



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero
Soldadas”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentada por:

Carlos Fabián Ajila Camacho

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

A Dios, a mis padres, quienes me han dado todo su apoyo incondicional, a mi hermano Paul por su ayuda para la culminación de este trabajo y a su esposa e hijos quienes compartieron conmigo todo este tiempo de mis estudios universitarios.

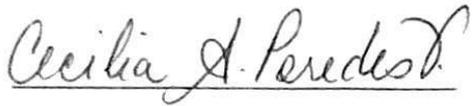
DEDICATORIA

A DIOS

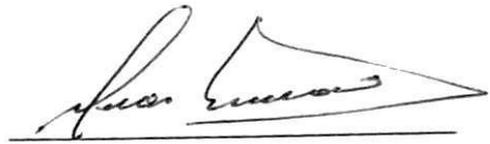
A MIS PADRES

A MIS ABUELOS

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Dra. Cecilia Paredes V.
SUBDECANA DE LA FIMCP
PRESIDENTA



Ing. Omar Serrano V.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Manuel Helguero G.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Carlos Fabián Ajila Camacho

RESUMEN

En este trabajo se presentó de forma detallada como se generan las distorsiones en los diferentes elementos soldados que se encuentran en todo tipo de construcciones industriales que hoy en día demandan la utilización de estructuras metálicas.

La soldadura con arco eléctrico produce expansiones y contracciones térmicas en los metales, que a su vez provocan esfuerzos internos en la soldadura; dichos esfuerzos son los esfuerzos residuales los cuales producen las distorsiones en los elementos soldados.

En este trabajo se analizaron los métodos para el control de la distorsión en elementos soldados y se compararon los valores de distorsión usando las ecuaciones empíricas propuestas con las obtenidas directamente de piezas soldadas.

El primer capítulo consiste en explicar el flujo de calor en soldadura por fusión, es decir como se distribuye la temperatura en los elementos soldados, analizando el ciclo térmico en los diagramas de Temperatura vs. Tiempo, que explican el calentamiento desde el metal de aporte hasta el metal base.

En el capítulo dos se detallan los fundamentos teóricos de los esfuerzos térmicos y residuales que se producen en la soldadura, así como las técnicas de medición y las técnicas de alivio de estos esfuerzos.

En el tercer capítulo se presentan los diferentes tipos de distorsión que aparecen en estructuras soldadas, se detallan las fórmulas empíricas y diagramas propuestos para medir de manera aproximada la distorsión que se puede presentar en una estructura soldada, y además se explica como controlar la distorsión mediante una serie de pasos para los diferentes tipos de uniones que se requieran al soldar.

El cuarto capítulo es el práctico, aquí se presentan los resultados obtenidos de las distorsiones producidas al soldar con juntas a tope y a filete. Estos resultados son tomados directamente de las piezas soldadas y son comparados con los cálculos realizados de las ecuaciones empíricas, y finalmente se discutirá sobre el margen de error obtenido en ésta comparación.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	I
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. FLUJO DE CALOR EN SOLDADURA POR FUSIÓN.....	3
1.1 Distribución de Temperatura.....	3
1.2 Velocidad de Enfriamiento.....	14
1.3 Influencia de las propiedades físicas en los materiales soldados.....	18

1.3.1	Conductividad Térmica.....	18
1.3.2	Dilatación Térmica.....	21
1.4	Efectos de las Dilataciones y Contracciones no Uniformes.....	24
CAPÍTULO 2		
2.	ESFUERZOS TÉRMICOS Y RESIDUALES.....	31
2.1	Esfuerzos Residuales.....	32
2.2	Clasificación de los Esfuerzos Residuales.....	35
2.3	Generación de los Esfuerzos Residuales.....	37
2.4	Distribución de los Esfuerzos Residuales en Elementos Soldados.....	55
2.5	Efecto de los Esfuerzos Residuales en la Integridad de la Soldadura.....	62
2.6	Medición de Esfuerzos Residuales en Soldadura.....	66
2.6.1	Técnica de Relajación de Esfuerzos.....	66
2.6.2	Difracción de Rayos X.....	71
2.6.3	Técnica de Ultrasonido.....	72
2.7	Alivio de Esfuerzos Residuales en Soldadura.....	74
2.7.1	Tratamiento Térmico.....	74
2.7.2	Tratamiento Mecánico.....	76

CAPITULO 3

3. DISTORSIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO SOLDADAS.....	81
3.1 Tipos de Deformaciones en Uniones Soldadas.....	82
3.1.1 Contracción (Distorsión) Transversal.....	82
3.1.2 Contracción (Distorsión) Longitudinal.....	88
3.1.3 Distorsión Angular.....	94
3.2 Resumen de las Fórmulas Empíricas y Tablas Para los Diferentes Tipos de Distorsión en Elementos soldados.....	102
3.3 Control de Distorsión.....	107
3.3.1 En el Montaje de Elementos Soldados.....	107
3.3.2 En el Procedimiento de Soldadura.....	110
3.3.3 En la Secuencia de Soldadura.....	114

CAPITULO 4.

4. TRABAJO EXPERIMENTAL:

COMPARACIÓN DE LA MEDICIÓN Y CÁLCULO DE DISTORSIÓN EN
PIEZAS SOLDADAS DE ACERO: EXPERIMENTAL VS. ANALÍTICA.

4.1 Detalle de las piezas Soldadas.....	123
4.1.1 Contracción Transversal.....	124

4.1.2 Distorsión Rotacional.....	125
4.1.3 Contracción Longitudinal.....	126
4.1.4 Distorsión Angular.....	127
4.2 Medición y Cálculo de las Distorsiones en las Piezas Soldadas.....	128
4.3 Margen de Error de los Resultados Teóricos y Experimentales.....	181
4.4 Discusión de Resultados.....	182

CAPÍTULO 5.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	186
--	-----

APENDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

AWS	American Welding Society
A	Amperios
W	Ancho del ala
b	Ancho de la placa
H	Aporte de calor
A_w	Área de la sección transversal de la soldadura
A_p	Área de las placas
E.N.	Eje Neutro
t	Espesor de la placa (ala, alma)
F	Fuerza
I	Intensidad de corriente de soldadura
L	Longitud de la soldadura (viga)
mm	Milímetros
I	Momento de Inercia
in	Pulgadas
d	Separación de raíz.
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
SAW	Sumerged Arc Welding
t_w , w	Tamaño del filete
T	Temperatura
TTT	Transformación, Temperatura, Tiempo
V	Voltaje, Voltios
ZAC	Zona Afectada por el Calor

SIMBOLOGÍA

Δ	Distorsión, Contracción
ΔT	Variación de Temperatura
%	Porcentaje
$^{\circ}C$	Grados Centígrados
$^{\circ}F$	Grados Fahrenheit
1F	Posición plana soldadura en filete
1G	Posición plana soldadura en ranura
R-X	Rayos X
"	Pulgadas

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1.1 Distribución de la Temperatura.....	4
Figura 1.2 Distribución de una temperatura de una sección cualquiera a lo largo del eje X.....	6
Figura 1.3 Curvas isotérmicas que se producen en una plancha sometida a soldadura a tope.....	8
Figura 1.4 Ciclo térmico de diferentes puntos de una unión soldada.....	10
Figura 1.5 Ciclos térmicos en diferentes lugares de la ZAC	12
Figura 1.6 Curva de la velocidad de enfriamiento de un acero.....	14
Figura 1.7 Curva TTT de un acero AISI 4140.....	16
Figura 1.8 Simulación de la deformación provocada por un calentamiento local.....	25
Figura 1.9 Calentamiento local producido durante la soldadura de dos placas.....	25
Figura 1.10 Direcciones de las contracciones longitudinales y transversales.....	26
Figura 1.11 Deformación por contracción longitudinal en una junta a tope.....	27
Figura 1.12 Distorsión en una Soldadura en Angulo o Distorsión longitudinal por Flexión.....	28
Figura 1.13 Deformación por contracción transversal.....	29
Figura 1.14 Deformación angular en una unión a tope.....	29
Figura 1.15 Deformación Angular en una unión a filete.....	30
Figura 2.1 Elongaciones de diferentes aceros a una misma temperatura.....	32
Figura 2.2 Esfuerzos residuales macroscópicos en varias escalas.....	36

Figura 2.3	Graficas esfuerzo – deformación.....	41
Figura 2.4	Analogía de las tres barras.....	44
Figura 2.5	Representación de la analogía de las 3 barras.....	45
Figura 2.6	Contracción longitudinal sin restricción externa.....	47
Figura 2.7	Contracción longitudinal con restricción externa.....	49
Figura 2.8	Esquematización de la contracción transversal.....	51
Figura 2.9	Distribución de esfuerzos residuales longitudinales en una placa debido al proceso de soldadura.....	56
Figura 2.10	Esfuerzos residuales transversales.....	57
Figura 2.11	Tensiones longitudinales y transversales.....	58
Figura 2.12	Flujograma de distribución y esfuerzos residuales.....	59
Figura 2.13	Distribución de esfuerzos residuales longitudinales.....	64
Figura 2.14	Bandas extensométricas para medición de esfuerzos residuales.....	66
Figura 2.15	Roseta para medición.....	67
Figura 2.16	Técnica de medición de esfuerzos residuales con galgas	69
Figura 2.16	Software para medición de esfuerzos residuales.....	70
Figura 2.18	Equipo de R-X para medición de esfuerzos residuales.....	71
Figura 2.19	Equipo de ultrasonido para medición de esfuerzos residuales (Sistema UCC).....	73
Figura 2.20	Tratamiento térmico a un tanque cilíndrico.....	75
Figura 2.21	Equipo de eliminación de esfuerzos residuales por vibración mecánica.....	78
Figura 3.1	Contracción transversal de una junta a tope.....	83
Figura 3.2	Contracción transversal de una junta a filete.....	86
Figura 3.3	Distorsión rotacional de dos placas de acero en junta a tope.....	87
Figura 3.4	Contracción longitudinal de una junta a tope.....	89
Figura 3.5	Distorsión por efecto de soldadura por encima del eje neutro.....	90
Figura 3.6	Distorsión por efecto de soldadura por debajo del eje neutro.....	91
Figura 3.7	Fuerza de contracción F actuando sobre la distancia "d".	91
Figura 3.8	Deflexión de la viga debido a las fuerzas de contracción..	92

Figura 3.9	Contracción de fuerzas en una soldadura a tope.....	94
Figura 3.10	Fuerza de contracción actuando alrededor de la distancia d.....	95
Figura 3.11	Distorsión angular en una junta a tope.....	96
Figura 3.12	Distorsión angular en una junta a filete.....	97
Figura 3.13	Efecto del espesor de la placa (t) y del peso del metal soldado por unidad de longitud (W) para el cambio angular en una soldadura a filete no restringida.....	100
Figura 3.14	Predeformar elásticamente la pieza antes de la soldadura.....	107
Figura 3.15	Soldadura cercana al eje neutro ayuda a evitar distorsiones.....	108
Figura 3.16	Sujetadores para soldaduras a tope.....	109
Figura 3.17	Utilizar el mínimo número de pases.....	110
Figura 3.18	Utilizar juntas en doble V o U y soldar en secuencia.....	111
Figura 3.19	Unión en doble V simétrica. Alternar los cordones por ambos lados.....	113
Figura 3.20	Soldadura de un conjunto de planchas y de un tanque....	114
Figura 3.21	Secuencia para soldar uniones en ángulo.....	115
Figura 3.22	Secuencia de Soldadura a Saltos.....	118
Figura 3.23	Soldaduras intermitentes.....	119
Figura 3.24	Método para evitar distorsiones rotacionales.....	121
Figura 3.25	Uso de cuñas para evitar distorsiones rotacionales.....	121
Figura 4.1	Contracción transversal junta a tope.....	128
Figura 4.2	Placas antes de soldarlas.....	128
Figura 4.3	Puntos donde se tomaron las medidas antes de soldar las placas.....	129
Figura 4.4	Limpieza de la escoria luego del primer cordón de soldadura.....	130
FIGURA 4.5	Puntos donde se tomaron las medidas después de la soldadura.....	132
Figura 4.6	Primera medición, $X_1' = 149.60$ mm.....	132
Figura 4.7	Segunda medición, $X_2' = 149.30$ mm.....	133
Figura 4.8	Tercera medición, $X_3' = 149.70$ mm.....	133

