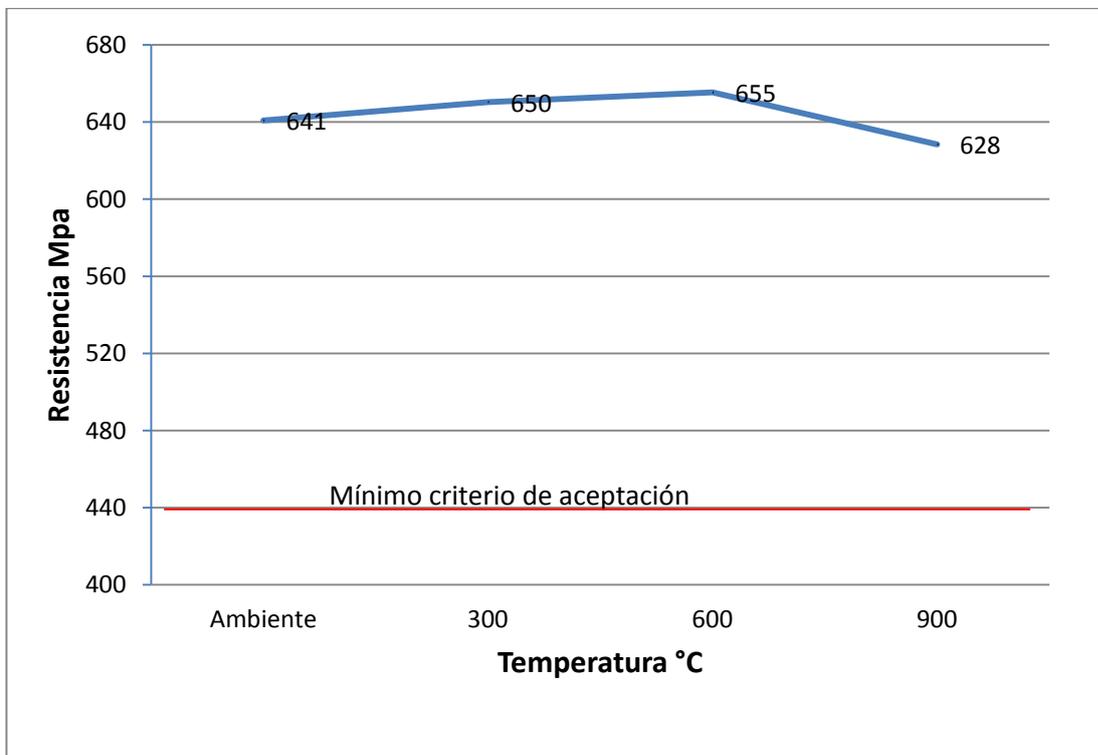
#### **7.3 ENSAYO DE TRACCIÓN**

##### **7.3.1 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1**

En la gráfica 7.1 se muestra la resistencia a la tracción en estas probetas, expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 1 Resistencia a tracción del electrodo E71T-1 en cada probeta a diferentes temperaturas.**



**Gráfica 7. 2 Resistencia media a tracción en electrodo E71T-1 a diferentes temperaturas.**

Las normas AWS D1.1 y D1.5 indican que para que la soldadura sea aceptada, su resistencia a la tracción deberá ser mayor o igual al valor mínimo especificado correspondiente al metal base.

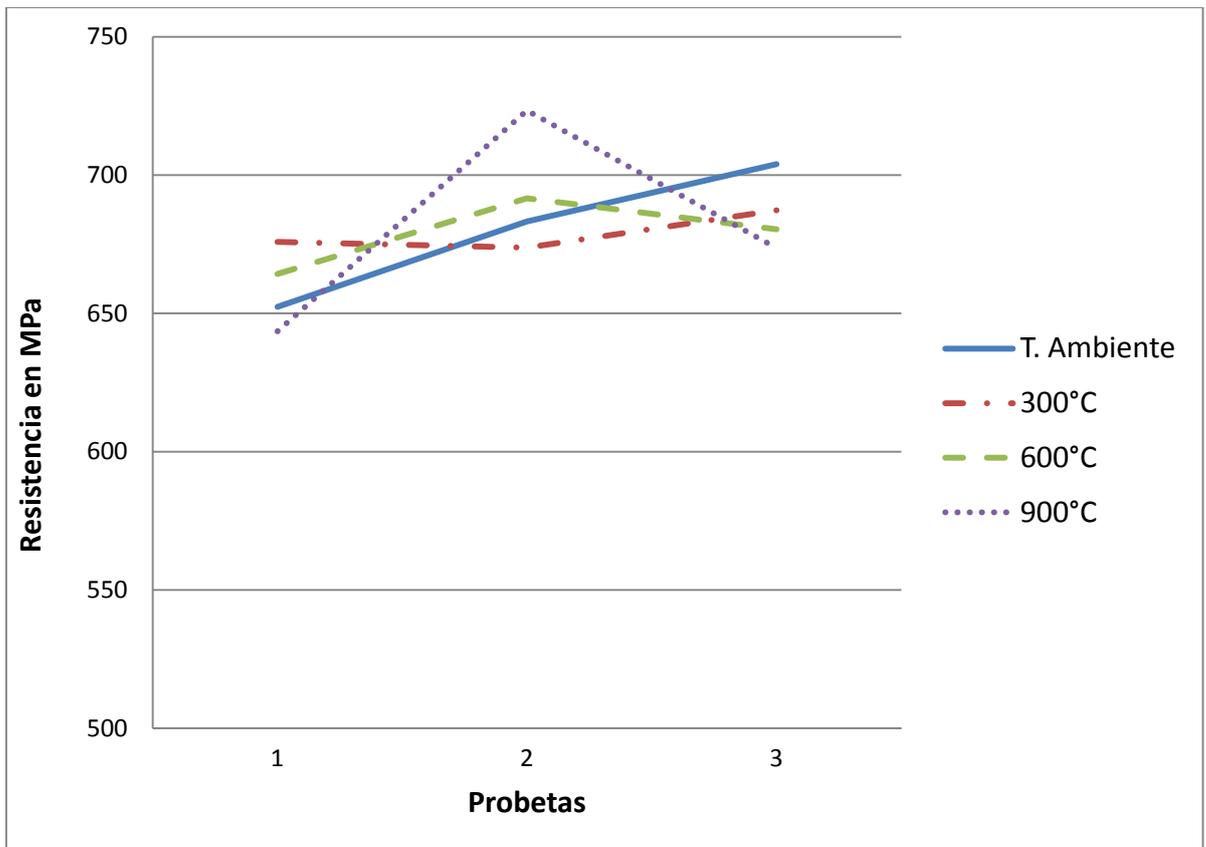
En éste caso el material base es acero ASTM A36, cuya resistencia a la tracción es de 410 MPa; es así que:

- A temperatura ambiente el valor de resistencia se superó en un 56%.
- A 300 °C el valor de resistencia se superó en un 58%.
- A 600 °C el valor de resistencia se superó en un 59%.
- A 900 °C el valor de resistencia se superó en un 53%.

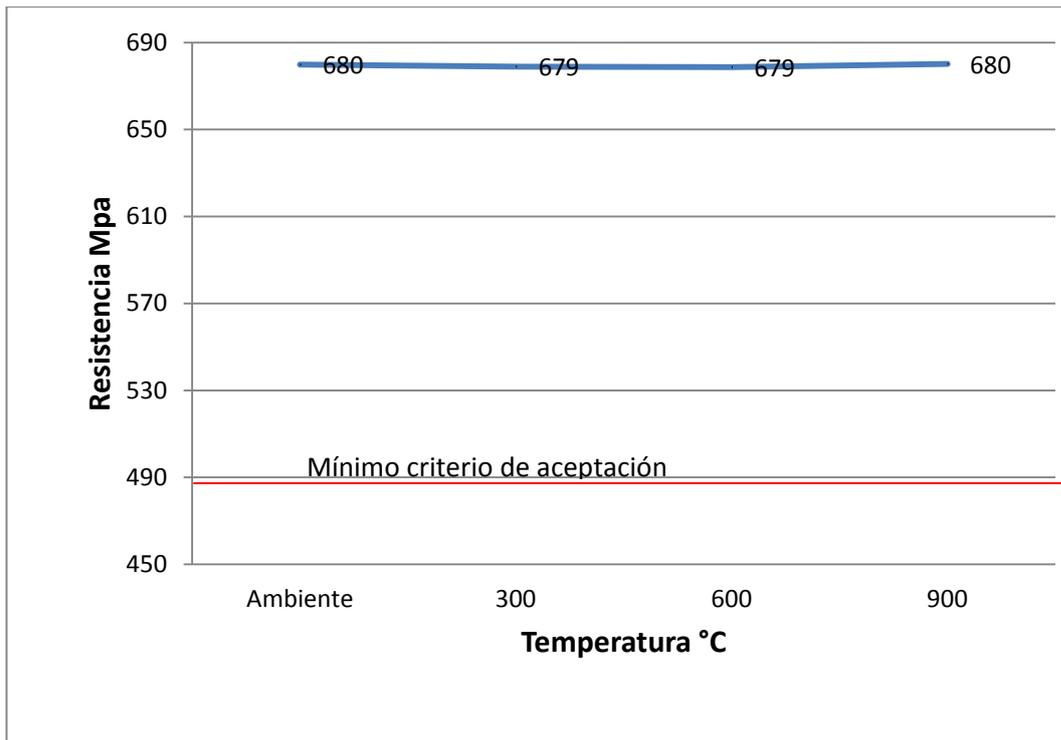
Por lo tanto todas las muestras sometidas al ensayo son aceptadas.

### 7.3.2 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni 1

A continuación en la gráfica 7.3 se muestra la resistencia a la tracción en las probetas expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 3 Resistencia a tracción en electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 4 Resistencia media a tracción en electrodo E81T1-Ni 1 a diferentes temperaturas**

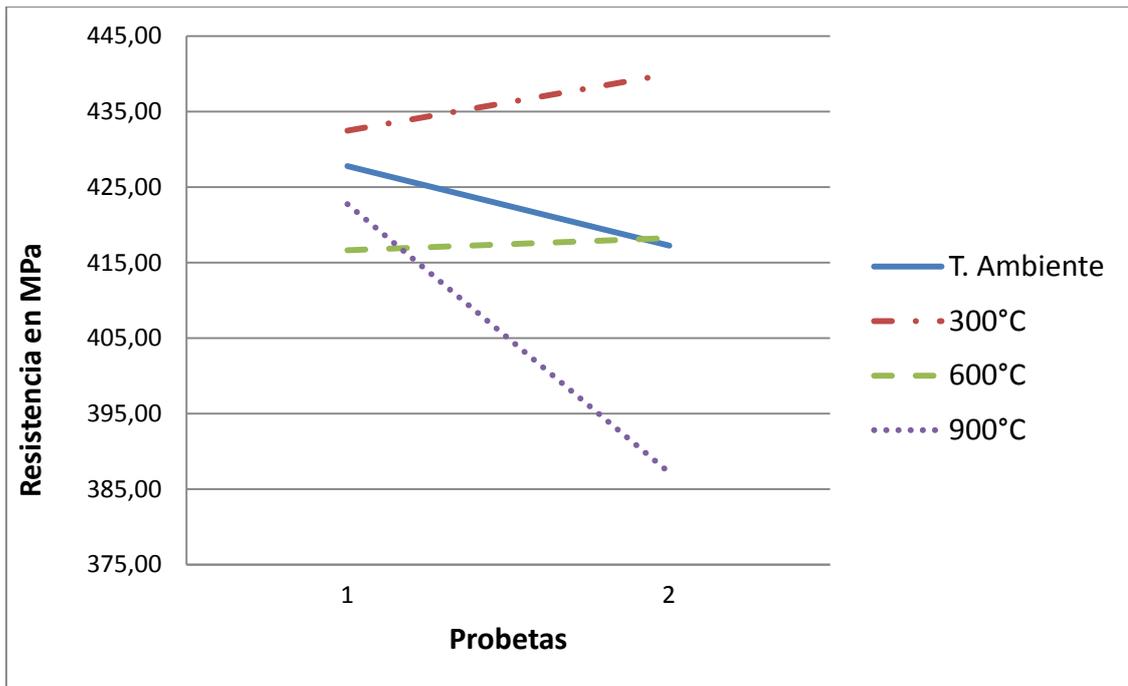
En éste caso el material base es acero ASTM A588, cuya resistencia a la tracción es de 485 MPa; a cada temperatura se obtuvo lo siguiente:

- En todas las temperaturas el valor de resistencia sobrepasó en un 40%.