Figura 4.9	Contracción transversal junta a filete.....	136
Figura 4.10	Placas cortadas antes de soldarlas.....	137
Figura 4.11	Puntos donde se tomaron las medidas antes de la soldadura.....	137
Figura 4.12	Soldadura de las planchas en posición 1F con proceso SMAW.....	138
Figura 4.13	Puntos donde se tomaron las medidas después de la soldadura.....	139
Figura 4.14	Primera medición, $X_1' = 99.10$ mm.....	140
Figura 4.15	Segunda medición, $X_2' = 99.30$ mm.....	140
Figura 4.16	Tercera medición, $X_3' = 99.35$ mm.....	141
Figura 4.17	Medición del tamaño del filete (t_w).....	143
Figura 4.18	Contracción longitudinal junta a tope.....	144
Figura 4.19	Preparación de las placa.....	144
Figura 4.20	Planchas listas previas a la soldadura, tomando 2 mediciones a la probeta.....	145
Figura 4.21	Primera medición, $X_1 = 141, 35$ mm.....	145
Figura 4.22	Segunda medición, $X_2 = 141, 70$ mm.....	146
Figura 4.23	Soldadura de las placas en posición 1G con proceso SMAW.....	147
Figura 4.24	Puntos donde se tomaron las medidas después de soldar.....	147
Figura 4.25	Primera medición, $X_1' = 141.30$ mm.....	148
Figura 4.26	Segunda medición, $X_2' = 141.70$ mm.....	148
Figura 4.27	Contracción transversal junta a filete.....	150
Figura 4.28	Corte y preparación de las planchas antes de soldarlas...	151
Figura 4.29	Preparación de la viga I.....	152
Figura 4.30	Extracción de los soportes de las alas.....	152
Figura 4.31	Alineación de la viga en la maquina.....	153
Figura 4.32	Dimensiones de la viga y enumeración del orden de los cordones de soldadura.....	154
Figura 4.33	Parámetros de la maquina SAW.....	154
Figura 4.34	Soldadura del primer cordón con SAW.....	155
Figura 4.35	Distorsión angular provocada por el calentamiento.....	156
Figura 4.36	Distorsión angular por el primer cordón.....	156
Figura 4.37	Disminución de la distancia entre las alas debido a la distorsión angular.....	157

Figura 4.38	Soldadura del segundo cordón con SAW.....	158
Figura 4.39	Distorsión angular por el segundo cordón.....	159
Figura 4.40	Soldadura del tercer cordón con SAW.....	160
Figura 4.41	Distorsión angular por el tercer cordón.....	161
Figura 4.42	Soldadura del cuarto cordón con SAW.....	162
Figura 4.43	Distorsión angular por el cuarto cordón.....	163
Figura 4.44	Curvatura en la viga I.....	164
Figura 4.45	Dimensiones de la viga I.....	165
Figura 4.46	Valor del parámetro "d".....	167
Figura 4.47	Medición de la altura de la pierna.....	167
Figura 4.48	Dimensiones para obtener el momento de inercia de la viga I.....	168
Figura 4.49	Contracción transversal junta a filete.....	170
Figura 4.50	Distorsión angular en una junta a tope.....	171
Figura 4.51	Efecto de la distorsión angular.....	172
Figura 4.52	Medición real de la distorsión – junta a tope.....	173
Figura 4.53	Distorsión angular en una junta a filete.....	174
Figura 4.54	Efecto de la distorsión una vez que las placas han alcanzado la temperatura ambiente.....	175
Figura 4.55	Medición real de la distorsión – junta a filete.....	176
Figura 4.56	Dimensiones para emplear la ecuación.....	176
Figura 4.57	Efecto del espesor del ala y del peso del material depositado por unidad de longitud en la distorsión angular.....	178
Figura 4.58	Área de soldadura real de la probeta # 06.....	179

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Valores de conductividad térmica para varios metales.....	19
Tabla 2	Valores de coeficientes de expansión térmica para varios metales.....	22
Tabla 3	Parámetros del proceso SMAW – Probeta # 01.....	130
Tabla 4	Tiempo de los cordones de soldadura - Probeta # 01.....	131
Tabla 5	Contracción real - Probeta # 01.....	134
Tabla 6	Parámetros del proceso SMAW – Probeta # 02.....	138
Tabla 7	Contracción real - Probeta # 02.....	142
Tabla 8	Parámetros del proceso SMAW – Probeta # 03.....	146
Tabla 9	Contracción real - Probeta # 03.....	149
Tabla 10	Parámetros del proceso SAW – Probeta # 04 (1er. Pase).....	155
Tabla 11	Reducción angular del ala debido al primer cordón.....	157
Tabla 12	Parámetros del proceso SAW – Probeta # 04 (2do Pase).....	158
Tabla 13	Reducción angular del ala debido al segundo cordón.....	159
Tabla 14	Parámetros del proceso SAW – Probeta # 04 (3er. Pase).....	160
Tabla 15	Reducción angular del ala debido al tercer cordón.....	161
Tabla 16	Parámetros del proceso SAW – Probeta # 04 (4to. Pase).....	162
Tabla 17	Reducción angular del ala debido al cuarto cordón.....	163
Tabla 18	Parámetros del proceso SMAW – Probeta # 05.....	171
Tabla 19	Parámetros del proceso SMAW – Probeta # 06.....	175
Tabla 20	Contracción Trasversal: Probeta # 01 y 02.....	182
Tabla 21	Contracción Longitudinal: Probeta # 03 y 04.....	182
Tabla 22	Distorsión Angular: Probeta # 05 y 06.....	184

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la soldadura se ha convertido en el método de unión de metales más utilizado y de mayor demanda debido a que su desarrollo se lo debe al gran avance tecnológico y la implementación de metales de aporte de tal forma que se puedan unir muchos metales de diferentes composiciones.

La soldadura permite la fusión de metales o unión metalúrgica debido a que este es un proceso de aporte de metal fundido, el cual, produce excesivo calor y éste es depositado de forma puntual en los elementos a soldar, lo que crea calentamientos y enfriamientos no uniformes, lo cual ocasiona dilataciones y contracciones respectivamente.

Este fenómeno es natural en todos los metales debido a las propiedades físicas que estos poseen. Este efecto de dilataciones y contracciones crea deformaciones de las estructuras soldadas las cuales pueden ser perjudiciales, a tal punto de desechar la estructura si el nivel de distorsión es muy alto. En este trabajo se presentan ecuaciones empíricas que ayudan a estimar estas deformaciones y los pasos que se deben tener en cuenta para evitar al máximo

estos problemas. Adicionalmente se realiza una comparación de estas ecuaciones con los valores reales de elementos distorsionados debido a la soldadura para mostrar la veracidad de dichas ecuaciones.

CAPÍTULO 1

1. FLUJO DE CALOR EN SOLDADURA POR FUSIÓN.

El proceso de soldadura involucra necesariamente aporte de calor para unir dos piezas entre sí. El aporte de calor es muy importante no solo porque permite que se lleve a cabo la unión, si no por que afecta su microestructura y ésta a su vez, sus propiedades mecánicas. Además provoca variaciones dimensionales y puede generar tensiones residuales que afecten la integridad de los componentes soldados.

1.1 Distribución de la Temperatura.

Si se realiza una soldadura sobre la superficie A-B como se muestra en la figura 1.1 y si se colocara termocuplas representadas por círculos

pequeños distribuidas inmediatamente debajo de la superficie; la distribución de calor se comportara así:

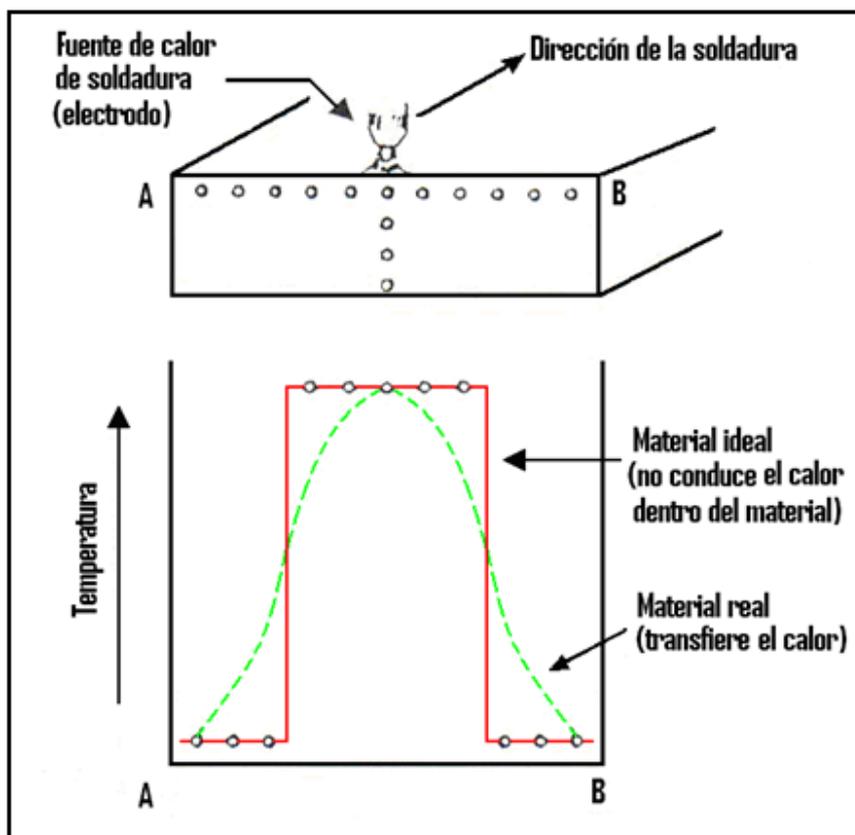


FIGURA 1.1: DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA (1).

Si el calor aportado por la soldadura no fluyera a través de la pieza a soldar, todo el calor se concentraría solamente en la zona a fundir. De esta manera, sólo una zona estrecha en el material alcanzaría la

temperatura de fusión mientras que el resto del metal permanecería a la temperatura ambiente, como se muestra en la línea continua de color rojo. Sin embargo, la realidad es otra, ya que los metales son buenos conductores de calor, es decir, sus átomos transmiten rápidamente calor a sus vecinos, distribuyéndolo a lo largo de la pieza. Entonces si midiéramos la temperatura con las termocuplas (termopares) en cada punto del material durante la soldadura, tendríamos una distribución de la temperatura como la representada por la curva de trazos de la figura 1.1.

Estas curvas reales de distribución de temperaturas son muy importantes, pues nos permiten conocer en un momento determinado cuál es la temperatura en diferentes puntos de la pieza que está siendo soldada. Si conocemos la temperatura en cada punto, podemos predecir en que zonas del metal se verán afectadas microestructuralmente incluso podremos estimar el grado de distorsión a la que estaría sometida la unión como consecuencia del calor de soldadura. Ahora bien, la fuente de calor se aplica a la pieza a soldar durante un lapso de tiempo determinado; por lo tanto, es lógico pensar que en su primer momento, ésta se calienta y luego, una vez que la fuente de calor deja de actuar, comienza a

enfriarse. Esto significa que cada punto del metal experimentará una variación de su temperatura en función del tiempo, es decir un **ciclo térmico**, si representamos los dos conceptos, distribución de temperatura y ciclo térmico en un mismo gráfico, tendremos una serie de curvas de temperatura que van cambiando en el tiempo como se indica en la figura 1.2. Las curvas representan momentos diferentes durante la soldadura

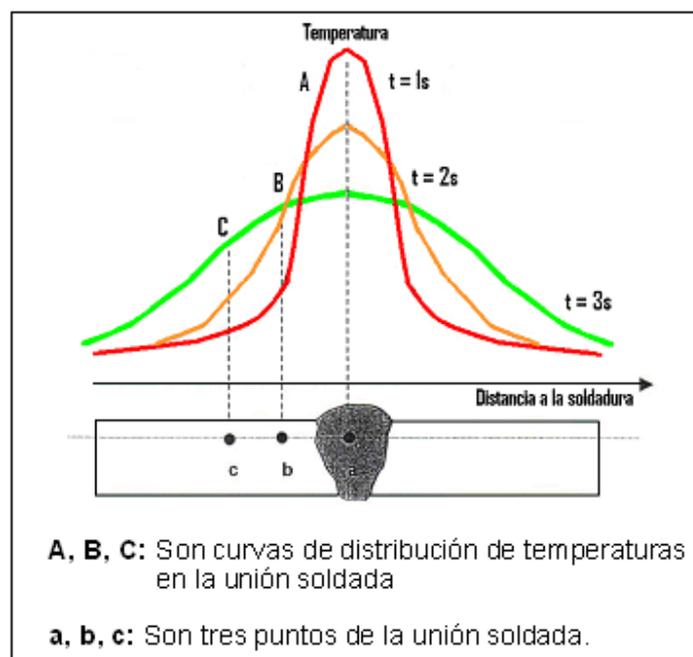


FIGURA 1.2: DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA DE UNA SECCIÓN CUALQUIERA A LO LARGO DEL EJE X (1)

La Distribución de Temperatura.- Representa las temperaturas existentes en un momento determinado, en varios puntos del metal que ha sido o está siendo soldado.

El Ciclo Térmico.- Representa como varía la temperatura a lo largo de todo el tiempo de un punto cualesquiera del metal durante la soldadura. El ciclo térmico representa por lo tanto la historia térmica de un punto cualquiera del metal y por ello, tiene una influencia notable en la micro estructura final de dicho metal y en sus propiedades mecánicas.

Sin embargo la fuente de calor no permanece estacionaria, sino que durante la soldadura se mueve alejándose de la sección que se consideró originalmente. La zona que ha recibido directamente el calor del arco y sus proximidades comenzarán a enfriarse, mientras que aquellas que están más próximas a la fuente de calor comenzarán a calentarse, elevando su temperatura. Al cabo de algunos segundos, las curvas de temperaturas en nuestra sección considerada originalmente irán variando como se muestra en la figura 1.2, transformándose la curva, según va pasando el tiempo y se va alejando de la fuente de calor, en otra curva cada vez más tendida, hasta que es prácticamente horizontal y termina confundiéndose con una recta cuando se alcanza la temperatura

ambiente. Si colocamos ahora termocuplas sobre toda la superficie de las planchas a soldar, para medir cada punto de aquella, **el ciclo térmico durante la soldadura** y dibujamos las curvas isotermas a partir de las mediciones de temperatura, obtendríamos una representación como de la figura 1.3

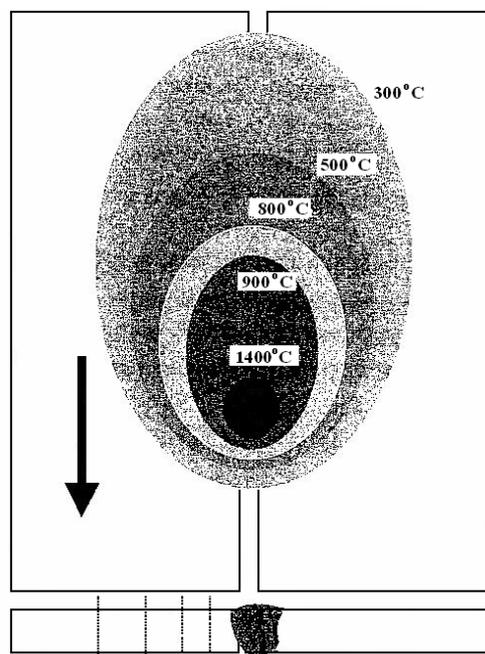


FIGURA 1.3: CURVAS ISOTÉRMICAS QUE SE PRODUCEN EN UNA PLANCHA SOMETIDA A SOLDADURA A TOPE (1).

Tanto las curvas de distribución de temperatura como las isotermas dependen de los siguientes factores:

1. El baño fundido, que actúa como foco de calor más o menos permanente. Aquí los parámetros a tomar en cuenta son la intensidad de corriente, el voltaje y la velocidad de avance.
2. La masa del metal, que absorbe el calor. Aquí el factor determinante es el espesor de la pieza a soldar y la configuración del tipo de junta.
3. La temperatura inicial del metal base, que incide sobre el gradiente de temperatura. Aquí el factor a considerar es la temperatura ambiente o la temperatura a la cual ha de ser precalentado antes de soldar.

Los enfriamientos desde elevadas temperaturas pueden provocar grandes cambios en las propiedades mecánicas del acero. Analicemos ahora lo que sucede durante la soldadura en diversos puntos de la unión soldada. La figura 1.4 que es la curva de Temperatura vs. Tiempo representa los **ciclos térmicos** correspondientes a los puntos 1, 2, 3, 4 y 5 ubicados en la unión soldada.

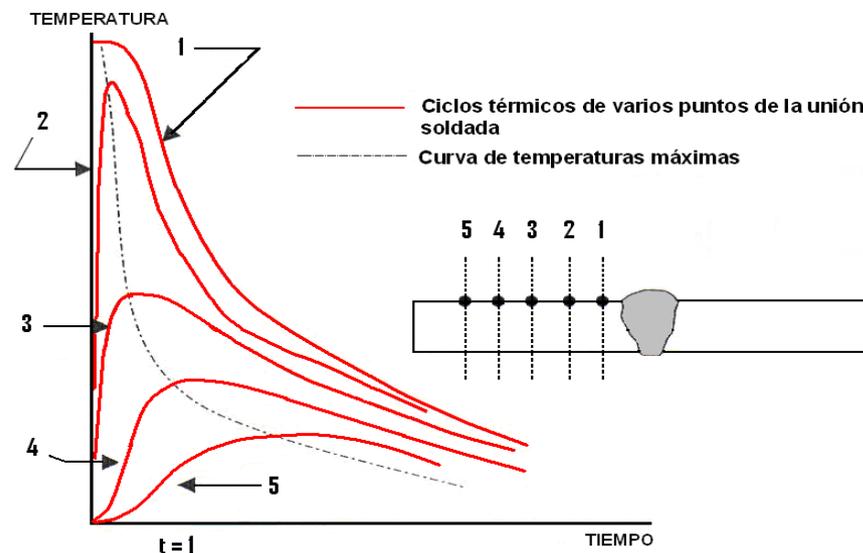


FIGURA 1.4: CICLO TÉRMICO DE DIFERENTES PUNTOS DE UNA UNIÓN SOLDADA (1)

Observando las distintas curvas de enfriamiento, podemos advertir lo siguiente:

- ✓ La velocidad de calentamiento es mucho más rápida que la de enfriamiento.
- ✓ La temperatura máxima alcanzada es más alta cuanto más próximo está el punto de la fuente de calor.
- ✓ Las velocidades de enfriamiento en cada punto son siempre inferiores a las que experimenta el metal fundido y serán aun menores cuanto más

alejado esté el punto del baño fundido (la velocidad de enfriamiento se puede determinar por la pendiente de las curvas de enfriamiento a cualquier temperatura).

Analizando de forma mas detallada la curva Temperatura vs. Tiempo la cual indica que es lo que pasa en el instante en que se suelda y que es lo que pasa luego de la soldadura, para ello observemos la figura 1.5 la cual muestra casos típicos de ciclos térmicos producidos por soldadura por arco eléctrico empleando un proceso de arco sumergido en una placa de 12.5mm de espesor con un aporte térmico de 3940 Joules/mm y con una temperatura inicial de la placa de 27°C (temperatura ambiente).

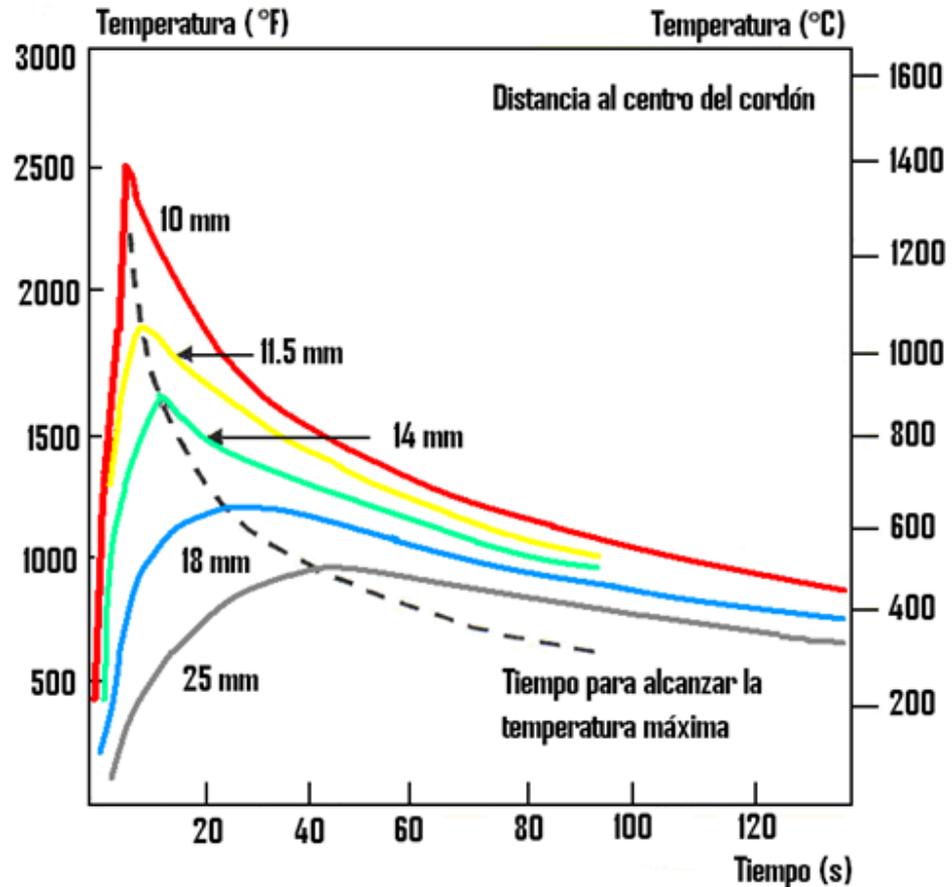


FIGURA 1.5: CICLOS TÉRMICOS EN DIFERENTES LUGARES DE LA ZAC (1).

En este gráfico es importante indicar que la curva superior representa el ciclo térmico en un punto situado a 10mm del centro del cordón que alcanza una temperatura máxima de 1365 °C (2490 °F). La curva mas baja corresponde al ciclo térmico en un punto ubicado a 25.5 mm del centro del cordón que alcanza una temperatura máxima de 520 °C (960 °F). Las curvas intermedias

representan los correspondientes ciclos térmicos a distancias 11.5, 14 y 18mm desde el centro del cordón. La observación de las cinco curvas mostradas en la figura 1.5, que son un modelo típico para todos los procesos de soldadura por arco eléctrico, nos permite concluir que:

- ✓ La temperatura máxima que se alcanza en un punto disminuye rápidamente con el aumento de la distancia entre el punto y el centro del cordón (a 10mm del cordón fue de 1365 °C, mientras que a 25.5mm la temperatura máxima era solo de 520 °C).
- ✓ El tiempo necesario para alcanzar en un punto la temperatura máxima aumenta con la distancia desde el punto al centro del cordón (su calentamiento resulta más lento).
- ✓ Tanto la velocidad de enfriamiento como la velocidad de calentamiento en un punto disminuyen con el aumento de la distancia del punto al centro del cordón.

1.2 Velocidad de Enfriamiento.

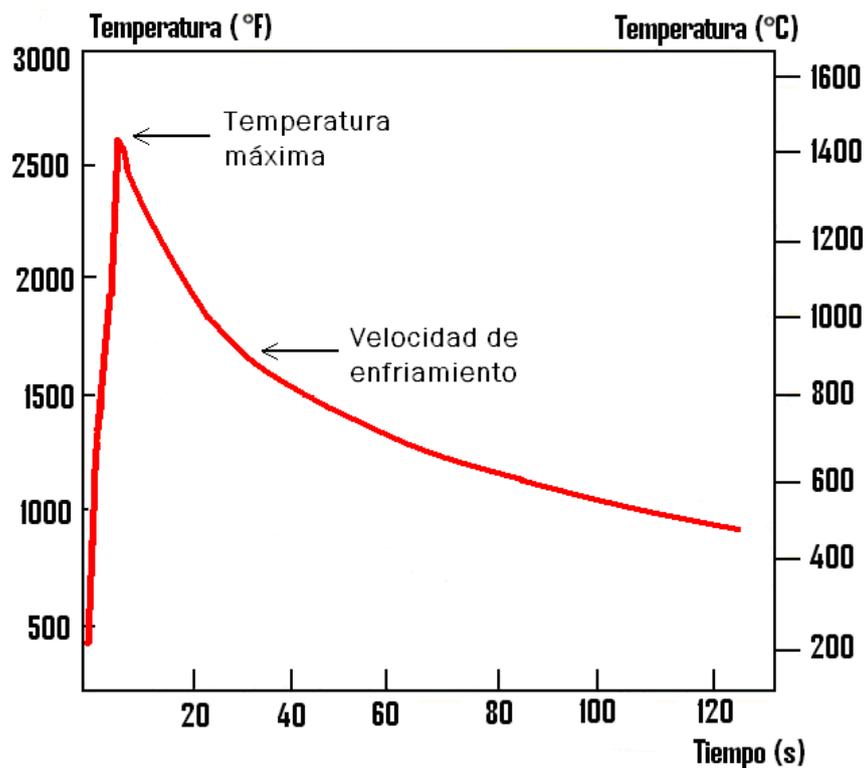


FIGURA 1.6: CURVA DE LA VELOCIDAD DE ENFRIAMIENTO DE UN ACERO (1).

Después que un punto en el metal fundido o en sus proximidades ha alcanzado su máximo de temperatura, la velocidad a la cual se enfría puede tener un significativo efecto sobre la estructura metalúrgica y las propiedades mecánicas de la zona afectada por el calor (ZAC), veremos que no podemos hablar de una

velocidad de enfriamiento sino de varias velocidades de enfriamiento según sea la temperatura a la cual se encuentra el acero durante su enfriamiento.