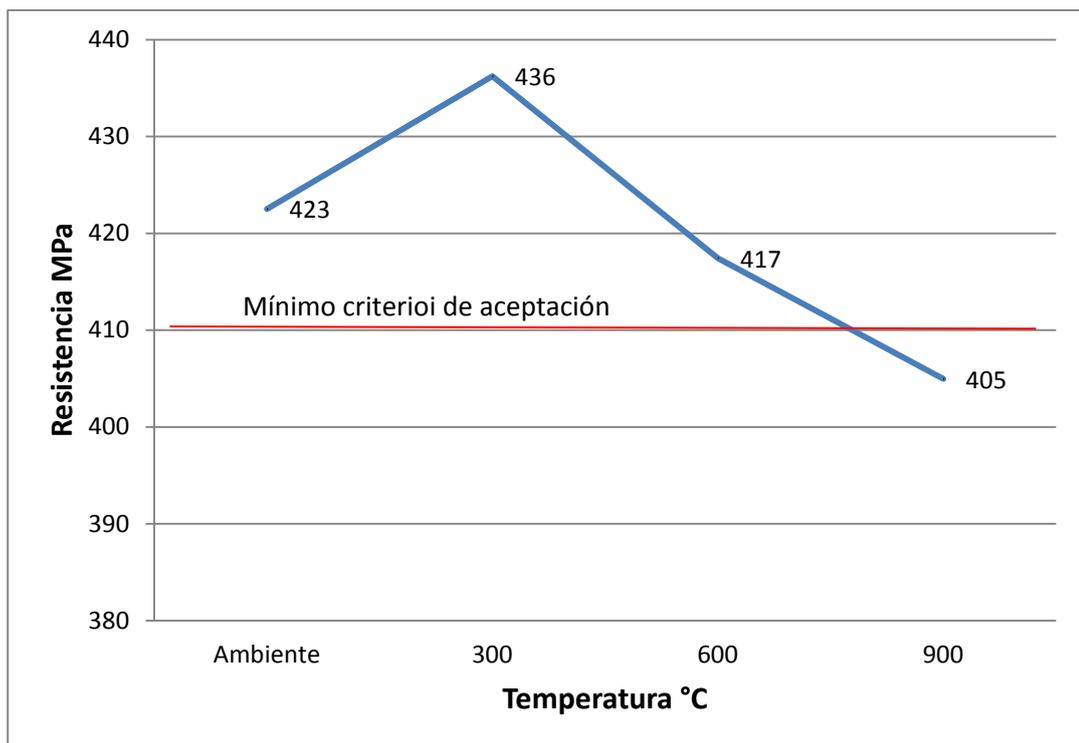
Por lo tanto todas las muestras sometidas al ensayo son aceptadas.

### **7.3.3 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1 Y MATERIAL BASE A36**

La resistencia a la tracción a distintas temperaturas en estas probetas se muestra en la gráfica 7.5.



**Gráfica 7. 5 Resistencia a la tracción en acero A36 y electrodo E71T-1 en junta a tope de cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 6 Resistencia media a la tracción en acero A36 y electrodo E71T-1 en junta a tope a diferentes temperaturas**

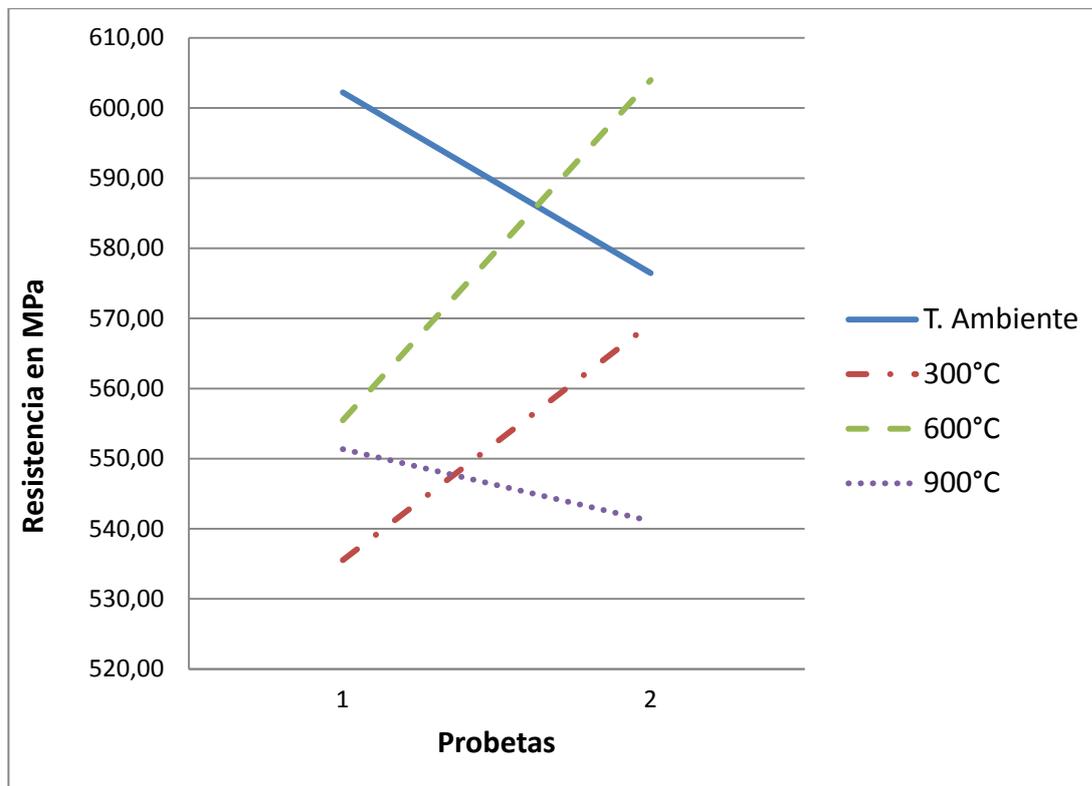
En éste caso el material base es acero ASTM A36, cuya resistencia a la tracción es de 410 MPa; es así que:

- A temperatura ambiente el valor de resistencia se superó en un 3%.
- A 300 °C el valor de resistencia se superó en un 6%.
- A 600 °C el valor de resistencia se superó en un 2%.
- A 900 °C el valor de resistencia es menor en un 1%.

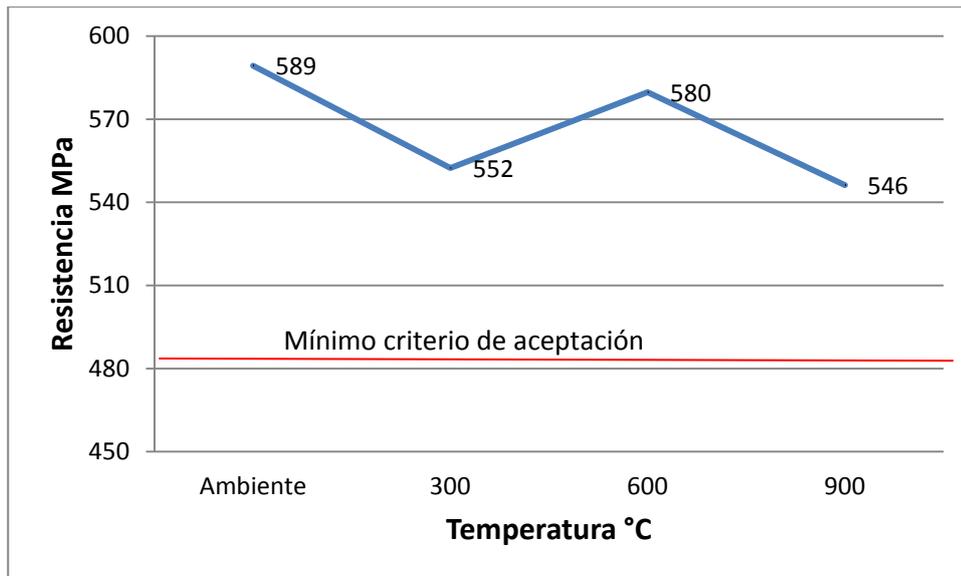
Por lo tanto, el acero resiste hasta 600 °C; sin embargo a 900 °C como indica la gráfica 7.6 la resistencia desciende del valor base por lo que es rechazada.

### 7.3.4 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1 Y MATERIAL BASE A588

En la gráfica 7.7 se muestra la resistencia a la tracción en las probetas, expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 7 Resistencia a la tracción en junta a tope de acero A588 y electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 8 Resistencia media a la tracción en acero A588 y electrodo E81T1-Ni1 a diferentes temperaturas en junta a tope**

En éste caso el material base se comportó de la siguiente manera:

- A temperatura ambiente el valor de resistencia se superó en un 21%.
- A 300 °C el valor de resistencia se superó en un 14%.
- A 600 °C el valor de resistencia se superó en un 19%.
- A 900 °C el valor de resistencia se superó en un 13%.

Como indica la figura 7.8, la resistencia a la tracción en estas probetas es mayor a la del material base, que en este caso es el acero ASTM A588, cuya resistencia a la tracción es de 485 MPa; por lo tanto todas las muestras sometidas al ensayo son aceptadas.

## 7.4 ENSAYOS METALGRÁFICOS

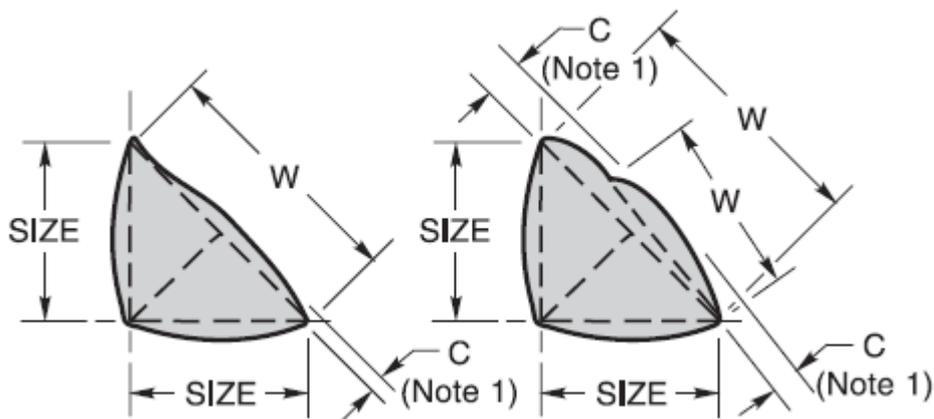
### 7.4.1 ENSAYOS MACROGRÁFICOS

Luego de realizar éste ensayo no hubo presencia de defectos relacionados con el cambio brusco de temperaturas en el cordón de soldadura ni en el metal base adyacente. (Ver ANEXO D).

Además, se observa que la soldadura se ha realizado correctamente, de acuerdo a la norma AWS D1.1, donde se limita el tamaño de sobremonta máximo permisible, especificado en la tabla 7.1.