A continuación se presenta la región de temperatura críticas para lo cual nos interesa conocer con que velocidad se enfría el acero, el rango está comprendida entre los 500°C y los 800°C , que corresponde a la zona superior de la curva de la "S" como puede observarse en la figura 1.17, la cual muestra una curva TTT de un acero AISI 4140 (aleado al Cr-Mo), donde hemos supuestos dos curvas de enfriamiento provenientes de un ciclo térmico. En este grafico se muestran curvas típicas de enfriamiento y la región de temperaturas considerada para determinar la velocidad de enfriamiento de un ciclo térmico de soldadura

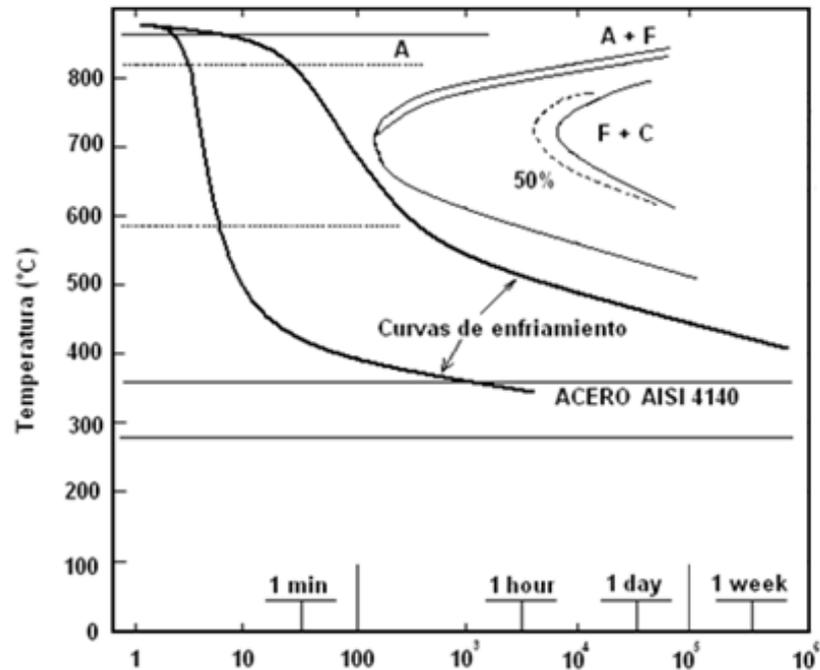


FIGURA 1.7: CURVA TTT DE UN ACERO AISI 4140 (1).

La utilidad de calcular una velocidad de enfriamiento a partir de los parámetros de soldadura proviene del hecho de conocer que el enfriamiento provocará en el acero microestructuras frágiles como aquellas obtenidas por la transformación martensítica. Para que la austenita se transforme en martensita, se requiere de enfriamientos que permitan que el acero se enfríe sin tocar la nariz de la curva TTT o curva de la “S”

Teniendo en cuenta esta consideración, podemos advertir que la zona de temperaturas en la que el acero se debe enfriar rápidamente es la región cercana a la nariz de la curva (500°C - 800°C). Por ello, la velocidad de enfriamiento que se suele emplear para caracterizar el ciclo de enfriamiento durante la soldadura se encuentra justamente en este rango de temperatura.

Pero aquí es importante hacer la siguiente observación: la templabilidad y la soldabilidad son conceptos antagónicos. Mientras que, por un lado, una buena templabilidad es ideal para alcanzar las mejores propiedades mecánicas en una pieza de acero; por otro lado, esa misma templabilidad contribuirá a generar grandes dificultades al momento de soldar dicho acero. Un acero altamente templable tiene una elevada tendencia a alcanzar transformación martensítica por acción de un enfriamiento rápido. Este mismo acero al ser soldado puede formar martensita en la ZAC durante el enfriamiento y provocar con ello la fragilidad del cordón y el riesgo a la fisuración en frío.

Este principio metalúrgico para las uniones soldadas lo podemos enunciar de una manera algo general: la unión soldada no debe admitir la presencia de constituyentes frágiles en su microestructura.

Uno de esos constituyentes tremendamente frágiles es justamente la martensita. Sin embargo, existen otros microconstituyentes (o combinaciones de ellos) que proporcionan un comportamiento frágil a la unión soldada y que, por tanto, también debe evitarse. El común denominador de todos ellos además de fragilizar la unión, es que se forma como consecuencia de enfriamientos rápidos desde las temperaturas de austenización. Por tanto, en términos generales, los aceros al carbono y de baja aleación deben ser soldados de acuerdo a un procedimiento que no provoque elevadas velocidades de enfriamiento después de la soldadura. Las condiciones específicas que permiten conseguir este objetivo dependerán del tipo de acero, el espesor de la plancha, el procedimiento de soldadura y el calor de porte empleado.

1.3 Influencia de las Propiedades Físicas en los Materiales Soldados.

1.3.1 Conductividad Térmica.

Es una propiedad física de los materiales y viene a ser la velocidad con la cual el calor fluye a través del material. Algunos materiales como los cerámicos tienen muy mala conductividad térmica, es decir; disipan con mucha dificultad el calor. Otros como los metales son muy buenos

conductores del calor y, por tanto se enfrían con más facilidad. La tabla 1 indica la conductividad térmica de algunos metales.

TABLA 1

VALORES DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA VARIOS METALES (1).

Metal o Aleación	Conductividad térmica a temperatura ambiente (cal/cm²/°C/s)
Aluminio (99.45%)	0.57
Aluminio 6061	0.41
Cobre	0.93
Latón Rojo	0.38
Cupro-Niquel	0.07
Níquel (99.95%)	0.22
Monel	0.062
Plata	1.0
Hierro piro	0.18
Acero (0.23%C, 0.64%Mn)	0.12
Acero inoxidable (Tipo AISI 410)	0.057
Acero inoxidable (Tipo AISI 304)	0.036

Observando los valores de la tabla 1.1, podemos constatar que entre los mismos metales existen grandes diferencias en la velocidad con que transmite calor. Así, por ejemplo, la plata y el cobre son los metales que conducen con mayor rapidez el calor, mientras que un cupro-níquel o un acero inoxidable son malos conductores de calor.

Mas aun, si observaos las conductividades térmicas del Cu y Ni y luego las comparamos con su aleación Cu-Ni, se puede comprobar que la conductividad térmica no es un valor intermedio entre ambas; sino, por lo contrario, menor que en los dos metales puros.

Por otro lado, la incidencia práctica que tiene la conductividad térmica en la soldadura de estos metales y aleaciones se la puede considerar de la siguiente manera: cuando se suelda un metal, este recibe calor muy puntual y luego lo transfiere (disipa) dentro del material gracias a su conductividad térmica. Si la conductividad térmica del metal es alta; la disipación será elevada y se producirá una disminución rápida de la temperatura en la zona caliente. En cambio, si la conductividad térmica del metal es baja, la zona de metal caliente permanecerá así por un periodo de tiempo mayor y hará más lento su enfriamiento.

La elevada conductividad térmica del cobre, por ejemplo, es la razón por la cual para soldarlo se requiere un elevado calor de aporte o precalentar la pieza con el objeto de obtener una unión adecuada.

El ciclo térmico (calentamiento/enfriamiento) que sufre un metal durante su soldadura condiciona los cambios microestructurales que el metal o aleación sufre y ello, a su vez, afecta las propiedades mecánicas de manera significativa. Por lo tanto, la conductividad térmica es una propiedad física muy importante a considerar el calor de aporte necesario para unir satisfactoriamente dos metales.

1.3.2 Dilatación Térmica.

La expansión térmica es el cambio de longitud que experimenta un material cuando su temperatura es incrementada. Esta viene expresada por la siguiente relación:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

\mathcal{E} : es la dilatación lineal (elongación térmica)

ΔT : es el incremento de temperatura que ha experimentado el material.

($^{\circ}\text{C}$)

α : es el coeficiente de dilatación térmica ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

Al igual que la conductividad térmica, el coeficiente de expansión térmica depende de la temperatura. La tabla 2 muestra los coeficientes de expansión térmica de algunos materiales.

TABLA 2
VALORES DE COEFICIENTES DE EXPANSION TERMICA PARA VARIOS METALES (1).

Material	Coeficiente de Expansión Térmica $\times 10^{-6} (^{\circ}\text{C}^{-1})$
Aluminio	24
Latón y Cobre	19
Cobre	17
Plomo	29
Acero	11
Invar (Ni – Fe)	0.9

Si tomamos como ejemplo una barra de 1 m de longitud de acero y ésta se calienta desde los 20°C hasta 120°C, la dilatación que se producirá en la barra será:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha \Delta T$$

Entonces

$$\Delta l = l_0 \alpha \Delta T \quad (\text{Ec. 1.2})$$

$$\Delta l = 11 \times 10^{-6} * 100 = 1100 \times 10^{-6} m = 1.1 mm$$

La barra de acero se dilataría 1.1 mm.

Durante la soldadura, el calentamiento local produce que el material sufra dilataciones en determinadas zonas de la pieza; ello puede traducirse en distorsiones o incluso en el origen de tensiones residuales. Además de la conductividad térmica y del coeficiente de dilatación, existen otras propiedades físicas del material que influye de manera importante en la soldadura, como son el punto de fusión, el calor específico, el límite elástico y el módulo elástico.

1.4 Efectos de las Dilataciones y Contracciones no Uniformes.

Cuando se calienta una pieza se dilata, es decir aumenta su volumen, y cuando se enfría se contrae volviendo a su forma original, siempre que no se ha impedido de alguna forma su dilatación, o su contracción, y tanto el calentamiento como el enfriamiento se hayan realizado de forma uniforme; sin embargo, cuando el calentamiento no es uniforme, o se impide la dilatación y contracción de la pieza, ésta se deforma. Por ejemplo, en la figura 1.8 se ha presentado un bastidor de acero en el que se ha calentado de una cierta longitud L_0 como se muestra en la figura 1.8 (a), que se alarga localmente de L_0 a L_1 produciendo una deformación en el resto del bastidor, como se muestra en la figura 1.8 (b). La parte que permanece fría y que esta deformada tendera a volver a su posición original, para lo cual obligará a la parte calentada a deformarse, consiguiéndolo por que el calor ha reducido la resistencia mecánica de la parte caliente, así como se muestra en la figura 1.8 (c). Cuando se enfríe del todo se contraerá (L_2 menor que L_0) deformando de nuevo el bastidor.

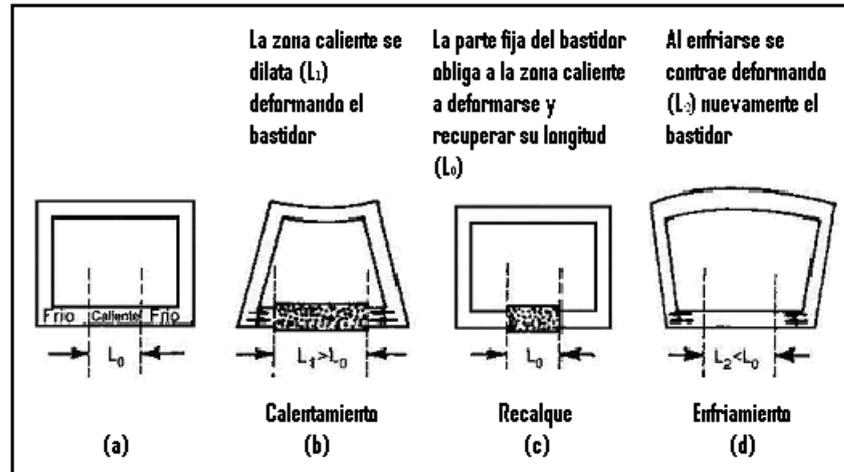


FIGURA 1.8: SIMULACIÓN DE LA DEFORMACIÓN PROVOCADA POR UN CALENTAMIENTO LOCAL (2).

Durante la soldadura se producen calentamientos locales de las piezas, como se muestra en la figura 1.8, la zona fría de la pieza impedirá la libre dilatación y contracción de la parte caliente que se traducirá en una deformación.

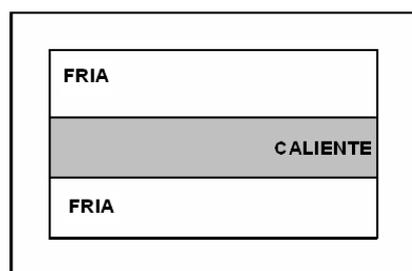


FIGURA 1.9: CALENTAMIENTO LOCAL PRODUCIDO DURANTE LA SOLDADURA DE DOS PLACAS.

Se observa, por lo tanto que como consecuencia de enfriamientos y calentamientos no uniformes se producen:

- ✓ Deformaciones en las piezas
- ✓ Tensiones internas o residuales, que permanecerán en las piezas aún después de retirar todos los esfuerzos o cargas externas.

Si se impide la deformación de las piezas se producen tensiones internas, aumentando el riesgo de fallo, es decir el riesgo de rotura de la pieza. Tanto en las soldaduras en ángulo como en las realizadas a tope, interesa distinguir la contracción longitudinal y la contracción transversal que se originan por estos calentamientos y enfriamientos.