**Tabla 7. 1 Criterio de aceptación en ensayos macrográficos**

WIDTH OF WELD FACE OR INDIVIDUAL SURFACE BEAD, W	MAX CONVEXITY, C
$W \leq 5/16$ in. [8 mm]	1/16 in. [2 mm]
$W > 5/16$ in. [8 mm] TO $W < 1$ in. [25 mm]	1/8 in. [3 mm]
$W \geq 1$ in. [25 mm]	3/16 in. [5 mm]



Fuente: Norma AWS D1.1 2004, Anexo F, pag. 279

Las soldaduras realizadas presentan un tamaño de  $W=8\text{mm}$  a  $W=25\text{mm}$ , que según la norma, el tamaño de  $C$  permisible es de hasta  $3\text{mm}$ ; las juntas utilizadas para los ensayos presentan un promedio de  $C=1.5\text{mm}$ , por lo que son aceptadas para ser utilizadas.

## 7.4.2 ENSAYOS MICROGRÁFICOS

### Electrodo E81T1-Ni 1

En el tamaño de grano se observa una variación a las distintas temperaturas; es así que:

- A  $300^\circ\text{C}$  se encuentra una microestructura más unida entre sí, debido a la velocidad de enfriamiento empleada, lo que provocó un aumento en la tensión, y representa mayor dureza del acero.
- A  $600^\circ\text{C}$  la variación es mínima con respecto a la de temperatura ambiente, ya que a ésta temperatura la velocidad de enfriamiento puede ser rápida

para llegar a un temple, porque la austenita es menos estable, y es donde se forma la mezcla de ferrita y cementita, es decir su dureza aumenta de manera casi insignificante.

- Finalmente a 900°C se observa mayor unión de granos que a temperatura ambiente, pero menor que a 600°C; a ésta temperatura el acero se encuentra en una fase de cambio de ferrita a austenita, que según la velocidad de enfriamiento permite la precipitación de una o de otra. En nuestro caso la probeta presenta una dureza algo mayor a la de temperatura ambiente, es así que se nota una precipitación de austenita en una matriz de ferrita. (Ver detalles en ANEXO E).

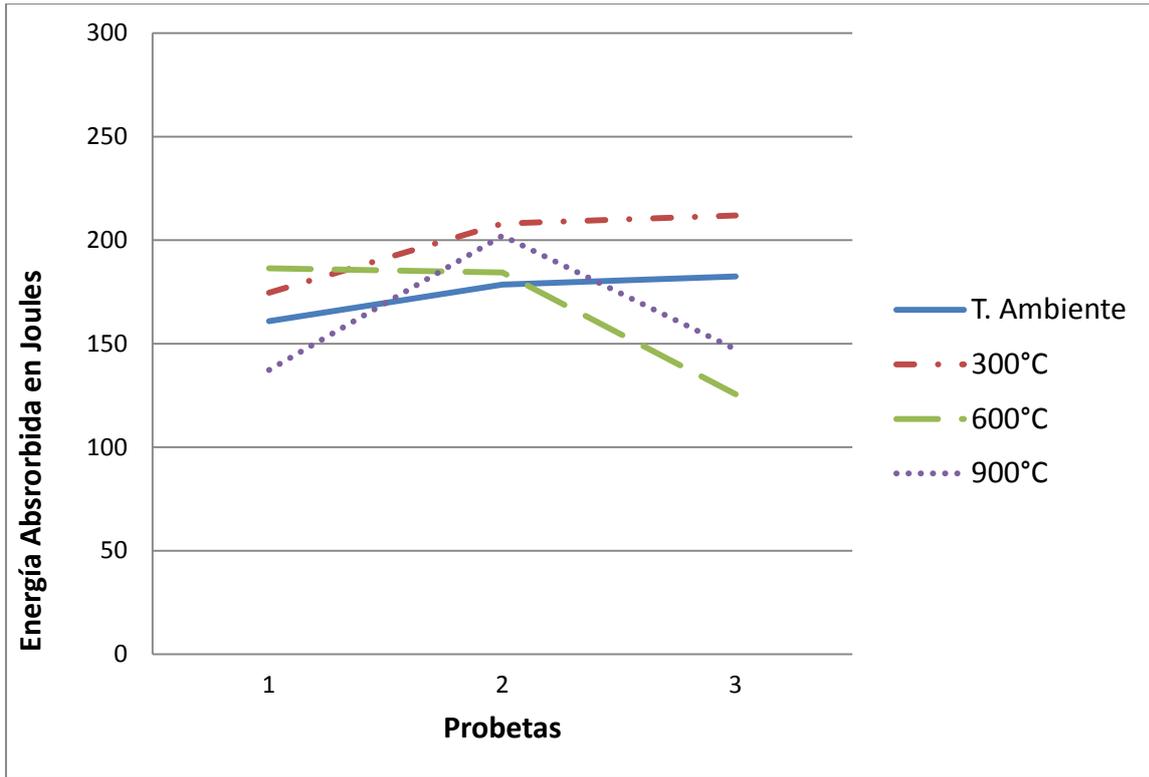
### **Electrodo E71T 1**

- A 300°C se observa un tamaño de grano similar al de temperatura ambiente, pero con un aumento de perlita, lo que representa una dureza similar entre las dos.
- A 600°C existe mayor cantidad de perlita en la microestructura, pero una separación considerable de granos, que a diferencia con el electrodo E81T1-Ni 1, carece de la presencia de níquel que aumenta la tenacidad en el material, lo que representa una menor resistencia a cargas de tensión; generando una disminución en la dureza.
- A 900°C los granos vuelven a acercarse ligeramente provocando un pequeño aumento en la dureza, ésta variación se presenta debido a la fase de cambio de ferrita a austenita, presente en el acero a ésta temperatura. (Ver ANEXO E).

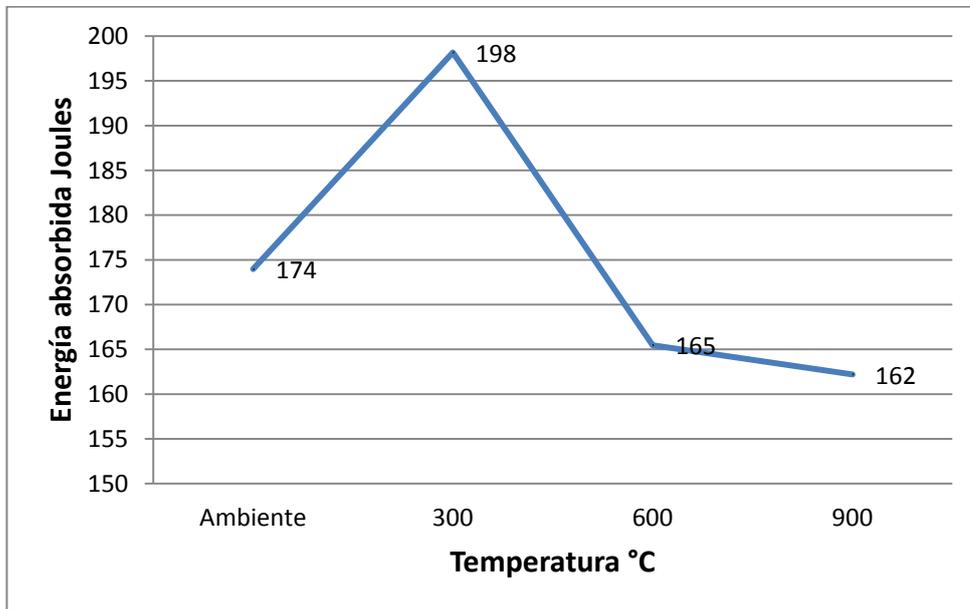
## **7.5 ENSAYOS CHARPY**

### **7.5.1 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1**

En la gráfica 7.9 se muestra la energía absorbida en las probetas, expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 9 Energía absorbida por el electrodo E81T1-Ni 1 en cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 10 Energía media absorbida por el electrodo E81T1-Ni 1 a diferentes temperaturas**

Las normas AWS D1.1 y D1.5 indican que el cordón de soldadura debe tener un promedio mínimo de energía absorbida de 27 Joules, así como también un promedio mínimo de energía absorbida individual de 20 Joules.

A continuación se detallan los promedios de la energía absorbida a las distintas temperaturas:

- A Temperatura ambiente un promedio de 173,96 Joules
- A 300°C un promedio de 198,17 Joules
- A 600°C un promedio de 165,47 Joules
- A 900°C un promedio de 162,20 Joules

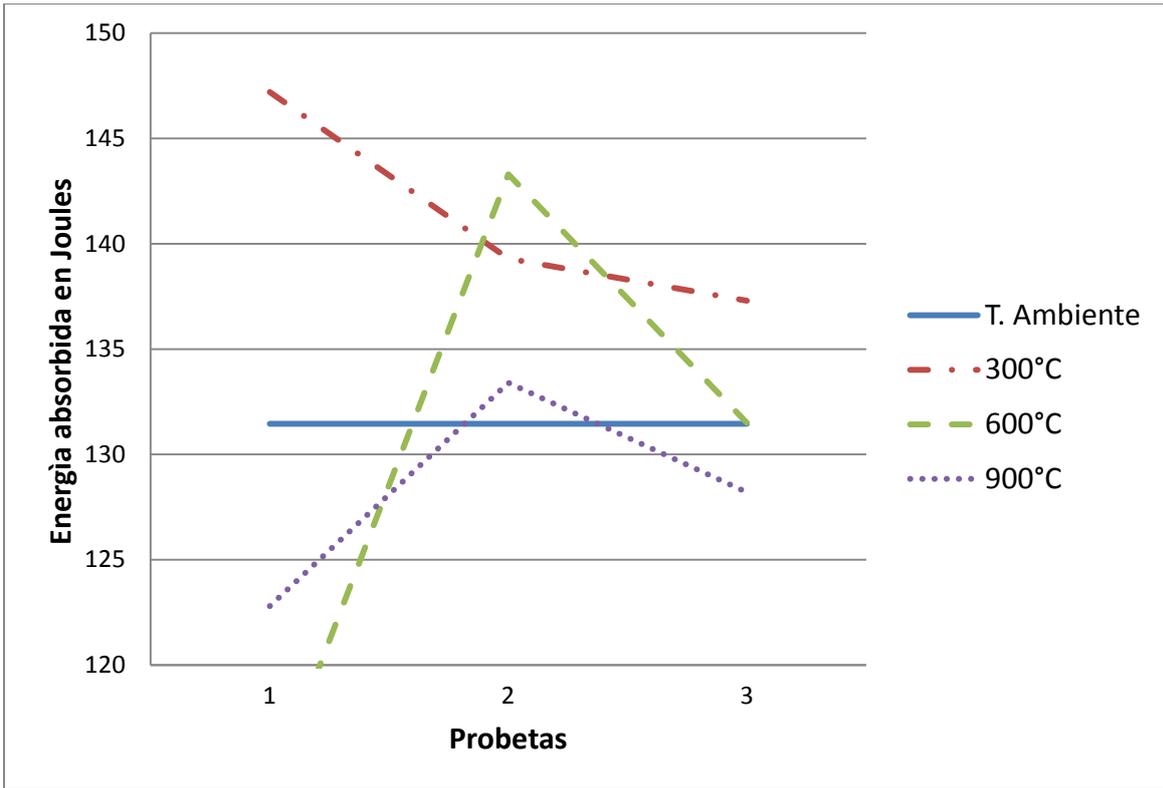
En todas las temperaturas el promedio de energía absorbida es muy superior al mínimo requerido por la norma.

De igual manera en los ensayos realizados el valor mínimo individual obtenido se dio a 600°C y fue de 125,6 Joules, es decir que todos los valores individuales son superiores al valor mínimo individual descrito en la norma AWS D1.1.