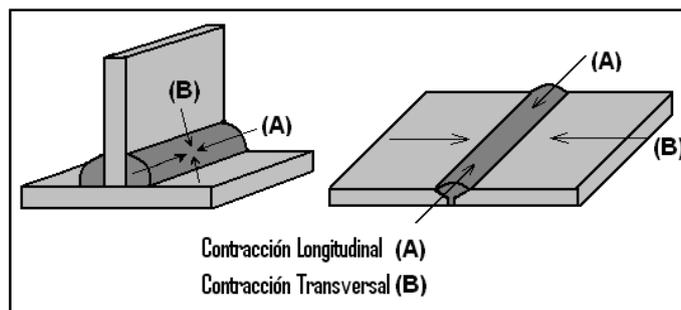


FIGURA 1.10: DIRECCIONES DE LAS CONTRACCIONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES. (2)

- **Contracción Longitudinal.**- Se produce en el sentido del eje longitudinal de la unión soldada tal como lo muestra la figura 1.10 en las flechas (A), esta contracción produce deformaciones como la presentada en la figura 1.11

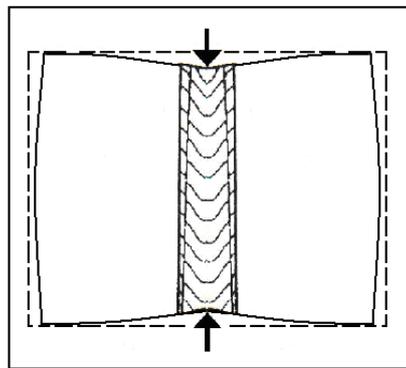


FIGURA 1.11: DEFORMACIÓN POR CONTRACCIÓN LONGITUDINAL EN UNA JUNTA A TOPE (2).

Esta contracción en dos placas soldadas a tope es la que menos problemas presenta debido a que ésta no se contrae de tal manera que afecte a la pieza soldada.

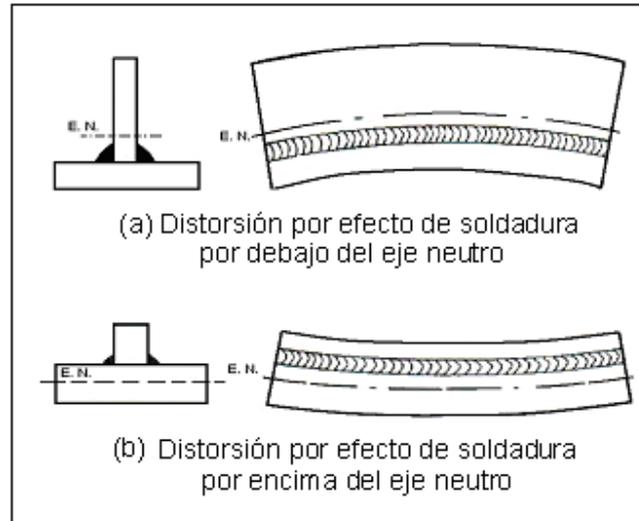


FIGURA 1.12: DISTORSIÓN EN UNA SOLDADURA EN ANGULO O DISTORSIÓN LONGITUDINAL POR FLEXIÓN (2).

En la fabricación de vigas I se suele topar con este problema, y para poder solucionar la distorsión, los fabricantes calientan la viga y la enfrían hasta que el nivel de distorsión se haya reducido de tal manera que no afecte a la estructura a la cual va hacer montada.

- **Contracción Transversal.-** Se produce en sentido perpendicular al cordón de soldadura, tal como se muestra en la figura 1.10 en las flechas (B). Igualmente esta contracción produce deformaciones como la presentada en la figura 1.13

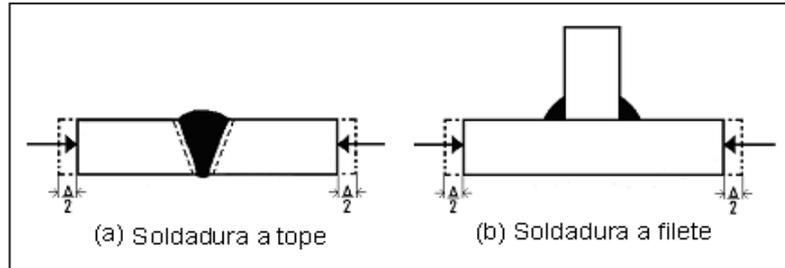


FIGURA 1.13: DEFORMACIÓN POR CONTRACCIÓN TRANSVERSAL (5)

- **Distorsión Angular.-** Es una parte de la transversal y proviene de que un cordón de soldadura de sección triangular se contrae transversalmente de modo desigual, como se muestra en la figura 1.14 y 1.15

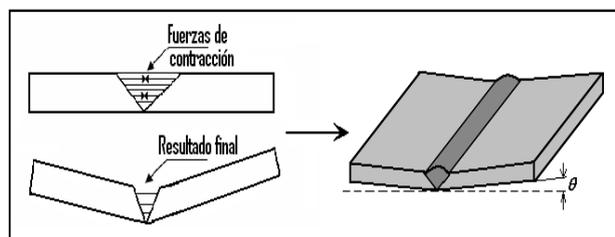


FIGURA 1.14: DEFORMACIÓN ANGULAR EN UNA UNIÓN A TOPE

(2).

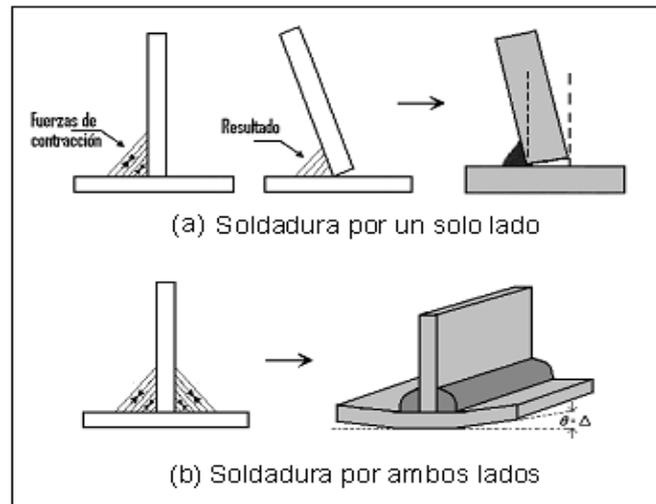


FIGURA 1.15: DEFORMACIÓN ANGULAR EN UNA UNIÓN A FILETE (2).

Brevemente se explicó las distorsiones que sufren las placas de acero debido al calentamiento y enfriamiento que se da en un proceso de soldadura. En el capítulo 3 se detalla estas distorsiones.

CAPÍTULO 2

2. ESFUERZOS TÉRMICOS Y RESIDUALES.

2.1 Esfuerzos Residuales

Los esfuerzos residuales son esfuerzos que están presentes en el interior del material y que permanecen en él cuando se eliminan todas las cargas aplicadas. Las tensiones residuales originadas por la soldadura se producen como consecuencia de las diferentes dilataciones y contracciones generadas al calentar localmente el material y también por los cambios dimensionales que son inducidos por las transformaciones microestructurales que se presentan.

Imaginemos que tenemos una estructura constituida por tres barras, dos de las cuales (las externas) son de cobre; mientras que la barra central es

de acero. Originalmente, todas tienen las mismas dimensiones y están unidas rígidamente a dos bloques de acero (figura 2.1a). Cuando este componente esta a 20°C (temperatura a la cual fue montado), los esfuerzos residuales en la estructura son nulos.

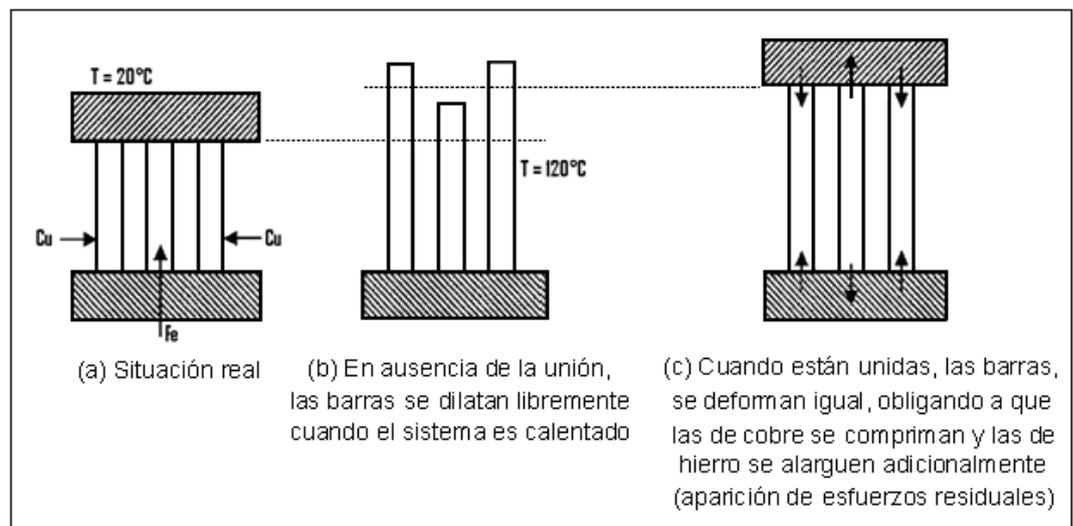


FIGURA 2.1: ELONGACIONES DE DIFERENTES ACEROS A UNA MISMA TEMPERATURA (2).

Cuando este componente es calentado hasta 120°C , provoca la dilatación de las barras. Sin embargo, los coeficientes de dilatación para el acero y el cobre son diferentes lo que provocaría alargamientos distintos (Figura 2.1b). Pero al estar todas ellas unidas entre sí a través de un elemento rígido e indeformable, el alargamiento de cada una de ellas debe ser el mismo. Por lo tanto, la barra de

hierro que se dilata menos que las barras de cobre deberá alargarse adicionalmente y las barras de cobre deberá comprimirse hasta alcanzar un estado final en el que las fuerzas de compresión y tracción internas estén en equilibrio (Figura 2.1c). Si la longitud de las barras es de 1m, la dilatación producida en las barras de cobre y acero por el aumento de la temperatura se la obtiene utilizando la ecuación 1.2

$$\Delta l_{Cu} = l_0 \alpha_{Cu} \Delta T = 1 * 17E - 6 * 100 = 1.7mm$$

$$\Delta l_{Fe} = l_0 \alpha_{Fe} \Delta T = 1 * 11E - 6 * 100 = 1.1mm$$

Si ahora asumimos que en realidad todo el sistema debe alargarse un Δl , de manera que las fuerzas internas alcancen el equilibrio, tendríamos la siguiente relación:

La barra de hierro (Fe) debe alargarse una longitud adicional “ $\Delta l - 1.1$ ”

La barra de cobre (Cu) debe comprimirse una longitud igual a “ $1.7 - \Delta l$ ”

Para alcanzar estas condiciones, deben aparecer fuerzas internas que actúen en las direcciones de las deformaciones. Por tanto, en la barra de acero aparecerá

un esfuerzo interno (residual) de tracción (σ_{Fe}) y las barras de cobre estarán sometidas a un esfuerzo de compresión (σ_{Cu}). Como el sistema de fuerzas internas finalmente debe alcanzar el equilibrio, se debe cumplir que:

$$\sum F_y = 0 \quad (\text{Ec. 2.1})$$

$$\sigma_{Fe} \times \text{Área} = 2 \sigma_{Cu} \times \text{Área}$$

Asumiendo que las barras se encontraran sometidas a esfuerzos en el campo elástico lineal y que son geoméricamente iguales (igual área y longitud inicial), podemos relacionar los esfuerzos internos con las deformaciones a través de:

$$\sigma_{Cu} = E_{Cu} \varepsilon_{Cu} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

$$\sigma_{Fe} = E_{Fe} \varepsilon_{Fe} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Reemplazando en la ecuación 2.1 se obtiene:

$$E_{Fe} \varepsilon_{Fe} = 2E_{Cu} \varepsilon_{Cu} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Entonces:

$$2 \times 10^4 \frac{(\Delta l - 1.1)}{1000} = 2 * 1.24 \times 10^4 \frac{(1.7 - \Delta l)}{1000}$$

Resolviendo la ecuación anterior se tiene que $\Delta l = 1.43 \text{ mm}$. Estas condiciones provocan la presencia de esfuerzos internos de tracción en el acero de $\sigma_{Fe} = 70 \text{ Mpa}$ y esfuerzos de compresión en las barras de Cu de 35 Mpa.

2.2 Clasificación de los Esfuerzos Residuales.

Los esfuerzos residuales se clasifican en: Esfuerzos Residuales Macroestructurales y Esfuerzos Residuales Microestructurales. Las dilataciones producidas por el calentamiento de una placa durante su soldadura pueden originar esfuerzos residuales macroestructurales, mientras que transformaciones microestructurales (como la formación de martensita en el acero) puede dar origen a esfuerzos residuales microestructurales.

Un ejemplo de esfuerzos residuales macroestructurales es mostrado en la figura 2.2 cuando una estructura esta calentada por radiación solar en un lado, distorsiones térmicas y esfuerzos térmicos se producen en la estructura, así como se muestra en la figura 2.2(a). El esfuerzo residual producido por la soldadura es mostrado en la figura 2.2 (b) y se puede observar que estos esfuerzos son confinados a áreas cercas a la soldadura.

Los esfuerzos residuales microestructurales son producidos en aceros debido a la transformación martensítica.