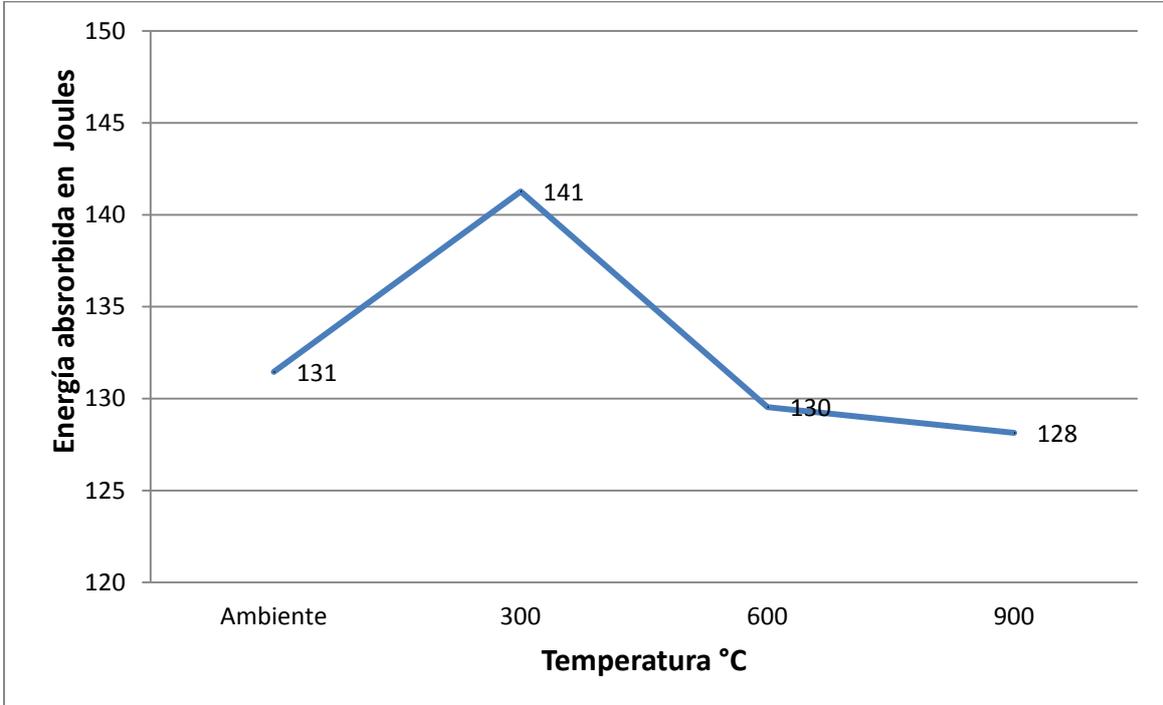
En la gráfica 7.10 se puede observar que la energía que puede ser absorbida por la soldadura aumenta a 300°C, mientras que disminuye en 600°C y 900°C; pero la variación no desciende hasta un nivel inaceptable por lo que (dependiendo del criterio del ingeniero) la soldadura será aceptada.

### **7.5.2 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1**

A continuación en la gráfica 7.11 se muestra los valores de resiliencia obtenidos en el ensayo de las probetas, expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 11 Energía absorbida por el electrodo E71T 1 en cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 12 Energía media absorbida por el electrodo E71T 1 a diferentes temperaturas**

Los promedios de la energía absorbida a las distintas temperaturas:

- A Temperatura ambiente un promedio de 131,45 Joules
- A 300°C un promedio de 141,27 Joules
- A 600°C un promedio de 129,53 Joules
- A 900°C un promedio de 128,13 Joules

Todos los valores promedio de energía absorbida son superiores al mínimo requerido por la norma AWS D1.1 de 27 Joules.

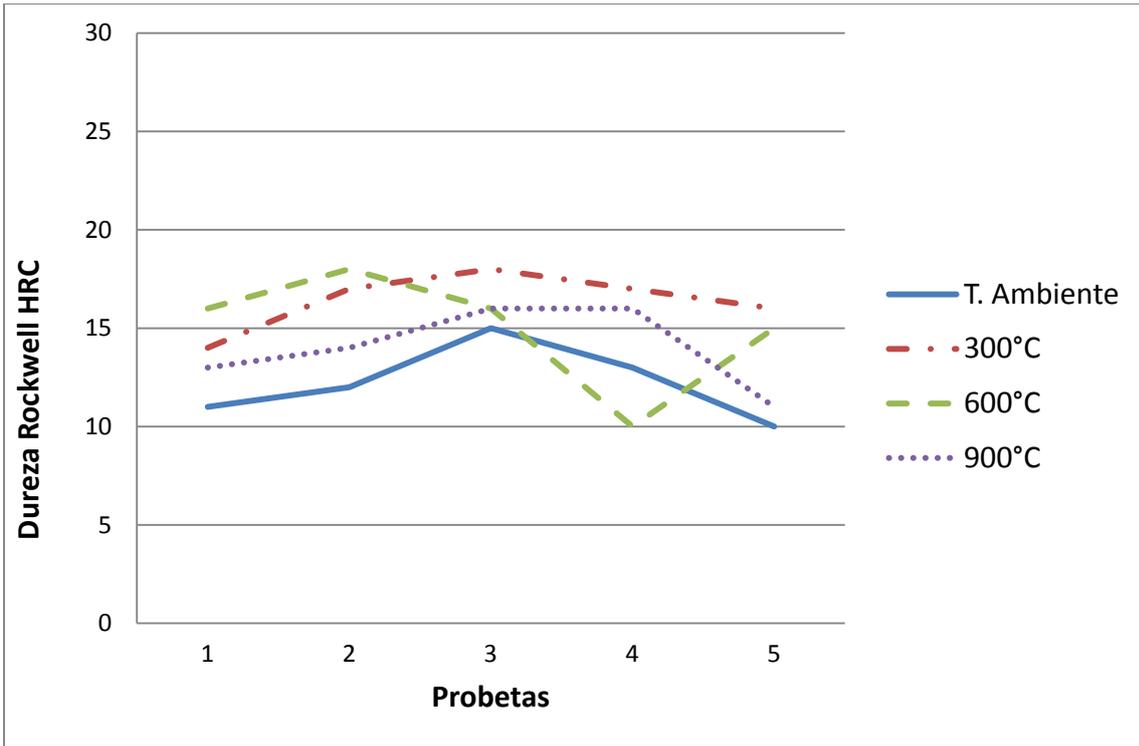
En los ensayos realizados el valor mínimo individual obtenido se dio a 600°C y fue de 113,8 Joules, por lo tanto todos los valores individuales son superiores al valor mínimo individual descrito en la norma.

En la gráfica 7.12 observa que la resiliencia aumenta a 300°C, y disminuye en 600°C y 900°C; y así mismo la variación no desciende hasta un nivel inadmisibles por lo que (dependiendo del criterio del ingeniero) la soldadura será aceptada.

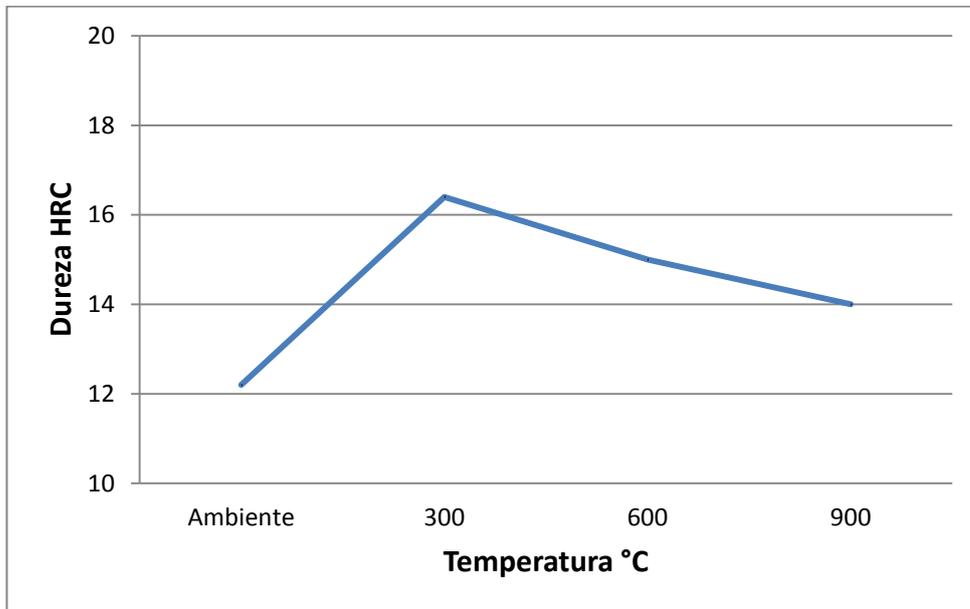
## **7.6 ENSAYOS DE DUREZA**

### **7.6.1 PROBETAS CON ELECTRODO E81T1-Ni1**

A continuación en la gráfica 7.13 se muestra la dureza Rockwell HRC en las probetas expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 13 Dureza Rockwell HRC en electrodo E81T1 - Ni1 en cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 14 Dureza Rockwell HRC en electrodo E81T1 - Ni1 a diferentes temperaturas**

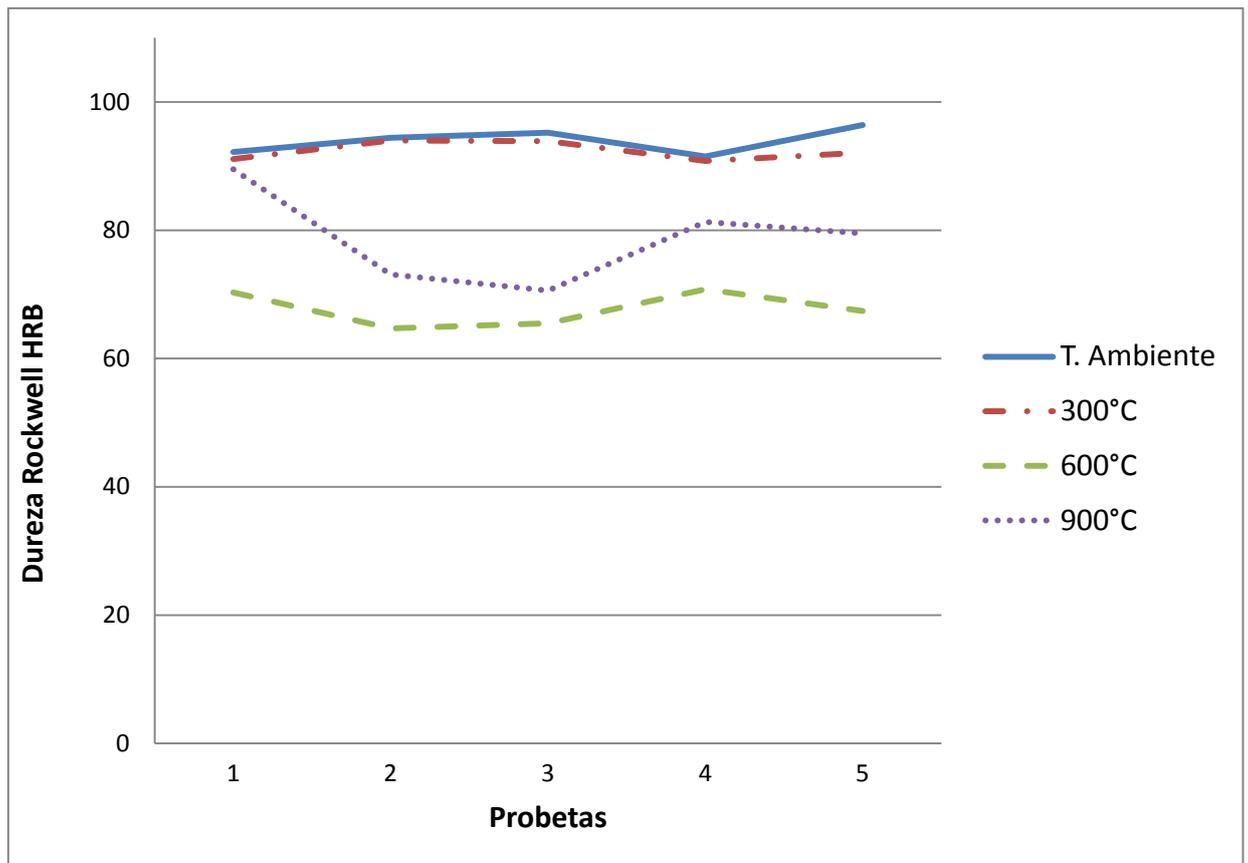
Los promedios de dureza Rockwell HRC a las distintas temperaturas son:

- A Temperatura ambiente un promedio de 12.2
- A 300°C un promedio de 16.4
- A 600°C un promedio de 15
- A 900°C un promedio de 14

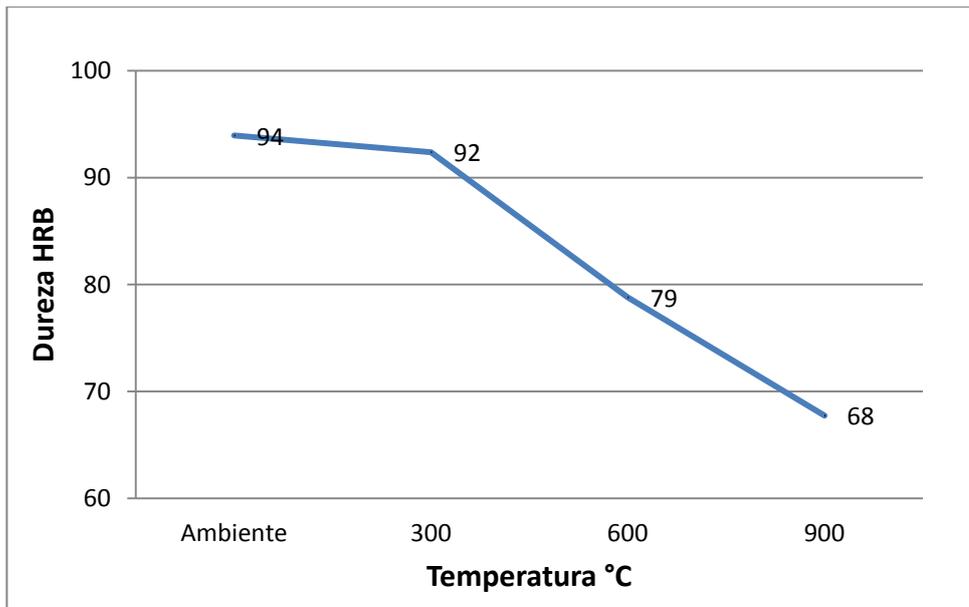
Como se observa, la dureza aumenta desde la T. Ambiente hasta los 300°C, mientras que al aumentar la temperatura los valores de los promedios de dureza disminuyen, con lo que se puede concluir que el cambio brusco de temperatura influye en la dureza de la soldadura.

### 7.6.2 PROBETAS CON ELECTRODO E71T-1

En la gráfica 7.15 se muestra la energía absorbida en las probetas, expuestas a distintas temperaturas.



**Gráfica 7. 15 Dureza Rockwell HRB en electrodo E71T 1 en cada probeta a diferentes temperaturas**



**Gráfica 7. 16 Promedio de dureza Rockwell HRB en electrodo E71T 1 a diferentes temperaturas**

A continuación se detallan los promedios de dureza Rockwell HRB a las distintas temperaturas:

- A Temperatura ambiente un promedio de 93.94
- A 300°C un promedio de 92.38
- A 600°C un promedio de 78.80
- A 900°C un promedio de 67.74

De la misma forma los valores de los promedios de dureza disminuyen a medida que la temperatura a las que han sido expuestas las probetas aumenta, con lo que se puede concluir que el cambio brusco de temperatura influye en la dureza también con éste electrodo.

## 7.7 ENSAYOS DE DOBLEZ

Se realizaron cuatro ensayos de doblez por cada temperatura, dos de cara y dos de raíz, como especifica la norma.

Las normas AWS D1.1 y D1.5 indican que al examinar visualmente la superficie convexa del espécimen de muestra para ensayo de doblado, en cuanto a discontinuidades superficiales, para su aceptación, la superficie no deberá contener discontinuidades que excedan las siguientes dimensiones:

(1) 1/8 pulgada [3 mm] medida en cualquier dirección sobre la superficie.

(2) 3/8 pulgada [10 mm] - la suma de las dimensiones mayores de todas las discontinuidades que excedan 1/32 pulgadas [1 mm], pero, menores que o iguales a 1/8 pulgada [3mm].

(3) 1/4 pulgada [6 mm] – el máximo agrietamiento de esquina, excepto cuando éste fuera el resultado de la acumulación visible de escoria o de otro tipo de discontinuidad de fusión; entonces deberá aplicarse el máximo de 1/8 pulgada [3 mm].

Los especímenes con agrietamiento de esquina que excedan 1/4 pulgada [6 mm] que no presenten evidencias de acumulación de escoria u otros tipos de discontinuidades de fusión deberán descartarse, y deberá someterse a prueba un espécimen de reemplazo para ensayo de la soldadura original.<sup>28</sup>

### **Acero ASTM A36**

Se pudo observar que después de doblar las probetas no aparecieron agrietamientos o discontinuidades de ningún tipo, por lo que las mismas son aceptadas. (Ver ANEXO F.1)

### **Acero ASTM A588**

Al realizar el ensayo de doblez se produjo lo siguiente:

- Rotura en una probeta de 300°C en la unión de material base con material de aporte, esto no ocurrió por el cambio brusco de temperatura ya que no se visualiza una cristalización, esta falla se produjo en el proceso de soldadura. (Ver ANEXO F.2)
- A 600°C la unión soldada resistió correctamente las pruebas
- Finalmente a 900°C en una muestra de doblado de raíz, se originó una fisura superficial en el cordón de soldadura, producido por el cambio brusco de temperatura en una junta que posiblemente presenta algún tipo de discontinuidad. (Ver ANEXO F.3).

## **7.8 ENSAYOS DE ROTURA**

Se estipula en la normas AWS D1.1 y D1.5 que para aprobar el examen visual previo a la prueba de interrupción, la soldadura deberá presentar una

---

<sup>28</sup> Norma AWS D1.1 2010 página 136

aparición razonablemente uniforme y deberá estar libre de traslapamiento, grietas y socavamiento excesivo. No deberá haber porosidad visible en la superficie de la soldadura.

El espécimen quebrado deberá aprobarse si:

- (1) El espécimen se dobla sobre sí mismo, o
- (2) La soldadura de filete, si está fracturada, tiene una fractura de superficie que muestra la fusión completa de la raíz de la unión sin ninguna inclusión o porosidad mayor que 3/32 pulgadas [2.5 mm] en su dimensión mayor, y,
- (3) La suma de las dimensiones mayores de todas las inclusiones y porosidad no deberá exceder 3/8 pulgadas [10 mm] en el espécimen de 6 pulgadas de largo.<sup>29</sup>

Dicho esto, se pudo observar que las probetas se quebraron sobre sí mismas y que tienen una fusión completa en la soldadura, por lo que pasaron el ensayo. (Ver ANEXO G).

---

<sup>29</sup> Norma AWS D1.1 2010 página 147

## CAPITULO 8

### ANALISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO DEL PROYECTO

#### 8.1 ANALISIS ECONÓMICO

##### 8.1.1 COSTOS DIRECTOS

Tabla 8. 1 Materiales

N°	Cant.	Unidad	Descripción	Precio Unit. USD	Costo Total USD
1	1	Plancha 4000x1200x10 mm	Acero ASTM A36	120	120.00
2	1	Plancha 4200x1200x10 mm	Acero ASTM A588	180	180.00
3	1	Rollo alambre tubular 20 kg. $\phi$ 1.2mm	Electrodo E71T 1	60	60.00
4	1	Rollo alambre tubular 15 kg. $\phi$ 1.2 mm	Electrodo E81T1-Ni1	80	80.00
5	8	Unidades	Lijas	0.30	2.40
6	1	Unidad	Disco Polifan de 120 dientes	5	5.00
7	1	Unidad	Tanque de gas	2.50	2.50
				<b>TOTAL</b>	<b>449.90</b>

Fuente: Propia

**Tabla 8. 2 Mano de Obra**

<b>Ord.</b>	<b>Mano de Obra</b>	<b>Cant.</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario USD</b>	<b>Costo Total USD</b>
1	Equipo y mano de obra de soldadura a tope	8	placas	15	120.00
2	Equipo y mano de obra de soldadura de filete	8	placas	12	96.00
3	*Equipo Ultrasonido	1	día	800	800.00
4	**Ensayos de tracción	40	probeta	4	160.00
5	**Ensayos de dobléz	32	probeta	4	128.00
6	**Ensayos de rotura	8	probeta	4	32.00
7	*Banco de ensayos metalográficos	20	probeta	10	200.00
8	**Ensayos Charpy	24	probeta	5	120.00
9	**Ensayos de dureza	8	probeta	10	80.00
10	*Tintas Penetrantes	8	probeta	10	80.00
11	Elaboración de probetas	140	probetas	3	420.00
				<b>TOTAL</b>	<b>2236.00</b>

Fuente: Propia

\*Estos trabajos fueron realizados en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales del DECEM, y los valores fueron consultados en el propio laboratorio.

\*\*Estos trabajos fueron realizados en el Laboratorio de Mecánica de Materiales del DECEM, y los valores fueron consultados en el propio laboratorio.

**Tabla 8. 3 Otros Costos Directos**

<b>Descripción</b>	<b>Valor Total</b>
<b>Transporte</b>	100
<b>Internet</b>	20
<b>TOTAL</b>	<b>120</b>

Fuente: Propia

## 8.1.2 COSTOS INDIRECTOS

**Tabla 8. 4 Insumos de Oficina**

<b>N°</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Descripción</b>	<b>Precio Unitario USD</b>	<b>Costo Total USD</b>
1	2	Cartuchos de impresora	50	100
2	4	Impresión Plotter	1.5	6
3	5	Resma papel	3	15
4	1	Libros	50	50
5	2500	Copias	0.02	50
			<b>Total</b>	<b>221</b>

Fuente: Propia

**Tabla 8. 5 Costo Total**

Total Costos Indirectos	221
Total Costos Directos	2805.90
<b>Subtotal (USD)</b>	<b>3026.90</b>
Imprevistos 10%	302.69
<b>TOTAL GENERAL (USD)</b>	<b>3329.59</b>

Fuente: Propia

## 8.2 FINANCIAMIENTO

**Tabla 8. 6 Financiamiento**

N°	Detalle	Costo USD	Financiamiento
2	Materiales, suministros	670.90	Estudiantes
3	Equipamiento, instalaciones y construcción	636.00	Estudiantes
4	Gastos de Ejecución	120.00	Estudiantes
5	Imprevistos	200	Estudiantes

**TOTAL GENERAL:** 1626,9 Dólares Americanos.

Fuente: Propia

**Tabla 8. 7 Análisis del TIR (Tasa Interna de Retorno) y VAN (Valor Actual Neto)**

Detalles	Costos (\$)
Equipo EPOCH 1000 i	23818
Utilización del equipo/ 1día	800

PERÍODOS	Nro. De Ensayos	Valor Unitario (\$)	Valor Total (\$)	TIR
Año 0	0	-23818	-23818	
Año 1	5	800	4000	
Año 2	10	800	8000	-33%
Año 3	17	800	13600	3%
Año 4	24	800	19200	18%
			<b>VAN</b>	\$9,761.67

Como se puede observar, considerando un bajo uso del equipo en los primeros 2 años, se consigue recuperar la inversión y obtener ganancias al tercero, mientras que al usarlo aproximadamente 2 días cada mes, se obtiene una ganancia del 18% del costo del equipo y un valor actual neto bastante positivo en los primeros cuatro años, por lo que se considera una inversión muy rentable.

## CAPITULO 9

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 9.1 CONCLUSIONES

1. En incendios cuyas temperaturas lleguen hasta 600°C y el tiempo de exposición a fuego directo del acero estructural no sea mayor a 15 minutos, las propiedades mecánicas varían hasta en un 2% sobre el mínimo permitido si se enfrían bruscamente con agua; siempre y cuando el procedimiento de soldadura está de acuerdo a la norma AWS D1.1 o D1.5.