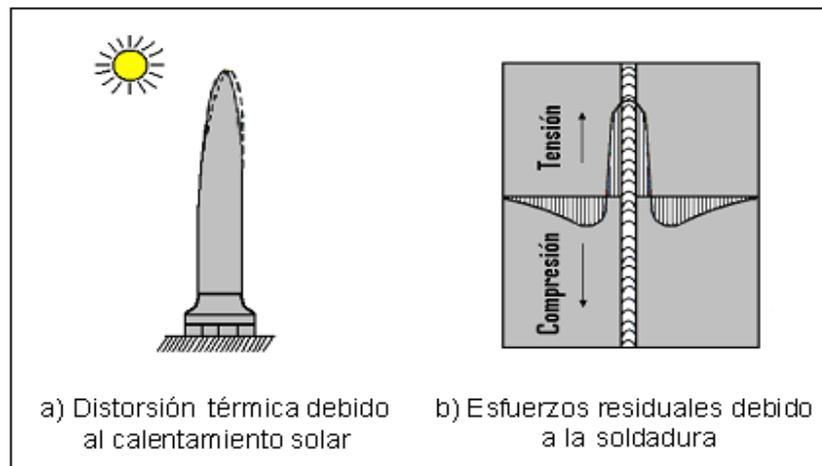


FIGURA 2.2: ESFUERZOS RESIDUALES MACROSCÓPICOS EN VARIAS ESCALAS (3).

2.3 Generación de Esfuerzos Residuales.

Como resultado del calentamiento y enfriamientos dispares y la carencia de dilatación y contracción libres, se establecen esfuerzos en la zona de soldadura, los cuales son: esfuerzos térmicos que se crean por el calentamiento del metal y los esfuerzos residuales que permanecen después del enfriamiento y dan origen a la mayoría de los problemas en las piezas soldadas.

De una manera más específica, el gradiente de temperatura que se crea al soldar, acompañado del número de pases dan origen a esfuerzos que causan cambios en la microestructura de los metales. Si los metales tuviesen un coeficiente de dilatación térmica de cero, los esfuerzos no podrían desarrollarse en la soldadura y por lo tanto no habría contracciones ni distorsiones en elementos soldados, pero como se sabe que todos los metales se expanden y se contraen cuando se calientan y se enfrían causando cambios en el volumen de la pieza en conjunto, o sea; cambios en las dimensiones.

Como se había indicado, los elementos soldados pueden sufrir contracciones transversales, longitudinales y distorsiones angulares si no son debidamente prevenidos; por lo que, el término contracción significa disminución de volumen o sea; la disminución del espacio ocupado por el metal fundido al solidificarse. Esto se debe a que los átomos de hierro están asumiendo posiciones arregladas en las estructuras cristalinas de los granos sólidos en crecimiento por lo que el metal soldado o fusionado no puede ejercer tensión sobre el metal base adyacente.

Sin embargo, inmediatamente después de la solidificación, el metal continúa contrayéndose, ésta contracción térmica es lo contrario de la expansión térmica durante el calentamiento. Es necesario mencionar que la contracción del metal sólido durante el enfriamiento genera esfuerzos residuales, pero el máximo esfuerzo tendrá como valor máximo el límite elástico. La distorsión angular ocurre como resultado de la soldadura, a causa de los esfuerzos que se desarrollan por las expansiones y contracciones térmicas localizadas.

A su vez, los esfuerzos residuales en una unión soldada son causados por contracciones del metal forzado, y la deformación plástica producida en el metal base cerca de la soldadura, durante el proceso de soldadura. Sin embargo, es

enteramente posible bajo ciertas circunstancias contener completamente estos esfuerzos residuales en el metal, sin que ocurra distorsión.

Es importante ahora mencionar que los esfuerzos residuales debido a soldaduras se presentan no solamente a causa de la variación en la contracción de áreas calentadas desigualmente, si no también como resultado del efecto de temple de la superficie y la transformación de la austenita.

El concepto esfuerzo térmico de compresión resultante, corresponderá a aquella que produce una reducción de volumen equivalente a la acción de impedimento de movimiento. Cuando la máxima temperatura alcanzada, no exceda de cierto valor, dicho esfuerzo se encontrará en el campo elástico y su valor será igual al múltiplo de la deformación específica ($\Delta L/L_0$) por el modulo de elasticidad del material.

$$\sigma = \varepsilon E \quad (\text{Ec. 2.5})$$

En el caso de una unión soldada, en la zona afectada por el calor (ZAC), donde se supera el valor de temperatura del campo elástico, la tensión de compresión tiende a superar la de fluencia a esa temperatura, pero en ningún momento lo

logra. El proceso inverso ocurre durante el enfriamiento en condiciones de movimiento restringido, las zonas que se vieron durante la deformación plástica en caliente, resultan cortas para ocupar los nuevos espacios alcanzados y aparecen entonces, tensiones térmicas de tracción. Al alcanzarse la temperatura ambiente habrán quedado tensiones térmicas permanentes de tracción cuyo valor es del orden del límite de fluencia del material.

A continuación se presenta un ejemplo de como se desarrollan los esfuerzos residuales en elementos soldados.

Relaciones de Esfuerzo (σ) – Deformación (ϵ).

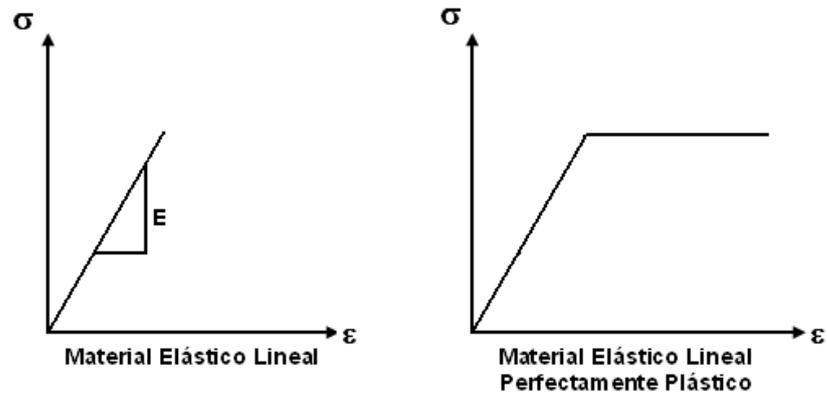


FIGURA 2.3: GRAFICAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN

Se asume que el esfuerzo de fluencia (F_Y) es el máximo

Las tensiones (Esfuerzos - σ), usualmente expresada en carga de fuerza por área se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

P = fuerza de tracción total, (N, Kg)

A = área de la sección transversal, (m^2 , pulg^2)

σ = (Pa, psi)

Las deformaciones (ε) ocurren cuando se aplican cargas y la pieza varía su longitud inicial.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

ΔL = variación de longitud, (mm, pulg)

L_0 = longitud inicial, (mm, pulg)

ε = (adimensional)

En los análisis de tensiones se acostumbra asumir que el material es puramente elástico, homogéneo e isotrópico (las propiedades del material son las mismas en todas las direcciones) de acuerdo con la ley de Hooke por lo que las deformaciones y tensiones son proporcionales como muestra:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - V(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (\text{Ec. 2.8})$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - V(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (\text{Ec. 2.9}) \quad (V = \text{Coeficiente de Poisson})$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - V(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

Deformación Total:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{elástica} + \mathcal{E}_{térmica} + \mathcal{E}_{plástica} = \mathcal{E}_e + \mathcal{E}_t + \mathcal{E}_p \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde: $\mathcal{E}_{térmica} = \alpha \Delta T$ (α = coeficiente de expansión térmica)

En 1- Dimensión:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \sigma \Delta T + \varepsilon_p \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Quedando de esta forma demostrado que la tensión va a ser proporcional a la deformación del material y viceversa

Para que se pueda comprender el fenómeno anterior se explica un clásico sistema de tres barras utilizado por Masubushi K, el cual de una forma elemental explica las variaciones que se producen en una barra central.

Figura 2.4 (Analogía de las tres barras)

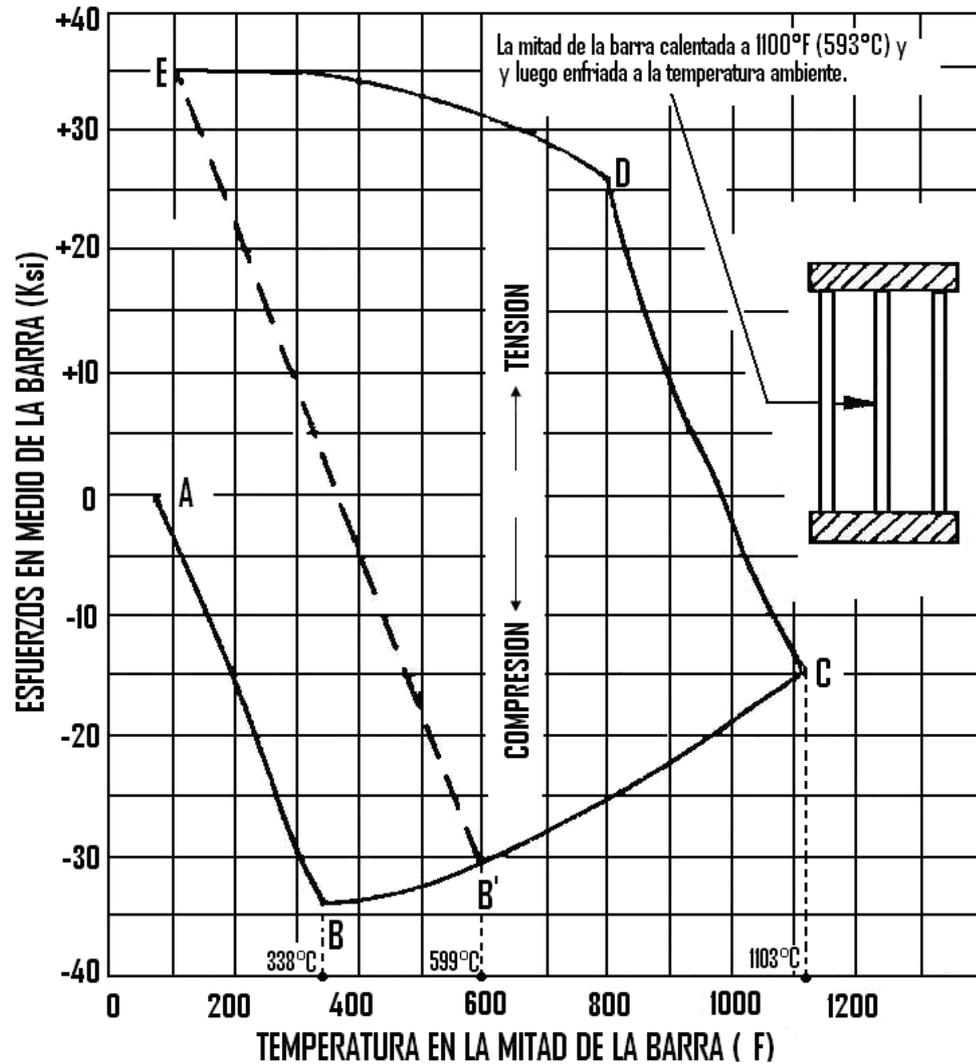


FIGURA 2.4: ANALOGÍA DE LAS TRES BARRAS (4).

La analogía de las tres barras proviene de la unión soldada de dos placas, el cordón de soldadura aplicado produce un gradiente de temperatura ΔT , donde el

cordón de soldadura representa una barra del medio (m) y las placas representan las dos barras restantes (s). (Figura 2.5)

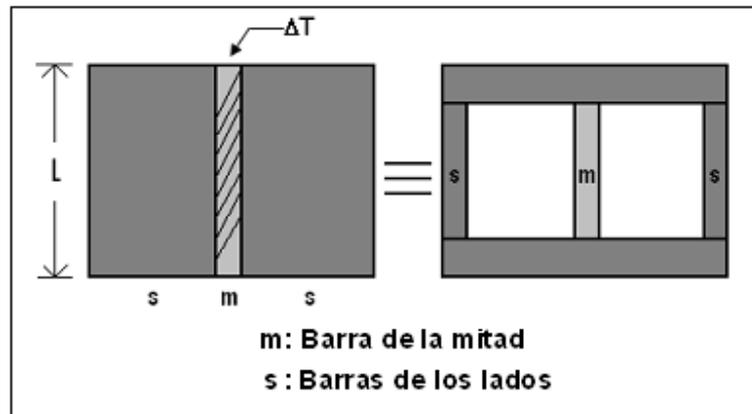


FIGURA 2.5: REPRESENTACIÓN DE LA ANALOGÍA DE LAS 3 BARRAS (4).