2. Para llegar a un temple, la velocidad de enfriamiento ideal es superior a la crítica hasta temperaturas inferiores a las de transformación de la perlita (alrededor de 550 °C). De esta forma se evitará la transformación de la austenita en los constituyentes más blandos y se conseguirá que se transforme con uniformidad en martensita, sin peligro a que se formen grietas y deformaciones en aceros aleados.

3. El enfriamiento rápido de aleaciones con Níquel y Manganeso, es el principal formador de martensita derivada de la austenita, que aumenta la tenacidad, resistencia al impacto, tiene alta templabilidad, además que mejora la resistencia a la corrosión, como se pudo observar en el acero A588 y en el electrodo E81T1-Ni 1 después de realizar los ensayos correspondientes.

4. La martensita es el constituyente típico de los aceros templados y se obtiene de forma casi instantánea al enfriar rápidamente la austenita (Acero a 900°C). Es una solución sobresaturada de carbono en hierro alfa. Tras la cementita o carburo de hierro (y los carburos de otros metales) es el constituyente más duro de los aceros. En aceros de bajo contenido de carbono como el A36, se dificulta la formación de martensita, derivando en una baja templabilidad.

5. Se ha desarrollado un procedimiento de END para ultrasonido convencional y phased array, basado en las Normas AWS D1.1 y AWS D1.5 para la

inspección de soldaduras en acero, cuya aplicación es la detección y dimensionamiento de defectos en soldaduras, pudiéndose comprobar que las discontinuidades encontradas están dentro de lo admisible en las probetas examinadas.

6. El sistema de inspección de ultrasonido ha funcionado de acuerdo con los requisitos especificados. Las variables esenciales de los componentes examinados estaban dentro de los rangos definidos en la norma AWS D1.1 y la inspección se ha desarrollado de acuerdo con lo esperado.

7. En los aceros A36 y A588 que soportaron temperaturas elevadas, el estar expuestos al medio ambiente se provocó una oxidación de una manera acelerada en los mismos, por lo que se debe tomar en cuenta si se va a reutilizar la misma estructura.

## **9.2 RECOMENDACIONES**

1. El tiempo de sofocación del incendio es crítico para la formación de austenita; en este caso después de llegar a 900°C se mantuvo la temperatura durante 15 minutos sin producir cambios importantes, por lo que se recomienda tomar esto en consideración para la evaluación de una estructura que ha sufrido el siniestro.

2. Se recomienda prestar servicios de ENDs utilizando el equipo de ultrasonido a fin de generar ingresos para la carrera.

3. El equipo de ultrasonido puede ser usado con fines didácticos, para profundizar en el análisis de materiales que presenten discontinuidades internas.

4. Para tener un mejor control sobre tiempos y temperaturas se podría realizar las pruebas en un horno, ya que a más de disminuir el tiempo para llegar a las temperaturas deseadas, se puede conseguir un calentamiento más uniforme en las probetas.

5. El uso de material que contenga níquel ayuda a evitar la corrosión especialmente en estructuras que estén a la intemperie además ayuda a soportar un cambio brusco de temperaturas, aunque el costo aumenta en \$80 aproximadamente por plancha soldada.

# ANEXOS

## ANEXO A: Ensayo de Ultrasonido

	ORDEN DE TRABAJO: TA36-001		<b>CIME</b>
	CLIENTE : Laboratorio de Metalurgia		
	PROYECTO : Tesis de grado		
	LOCACION: ESPE	FECHA : 2011/06/08	

### REPORTE DE INSPECCION CON ULTRASONIDO

#### 1. EQUIPO EMPLEADO

EQUIPO : EPOCH 1000i	Fecha de Calibración : 2011/06/08	
TRANSDUCTOR: SA10-N55S	Elementos : 8	Frecuencia : 2,25 MHz

#### 2. PARAMETROS DE INSPECCION

Tipo de Inspección: Barrido continuo	Método de Calibración: Sensibilidad ydist.	Procedimiento: TPU01
Bloque de Calibración: IIW	Ajuste de Sensibilidad: 80%	Norma Aplicable: AWS D1.1
Condición Superficial: Liza	Acoplante: CMC	

DESCRIPCIÓN <sup>3.</sup> Inspección de soldadura en  
: placas de  
Acero A36 a distintas temperaturas

#### 4. ESQUEMA :



5. CARACTERÍSTICAS GENERALES					
<b>SOLDADURA :</b>					
<b>Tipo de Unión :</b>	A tope	<b>Proceso de Soldadura :</b>	FCAW	<b>Espesor de Placa:</b>	12 mm
<b>Tipo de Soldadura:</b>	En T	<b>Posición de Soldadura :</b>	Plana		

<b>6. RESULTADOS OBTENIDOS:</b> Soldaduras inspeccionadas libres de defectos	<b>7.OBSERVACIONES:</b>  Detalle en el ANEXO A.1 _____ _____
---	--

INSPECCIONADO POR:		EVALUADO POR:		APROBADO POR:	
<b>Nombre:</b> Fernando Carvajal		<b>Nombre:</b> Ing. Marco Eucancela		<b>Nombre :</b>	
Juan Romero		ASNT SNT-TC-1A <b>Nivel :</b> Nivel II		<b>Cargo:</b>	
<b>Fecha :</b> 2011/06/08	<b>Firma :</b>	<b>Fecha:</b> 2011-06-08	<b>Firma :</b>	<b>Fecha:</b>	<b>Firma :</b>



ORDEN DE TRABAJO: TA36-001

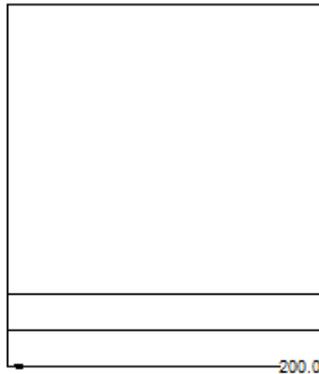
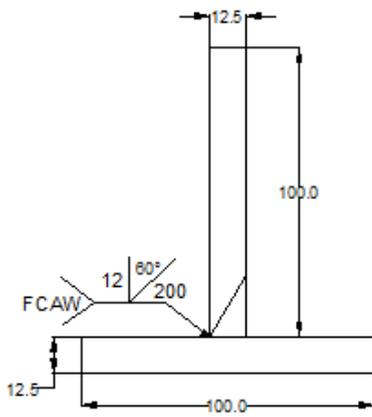
Laboratorio de  
CLIENTE : Metalurgia

PROYECTO : Tesis de grado

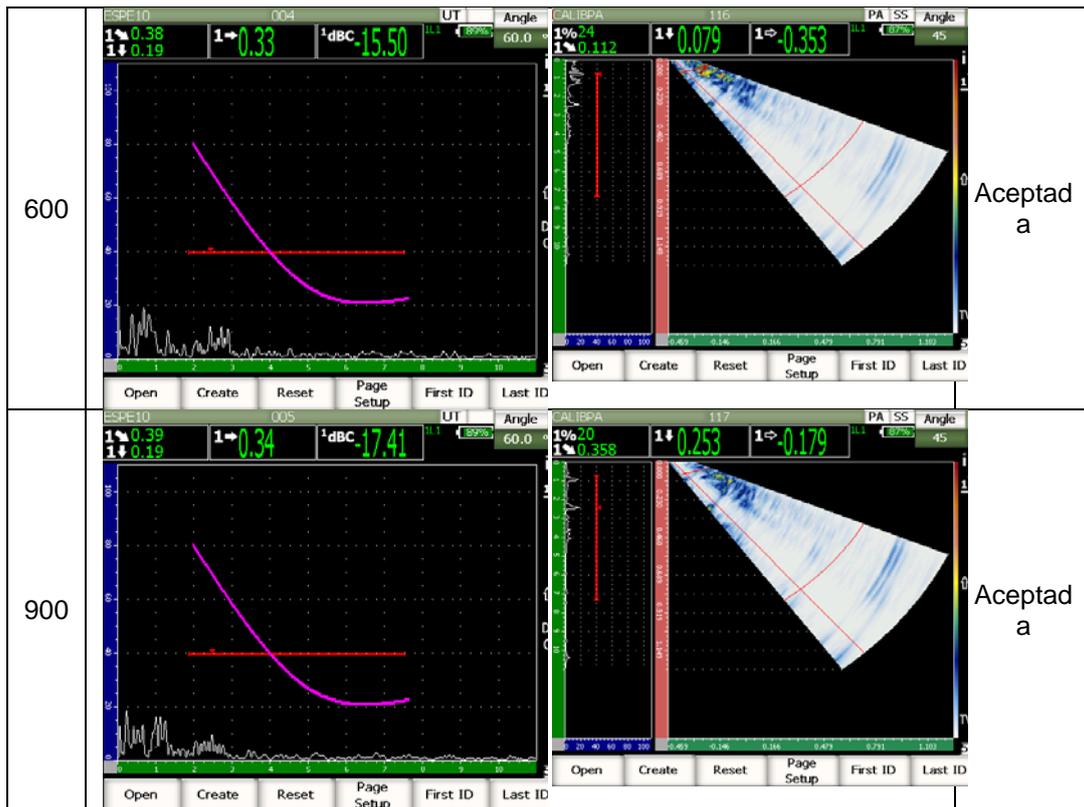
LOCACION: ESPE      FECHA:2011/06/08

CIME

ANEXO A1



T. (°C)	Método Convencional	Phased Array	Descripción
Am b.			Aceptada
300			Aceptada



	ORDEN DE TRABAJO: TA36-001	
	CIENTE: Laboratorio de Metalurgia	
	PROYECTO: Tesis de Grado	
	LOCACION: ESPE	
	FECHA: 2011/06/08	
<b>REPORTE DE INSPECCION CON ULTRASONIDO</b>		
1. EQUIPO EMPLEADO		
EQUIPO: EPOCH 1000i	FECHA DE CALIBRACION: 2001/06/08	
TRANSDUCTOR: SA10-N55S	ELEMENTOS: 8	FRECUENCIA: 2,27 MHz
2. PARAMETROS DE INSPECCION		
TIPO DE INSPECCION: Barrido continuo	METODO DE CALIBRACION: Sensibilidad y distancia	PROCEDIMIENTO: TPU01
BLOQUE DE CALIBRACION: IIW	AJUSTE DE SENSIBILIDAD: 80%	NORMA APLICADA: AWS D1.1
CONDICION SUPERFICIAL: Liza	ACOPLANTE: CMC	
3. DESCRIPCION		
Inspección de soldadura en placas de acero A588 a distintas temperaturas		
4. ESQUEMA		
		

5. CARACTERISTICAS GENERALES

SOLDADURA:

Tipo de unión: A tope	Proceso de Soldadura: FCAW	Espesor de Placa: 10mm
Tipo de soldadura: Ranura	Posición de soldadura: Plana	

6. RESULTADOS OBTENIDOS

Soldaduras inspeccionadas libres de defectos

7. BSERVACIONES

Detalle en ANEXO A2

**INSPECCIONADO  
POR:**

Nombre: Fernando Carvajal - Juan S. Romero

Fecha: 2011/06/08

Firma:

**EVALUADO POR:**

Nombre: Ing. Marco Eucancela

Nivel: ASNT SNT-TC-1A  
Nivel II

Fecha: 2011/06/08

Firma:

**APROBADO POR:**

Nombre

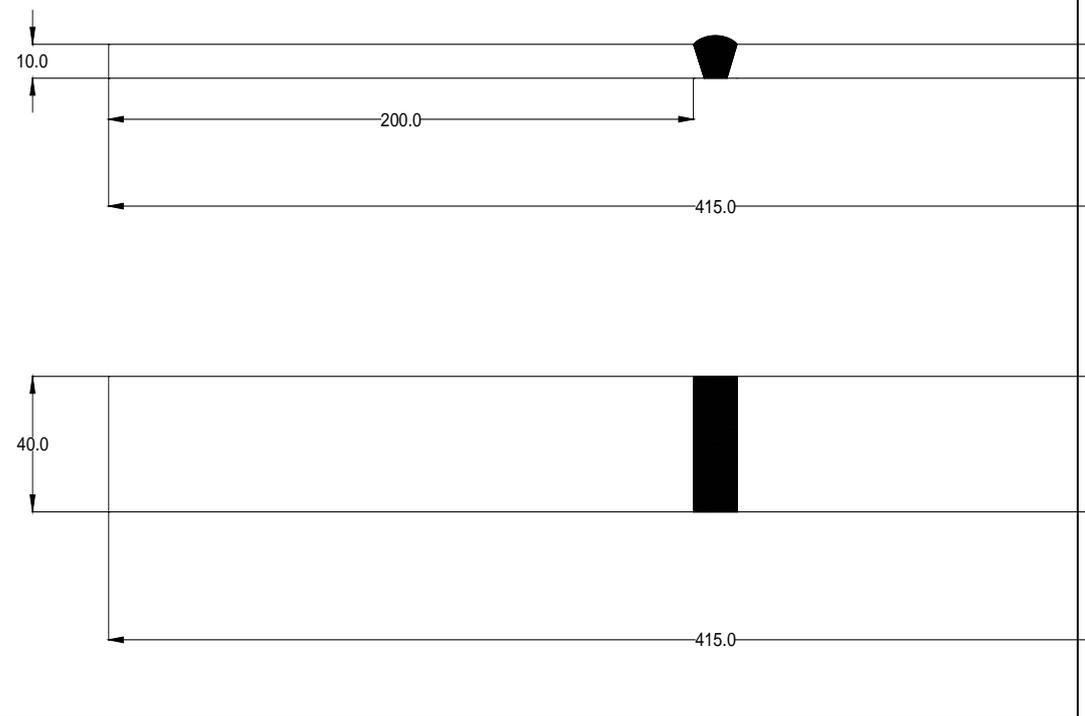
Cargo:

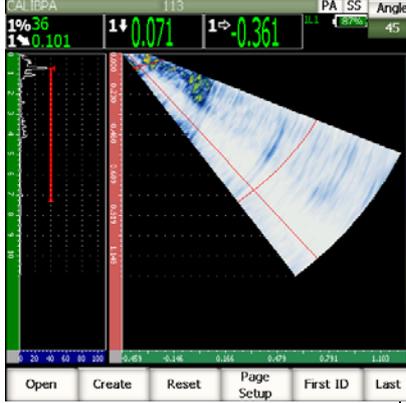
Fecha:

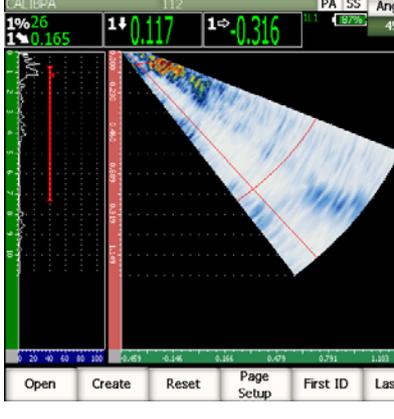
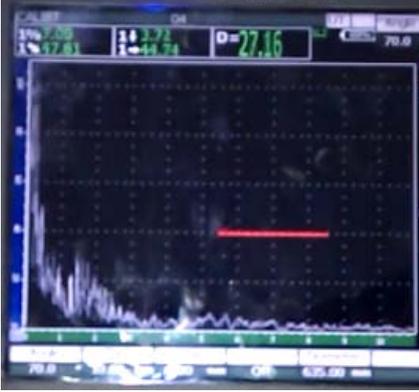
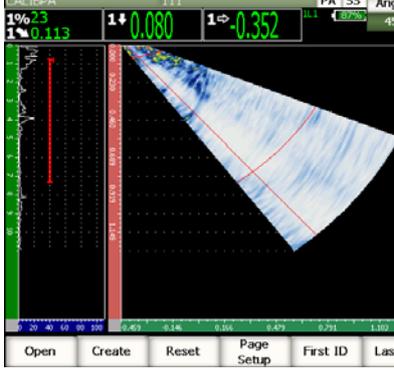
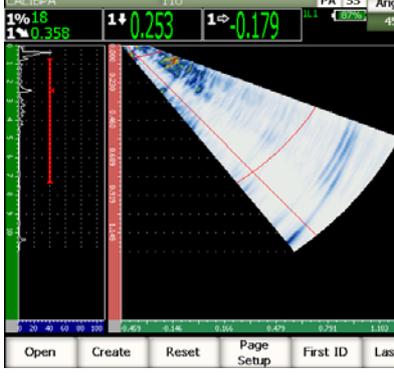
Firma:

	ORDEN DE TRABAJO: TA36-001		<b>CIME</b>
	Laboratorio de		
	CLIENTE : Metalurgia		
	PROYECTO : Tesis de grado		
LOCACION: ESPE	FECHA: 2011/06/08		

**ANEXO A1**



T. (°C)	Método Convencional	Phased Array	Descripción
Amb			<p style="text-align: center;">Aceptada</p>

300			Aceptada
600			Aceptada
900			Aceptada

## ANEXO B :Tintas Penetrantes

	ORDEN DE TRABAJO: 1A		<b>CIME</b>
	CLIENTE : ESPE		
	PROYECTO : TESIS		
	LOCACION: Sangolquí	FECHA : 23-06-2011	

<b>REPORTE DE INSPECCION CON TINTAS PENETRANTES</b>	<b>No: 1</b>
---	--------------

<b>1. EQUIPO EMPLEADO</b>		
REMOVEDOR : "Cleaner"ADROX 9PR551	TINTA: Roja Visible ADROX 996P	
REVELADOR: ADROX 901B	Tiempo de Revelado: 5 min.	
<b>2. PARAMETROS DE INSPECCION</b>		
Condición Superficial:	Procedimiento:	Norma Aplicable:
Lisa	TPI	AWS D1.1 y D1.5

**3.DESCRIPCIÓN:** Inspección en acero A36 a distintas  
temperaturas

**4. ESQUEMA :**



**5. CARACTERÍSTICAS GENERALES**

**SOLDADURA :**

Tipo de Unión :Filete  Tipo de Soldadura :En T	Proceso de Soldadura: FCAW Posición de Soldadura: Plana	10 Espesor de Placa : mm.
--	---	------------------------------

**6. RESULTADOS OBTENIDOS:**

Sin fisuras superficiales

**7. OBSERVACIONES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

INSPECCIONADO POR:	EVALUADO POR:	APROBADO POR:
Nombre: Juan Romero	Nombre: Ing. Patricio Quezada	Nombre : Ing. Patricio Quezada
Fernando Carvajal	Nivel :	Cargo : Codirector
Fecha : 23-06-2011	Fecha : 23-06-2011	Fecha : 23-06-2011
Firma	Firma	Firma

	<b>ORDEN DE TRABAJO:</b> 2A	<b>CIME</b>
	<b>CLIENTE :</b> ESPE	
	<b>PROYECTO :</b> TESIS	
	<b>LOCACION:</b> Sangolquí	

<b>REPORTE DE INSPECCION CON TINTAS PENETRANTES</b>	<b>No: 2</b>
---	------------------

<b>1. EQUIPO EMPLEADO</b>		
<b>REMOVEDOR :</b> "Cleaner"ADROX 9PR551	<b>TINTA: Roja Visible</b> ADROX 996P	
<b>REVELADOR:</b> ADROX 901B	<b>Tiempo de Revelado:</b> 5 min.	
<b>2. PARAMETROS DE INSPECCION</b>		
<b>Condición Superficial:</b>	<b>Procedimiento:</b>	<b>Norma Aplicable:</b>
Lisa	TP1	AWS D1.1 y D1.5

**3.DESCRIPCIÓN:** Inspección en acero A588 a distintas temperaturas

**4. ESQUEMA :**



5. CARACTERÍSTICAS GENERALES		
<b>SOLDADURA :</b>		
Tipo de Unión :Filete	Proceso de Soldadura: FCAW	10
Tipo de Soldadura :En T	Posición de Soldadura: Plana	Espesor de Placa : mm.

<b>6. RESULTADOS OBTENIDOS:</b> Sin fisuras superficiales	<b>7. OBSERVACIONES:</b> _____ _____
--	--

INSPECCIONADO POR:		EVALUADO POR:		APROBADO POR:	
Nombre: Juan Romero		Nombre: Ing. Patricio Quezada		Nombre : Ing. Patricio Quezada	
Fernando Carvajal		Nivel :		Cargo : Codirector	
Fecha : 23-06-2011	Firma:	Fecha : 23-06-2011	Firma :	Fecha : 23-06-2011	Firma :