La curva representa la evolución de las tensiones en la barra central como consecuencia de un ciclo de calentamiento de la misma hasta una temperatura de 593°C (1100°F) y posterior enfriamiento hasta la temperatura ambiente. La curva entre los puntos A y B representa la generación de tensiones (elásticas) de compresión debido a que la barra central al calentarse tiende a dilatar pero esta dilatación es impedida por las dos barras laterales cuya temperatura no se modifica. Al llegar a la temperatura correspondiente al punto B, un calentamiento posterior de la barra produce una disminución de las tensiones de compresión por que a esta temperatura se produce el ablandamiento del material que por lo

tanto se deforma plásticamente relajando las tensiones. Alcanza la temperatura pico en el punto C, comienza el enfriamiento y la barra central experimenta ahora una contracción, que al ser impedida por las barras laterales genera una tensión de tracción (elástica) que aumenta linealmente como lo muestra la parte CD de la curva. Finalmente al alcanzarse el punto D, la tensión de tracción es lo suficientemente alta para producir la deformación plástica en tracción del material, que fluye plásticamente hasta alcanzar el punto E que es donde culmina el ciclo.

Puede verse que como consecuencia del ciclo térmico experimentado por la barra central, se generó una tensión residual de tracción en la misma y por lo tanto tensiones residuales de compresión equilibrantes en las barras laterales.

Es interesante observar que si se produce un nuevo ciclo térmico en la barra central, el nuevo ciclo producirá la evolución de las tensiones dada por la curva EB'CDE, ya que ahora el punto inicial del ciclo se encuentra en E en lugar de A pero esto no modifica el valor de la tensión residual resultante del segundo ciclo o de ciclos posteriores.

Por lo que se concluye que cualquier proceso que aporte calor en forma localizada sobre una pieza de acero y de tal manera que a la temperatura final se produzcan deformaciones plásticas, dejará en dicha pieza tensiones residuales de valor generalmente igual o muy próximo al límite de fluencia del material a temperatura ambiente.

Ejemplo de contracción longitudinal.

a. Sin Restricción Externa:

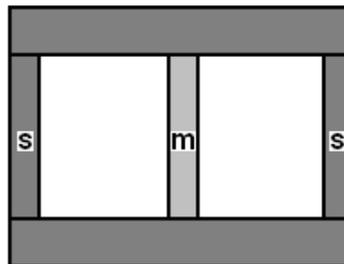


FIGURA 2.6: CONTRACCIÓN LONGITUDINAL SIN RESTRICCIÓN EXTERNA (4).

$$\varepsilon_{Total} = \frac{\sigma_m}{E} + \alpha\Delta T + \varepsilon_p = \frac{\sigma_s}{E} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Caso 1: $\sigma_m < F_y$; entonces: $\varepsilon_p = 0$

EQUILIBRIO: $\sum F = 0$; **Áreas:** $A_m = A_s$

$$2\sigma_s A + \sigma_m A = 0; \text{ Donde } \sigma_s = -\frac{\sigma_m}{2} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

$$\text{Reemplazando: } -\frac{\sigma_m}{2E} = \frac{\sigma_m}{E} + \sigma\Delta T \quad (\text{Ec. 2.15})$$

$$\text{Entonces los esfuerzos térmicos son: } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = -\frac{2}{3}\alpha\Delta TE \\ \sigma_s = \frac{1}{3}\alpha\Delta TE \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.16, 2.17})$$

Al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$; por tanto no hay esfuerzos residuales ni distorsión

Caso 2. Si ΔT es Grande: $\sigma_m \longrightarrow F_y$, entonces $\varepsilon_p \neq 0$

$$\text{Los esfuerzos térmicos son: } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = -F_y \\ \sigma_s = -\frac{\sigma_m}{2} = \frac{F_y}{2} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.18, 2.19})$$

Al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$

Por lo tanto:

Esfuerzos residuales:
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = F_Y \\ \sigma_s = -\frac{F_Y}{2} \end{array} \right\} \text{ (Ec. 2.20, 2.19)}$$

Distorsión:
$$\Delta = \frac{\sigma_s L}{E} = -\frac{F_Y L}{2E} \text{ (Ec. 2.21)}$$

Ejemplo de contracción longitudinal.

b. Con Restricción Externa:

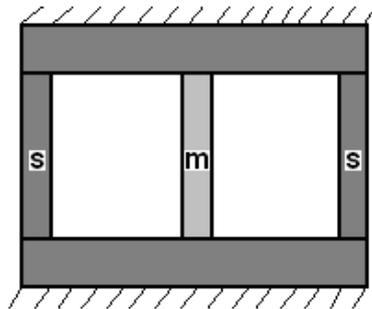


FIGURA 2.7: CONTRACCIÓN LONGITUDINAL CON RESTRICCIÓN EXTERNA (4).

Caso 1: $\sigma_m < F_y$; entonces: $\varepsilon_p = 0$

$$\varepsilon_{Total} = \frac{\sigma_m}{E} + \sigma\Delta T = 0 \quad (\text{Ec. 2.22})$$

Se iguala a cero por que esta restringido

$$\text{Los esfuerzos térmicos son: } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = -\alpha\Delta TE \\ \sigma_s = -\frac{\sigma_m}{2} = -\frac{\alpha\Delta TE}{2} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.23, 2.24})$$

Al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$

Por lo tanto: (Restricción no removida)

$$\text{Esfuerzos residuales: } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = F_y \\ \sigma_s = -\frac{F_y}{2} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.25, 2.26}) \text{ y Distorsión} = 0$$

Caso 2. Si ΔT es Grande: $\sigma_m \longrightarrow F_y$, entonces $\varepsilon_p \neq 0$

$$\text{Los esfuerzos térmicos son: } \left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = -F_y \\ \sigma_s = -\frac{\sigma_m}{2} = \frac{F_y}{2} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.27, 2.28})$$

Al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$

$$\varepsilon_{Total} = \frac{\sigma_s}{E} = \frac{\sigma_m}{E} + \varepsilon_p = \frac{\sigma_m}{E} - \frac{F_y}{E} \quad (\text{Ec. 2.29})$$

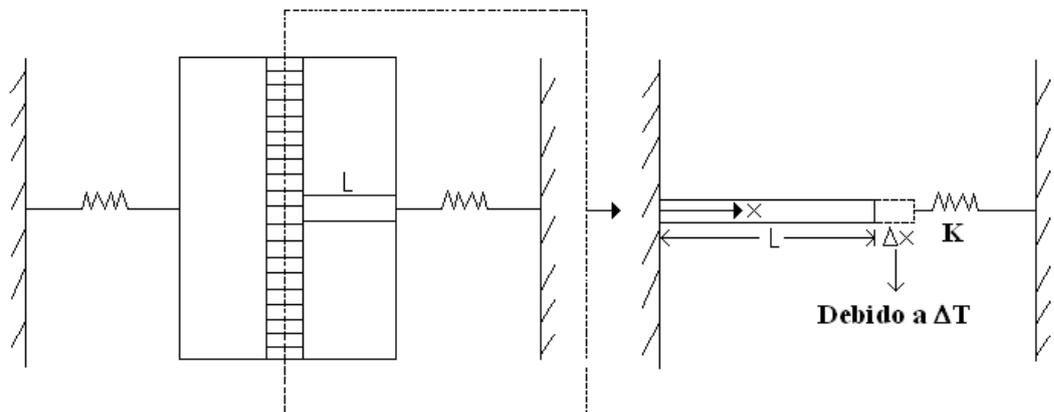
Por lo tanto: (Restricción removida)

Esfuerzos residuales:
$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_m = \frac{2}{3} F_Y \\ \sigma_s = -\frac{F_Y}{3} \end{array} \right\} \quad (\text{Ec. 2.30, 2.31}) \quad \text{y}$$

Distorsión:
$$\Delta = \frac{\sigma_s L}{E} = -\frac{F_Y L}{3E} \quad (\text{Ec. 2.32})$$

Comparando estos dos últimos ejemplos podemos decir que la restricción externa disminuye los esfuerzos residuales y distorsión.

Ejemplo de contracción Transversal



K: Grado de Restricción

FIGURA 2.8: ESQUEMATIZACIÓN DE LA CONTRACCIÓN TRANSVERSAL (4).

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta x}{L} = \frac{\sigma_x}{E} + \sigma \Delta T + \varepsilon_p \text{ (Ec. 2.33)}$$

EQUILIBRIO: $\sum F = 0$;

Donde: $\sigma_x A = -K\Delta x$; (A: área) (Ec. 2.34)

Reemplazando:

$$\Delta x = -\frac{\sigma_x A}{K}$$

$$\frac{\Delta x}{L} = -\frac{\sigma_x A}{KL} = \frac{\sigma_x}{E} + \sigma \Delta T + \varepsilon_p$$

Entonces: $\sigma_x = \frac{-EKL(\alpha \Delta T + \varepsilon_p)}{EA + KL}$ (Ec. 2.35)

Donde este es el esfuerzo térmico en compresión; donde:

$$\Delta T = \frac{T - T_0}{2} \text{ (Ec. 2.36)}$$

Tenemos dos casos:

Caso 1: Si ΔT es Pequeño: $|\sigma_x| < F_y$, entonces $\epsilon_p = 0$ (siempre ocurre)

Entonces el esfuerzo térmico es: $\sigma_x = \frac{-EKL\alpha\Delta T}{EA + KL}$ (Ec. 2.37)

Al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$; entonces $\sigma_x = \sigma_{Termico} = 0$

Y por tanto no hay esfuerzos residuales ni distorsión

Cuando el $\sigma_{Termico} > F_y$ entonces se produce el esfuerzos residuales.

Caso 2; Si ΔT es Grande: $\sigma_x \longrightarrow F_y$, entonces $\epsilon_p \neq 0$

El esfuerzo térmico es: $\sigma_x = -F_y$ (Ec. 2.38)

EQUILIBRIO: $\sum F = 0$;

Donde:

$$\sigma_x A = -K\Delta x$$

$$\Delta x = -\frac{\sigma_x A}{K}$$

$$\varepsilon_X = \frac{\Delta_X}{L}; \quad \varepsilon_X = -\frac{\sigma_X A}{KL}$$

Y como: $\sigma_X = -F_Y$; Entonces:

$$\varepsilon_X = \frac{F_Y A}{KL} \quad (\text{Ec. 2.39})$$

$$\varepsilon_X = \frac{F_Y A}{KL} = \frac{\sigma_X}{E} + \sigma \Delta T + \varepsilon_p$$

Por tanto la deformación plástica:

$$\varepsilon_p = F_Y \left[\frac{A}{KL} + \frac{1}{E} \right] - \sigma \Delta T \quad (\text{Ec. 2.40})$$

Y al enfriarse: $\Delta T \longrightarrow 0$; no hay $\varepsilon_{\text{térmica}}$

$$\varepsilon_X = \varepsilon_{\text{elástica}} + \varepsilon_{\text{plástica}} = \varepsilon_e + \varepsilon_p$$

Y como $\sigma_{\text{Termico}} > F_y$; entonces:

El esfuerzo residual: σ_r

$$-\frac{\sigma_r A}{KL} = \frac{\sigma_r}{E} + \varepsilon_p$$

Entonces el esfuerzo residual es:
$$\sigma_r = -\frac{\varepsilon_p}{\frac{A}{KL} + \frac{1}{E}} \quad (\text{Ec. 2.41})$$

Y la distorsión viene dada como:
$$\Delta x = -\frac{\sigma_r A}{K} \quad (\text{Ec. 2.42})$$

2.4 Distribución de los Esfuerzos Residuales en Elementos Soldados.

Para visualizar mejor como se distribuyen los Esfuerzos Residuales en una estructura soldada tenemos un caso muy sencillo: una soldadura a tope de dos planchas. La figura 2.9 muestra los esfuerzos internos a lo largo del cordón (σ_x) y los esfuerzos transversales (σ_y).

En ella se puede apreciar que a lo largo del cordón se forman altos esfuerzos residuales de tracción, los cuales descienden rápidamente conforme se alejan de la soldadura hasta convertirse en esfuerzos residuales de compresión en el material base. Aquí es importante tener en cuenta dos variables: el esfuerzo residual máximo de tracción presente ($\sigma_{max} = \sigma_m$) y el ancho de la zona traccionada (**2f**). De acuerdo con ello, la distribución de las tensiones residuales longitudinales puede ser aproximadamente a la siguiente relación:

$$\sigma_x(y) = \sigma_{\max} \left\{ 1 - \left(\frac{y}{f} \right)^2 \right\} e^{\left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{y}{f} \right)^2 \right\}}$$

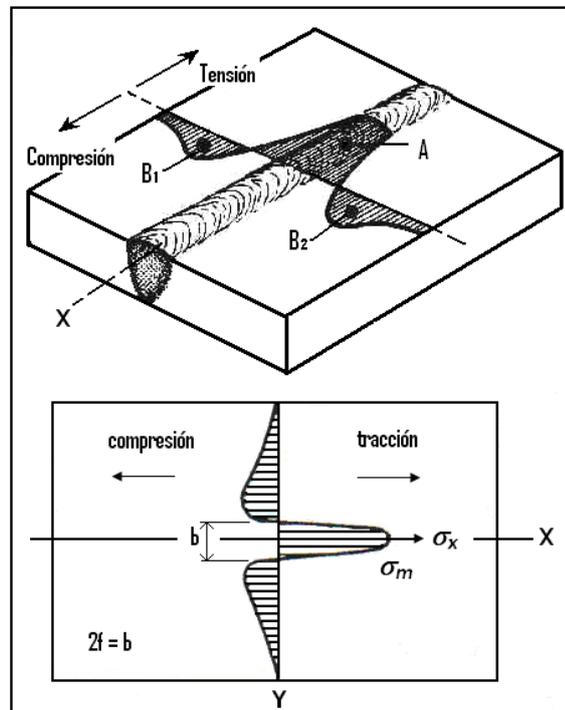


FIGURA 2.9: DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES LONGITUDINALES EN UNA PLACA DEBIDO AL PROCESO DE SOLDADURA (1).