## ANEXO C: Ensayo de Tracción

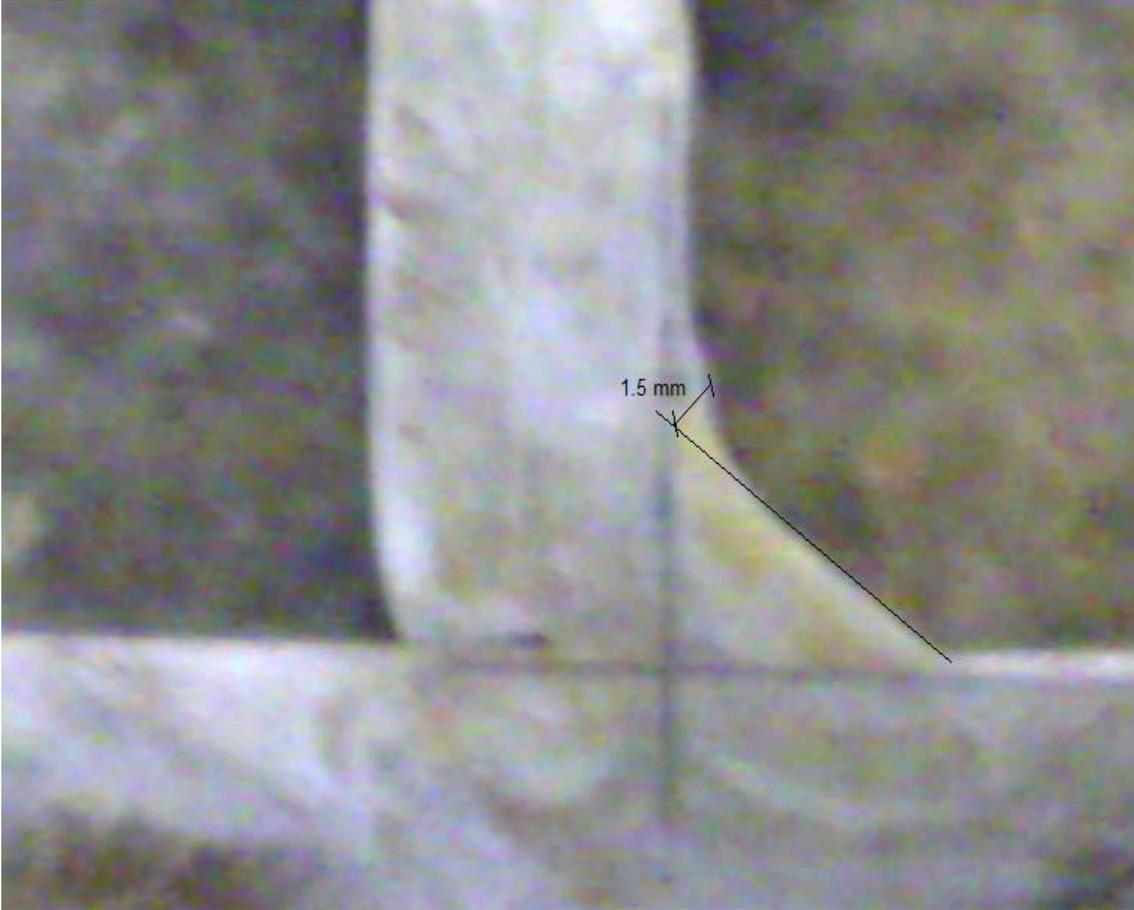


**C1** Probetas para evaluación de material de aporte



**C.2** Probetas con material base y material de aporte

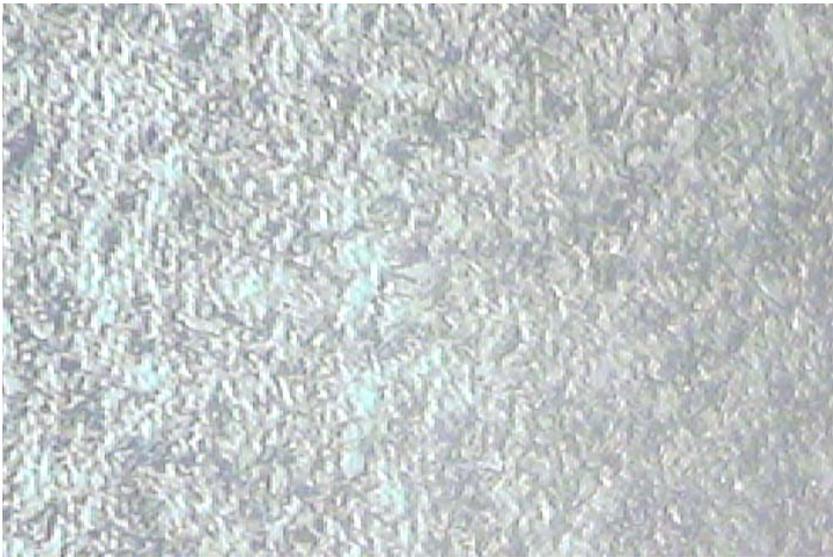
**ANEXO D: Ensayos Macrográficos**

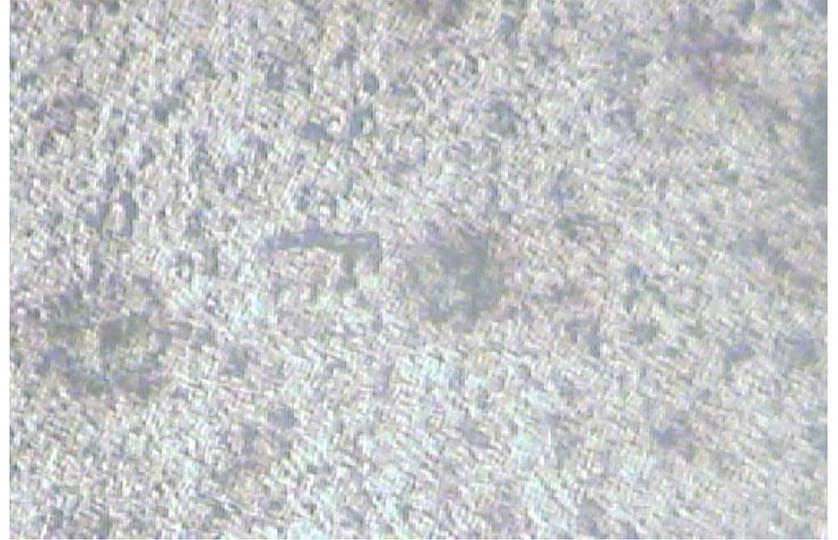


**D.1** Máxima sobremona "C" presente

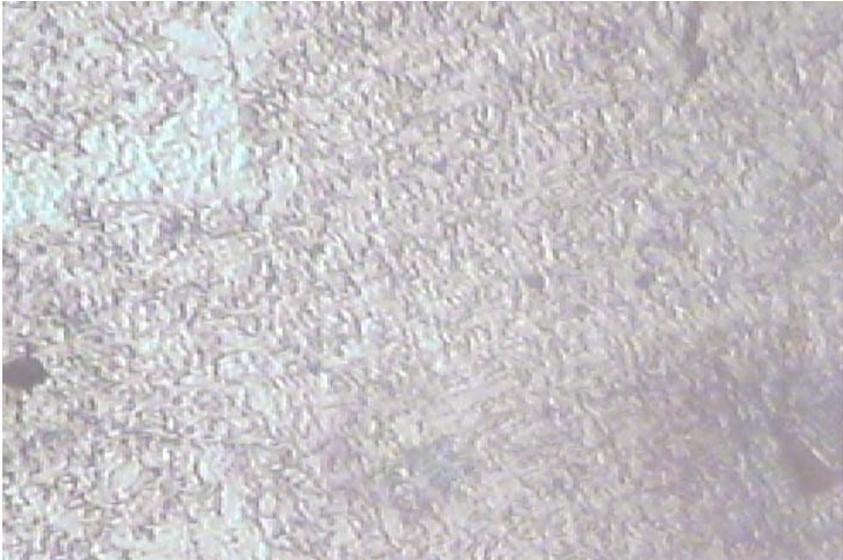
## ANEXO E: Ensayos Micrográficos

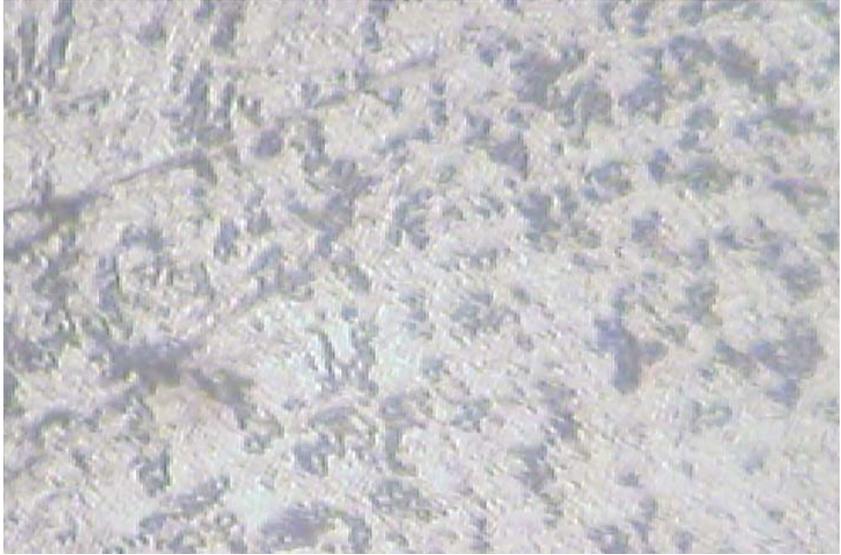
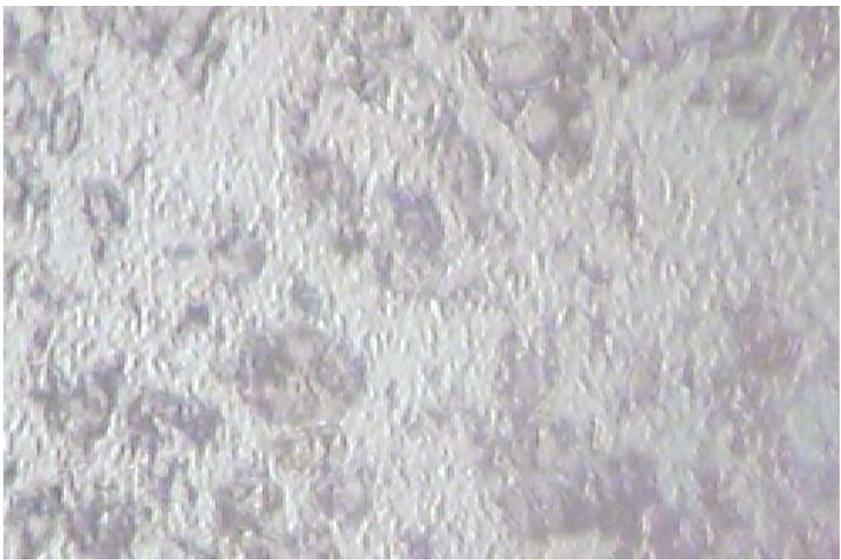
Electrodo E 81T1-Ni 1

Temperatura (°C)	Imagen (400X)
Ambiente	
300	

600	
900	

Electrodo E 71T 1

Temperatura (°C)	Imagen (400X)
Ambiente	
300	

600	
900	

## ANEXO F: Ensayos de doblez



**F.1** Probetas de acero A 36 y Electrodo E 71T 1



**F.2** Acero A 588 y Electrodo E 81T1-Ni 1



**F.3** Probeta A588 que presenta fisura superficial

## ANEXO G: Ensayos de Rotura



**G.1** Ubicación de la probeta previo al ensayo



**G.2** Rotura en probetas de acero A36



**G.3** Rotura en probetas de acero A588

**ANEXO H: Planos**













## REFERENCIAS

### BIBLIOGRAFICAS

1. Norma AWS D1.1 Edición 2002
2. Norma AWS D1.1 Edición 2004
3. Norma AWS D1.5 Edición 2004
4. Manual de usuario de equipo de ultrasonido Serie EPOCH 1000i
5. CENTRO TÉCNICO INDURA; Manual del para Ensayos no Destructivos RT/UT
6. Norma ISO, DP-ISO-9712, edición 2008
7. Práctica SNT-TC-1A recomendada por la norma ASNT, edición 2006
8. UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE TABASCO; Manual de introducción al ultrasonido industrial.
9. Norma ASTM A 370-03<sup>a</sup>, Edición 2003
10. Reglamento Técnico Ecuatoriano de “Diseño, fabricación y montaje de estructuras de acero”
11. JEAN-MARC FRANSSSEN; Designing Steel Structures for Fire Safety; 4ta Edición; Publicaciones de Kirby (1995).
12. Norma ASTM E119, Edición 2010
13. Norma ISO 834, Edición 2010
14. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COMAHUE; Soldadura por arco con núcleo fundente.
15. AWS. Manual de soldadura, Tomo I, México 8va Edición.

## DIRECCIONES DE INTERNET

1. <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>
2. <http://es.wikipedia.org/wiki/Acero>
3. <http://www.monografias.com/trabajos46/soldadura-por-arco/soldadura-por-arco2.shtml>
4. <http://www.monografias.com/trabajos46/soldadura-por-arco/soldadura-por-arco2.shtml>
5. <http://www.construccion-civil.com/2011/03/tipos-de-soldaduras-tope.html>
6. [http://www.construmatica.com/construpedia/Uniones\\_por\\_Soldadu](http://www.construmatica.com/construpedia/Uniones_por_Soldadu)
7. <http://www.thefabricator.com/article/Array/22-posibles-causas-de-la-porosidad-del-metal-de-soldadura>
8. [http://endalloy.blogspot.com/2010\\_05\\_01\\_archive.html](http://endalloy.blogspot.com/2010_05_01_archive.html)
9. <http://facingyconst.blogspot.com/2010/07/consideraciones-sobre-el-crecimiento-de.html>
10. <http://pipeisometric.com/defectologa.html>
11. <http://www.duerosoldadura.es/tema4.php>
12. [http://soldadura.org.ar/index.php?option=com\\_soldadura-tipos-de](http://soldadura.org.ar/index.php?option=com_soldadura-tipos-de)
13. [http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases\\_datos/doc.php?id=BOE-A-1996-3449](http://www.boe.es/aeboe/consultas/bases_datos/doc.php?id=BOE-A-1996-3449)
14. <http://www.scribd.com/doc/51796444/pruebas-no-destructivas>
15. [www.dspace.espol.edu.ec](http://www.dspace.espol.edu.ec)
16. [www.slideshare.net/.../tintas-penetrantes](http://www.slideshare.net/.../tintas-penetrantes) - Estados Unidos
17. <http://www.mailxmail.com/curso-metalografia/examen-micrografico-macrografico>

**18.** [http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo\\_de\\_resiliencia](http://enciclopedia.us.es/index.php/Ensayo_de_resiliencia)

**19.** [http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza\\_Rockwell](http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Rockwell)