La misma soldadura provoca esfuerzos residuales transversales al cordón, pero de menor magnitud. Sin embargo pueden aumentar cuando se restringe la contracción lateral de las planchas al momento de soldarlas. La figura 2.10 muestra la distribución de estos esfuerzos en la misma plancha soldada. Cuando las planchas son fijadas a través de dispositivos de manera que se impide su deformación en la dirección perpendicular al cordón, aparecen esfuerzos de tracción uniformes a lo largo de la soldadura que se suman a las tensiones residuales e incrementan la tensión máxima en la dirección transversal.

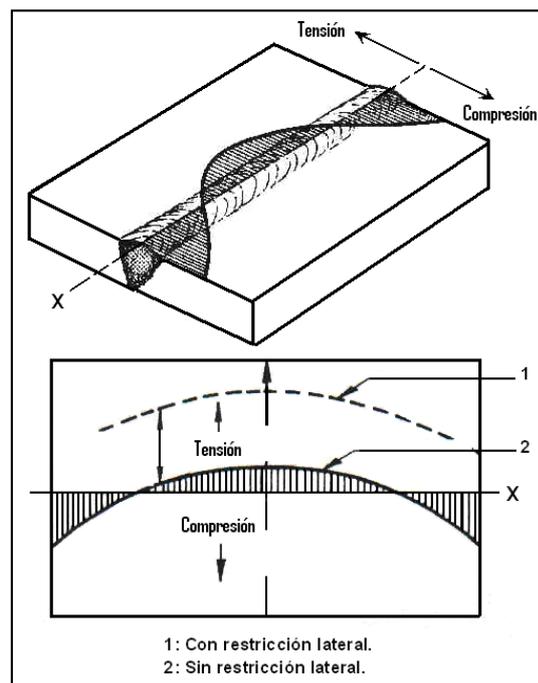


FIGURA 2.10: ESFUERZOS RESIDUALES TRANSVERSALES (1).

La soldadura en filete también produce tensiones residuales y genera siempre que el cordón este sometido a esfuerzos internos de tracción, tanto longitudinales como transversales, como se puede ver en la figura 2.11.

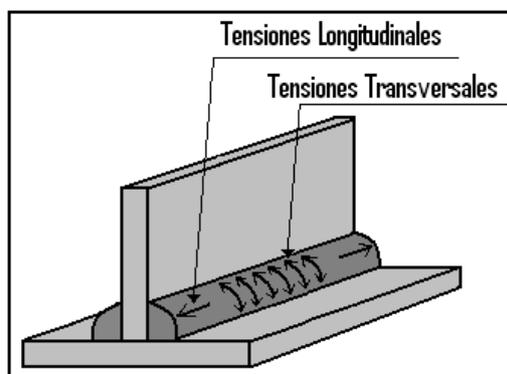


FIGURA 2.11: TENSIONES LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES (2).

A continuación se explica (sobre la base de lo planteado por Masubushi K.) el curso de acontecimientos térmicos y movimientos de expansión - contracción cuando se efectúa un cordón de soldadura sobre una plancha de acero lo cual se puede dividir en 4 secciones tal como lo muestra la figura 2.12.

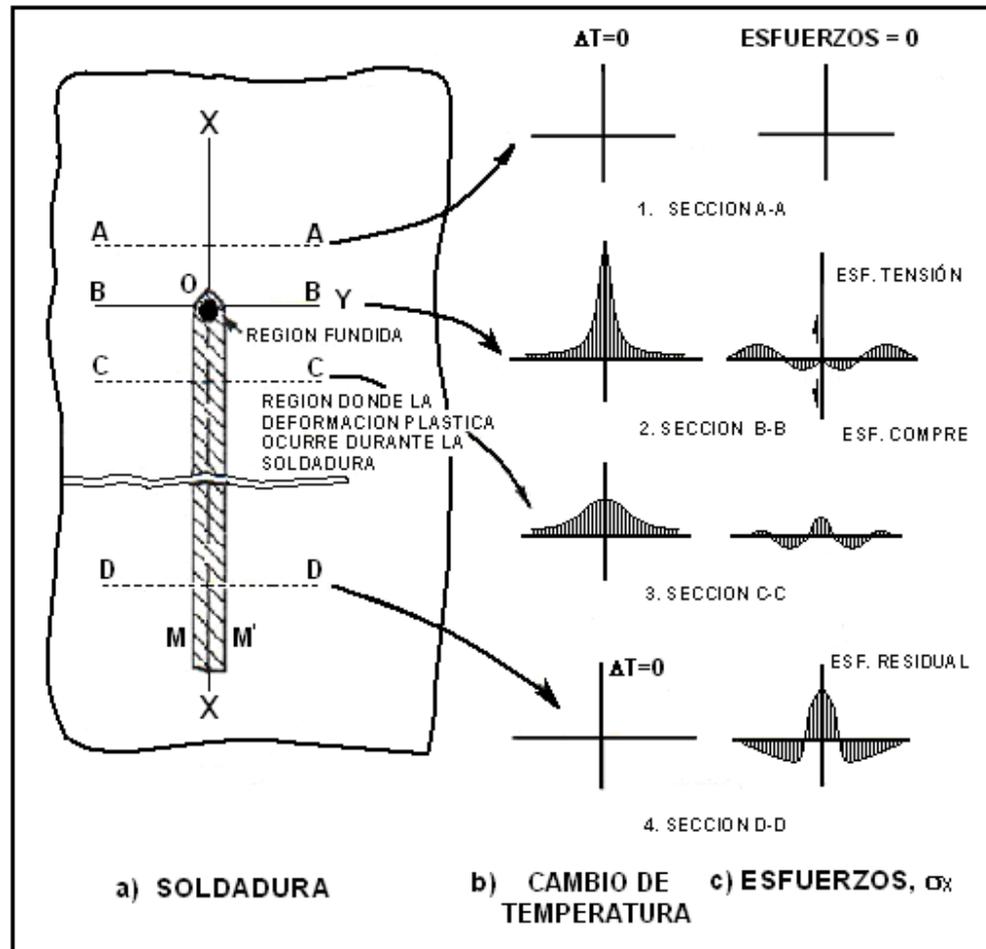


FIGURA 2.12: FLUJOGRAMA DE DISTRIBUCIÓN Y ESFUERZOS RESIDUALES (3).

En esta aplicación, una plancha esta siendo soldada, el cordón de soldadura esta siendo depositado a lo largo de la línea X-X. El arco de soldadura, el cual se

mueve a velocidad “v” y está localizado en el punto “O” como se indica en la figura 2.12 (a)

La figura 2.12 (b) muestra la distribución de temperatura transversal al eje X-X y enfoca a los puntos A, B, C, D. Y en la figura 2.12(c) se encuentra la distribución de esfuerzos para los mismos puntos.

SECCION A – A

A través de la sección A-A, la cual esta adelante del arco de soldadura, el cambio de temperatura ΔT , debido a la soldadura es esencialmente cero y no se encuentran esfuerzos residuales en dicho punto.

SECCION B – B

Ubicada en el centro del arco experimenta un súbito crecimiento de temperatura hasta alcanzar el valor máximo, se produce la elevación de temperatura de las zonas adyacentes. Este aumento de temperatura provoca la dilatación del metal y consecuentemente aparecen tensiones de compresión en las zonas adyacentes al metal fundido.

En las zonas más alejadas y frías, responsables de no permitir la libre expansión de las zonas que se dilatan aparecen tensiones de tracción para mantener el equilibrio de tensiones de la pieza. El metal fundido carece de resistencia mecánica, por lo que en el centro de la soldadura la tensión tendrá valor cero

SECCION C - C

En esta parte la soldadura y la placa estarán enfriándose después de haber sido transitada por el arco en razón de la conductividad térmica del metal, tan pronto como pase el arco comenzará la evacuación del calor hacia el resto de la pieza con lo que descenderá la temperatura de la zona calentada por este. En lo que respecta al estado de tensiones se observa que al enfriarse las zonas dilatadas en condición de sujeción, surgen tensiones de tracción en la zona de soldadura y en la zona afectada por el calor. En zonas alejadas aparecen tensiones de compresión para que se cumpla la condición de equilibrio.

SECCION D – D

En esta parte el arco se encuentra lo suficientemente alejado para que se haya producido el enfriamiento total, se encontrará nuevamente la temperatura inicial de la pieza, las tensiones tendrán su valor máximo final que corresponde al estado permanente definitivo de las tensiones residuales. Es importante

señalar, que durante los estados transitorios, como en la condición final, deberán satisfacerse las condiciones clásicas de equilibrio de las fuerzas y momentos totales actuantes, es decir, que la sumatoria de las fuerzas residuales es nula, lo que implica ausencia de traslación y rotación.

Cabe señalar que el esfuerzo normal en la dirección Y; " σ_y " y el esfuerzo cortante τ_{xy} también existen en el campo de esfuerzos de dos dimensiones pero estos no se muestran en la figura.

2.5 Efectos de los Esfuerzos Residuales Sobre la Integridad de la Soldadura

Los esfuerzos residuales pueden disminuir considerablemente la resistencia a la tracción de las estructuras soldadas cuando éstas se encuentran sometidas a determinados mecanismos de deterioro, especialmente favorecidos por la aplicación de bajos esfuerzos de carga en servicio.

Para entender ello es importante analizar el gráfico en la figura 2.13 en el se aprecian placas soldadas a tope y como consecuencia del calor de la soldadura se producen tensiones residuales longitudinales representadas por

la curva A. esta primera curva se caracteriza por tener un alto nivel de tensiones residuales en el centro del cordón, pero siempre menores al límite de fluencia del material (curva D). Si ahora esta estructura soldada es sometida en servicios a esfuerzos externos uniformes de magnitud $\sigma = \sigma_1$, las tensiones resultantes serán la suma de éstas y de los esfuerzos residuales. Siendo la zona de cordón la más solicitada en estas condiciones, los esfuerzos allí presentes pueden alcanzar el límite de fluencia y provocar su plastificación local. Cuando se produce la plastificación de una región del material, ésta libera sus tensiones residuales redistribuyendo las restantes como se indica en la curva E. Si la estructura esta sometida a esfuerzos de tracción más altos ($\sigma = \sigma_2$), mayor será la plastificación local de la zona mas tensionada (cordón de soldadura), obteniéndose redistribuciones de la tensiones residuales que reducen sus valores máximos (ver curvas E y F comparadas con la curva A.

El resultado final será un menor efecto de las tensiones residuales sobre el comportamiento mecánico de la estructura.

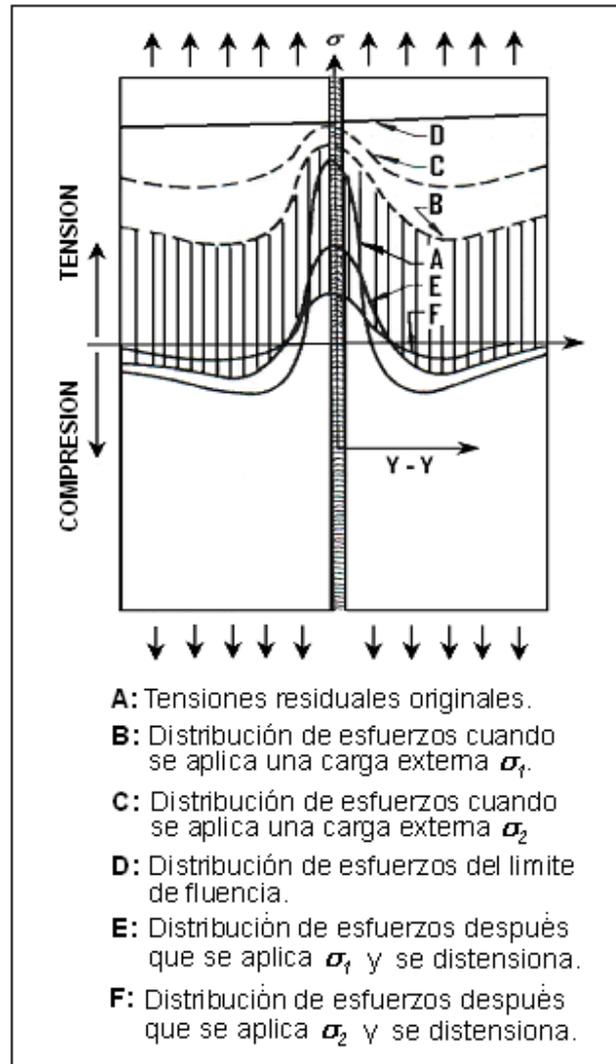


FIGURA 2.13: DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES LONGITUDINALES

Por ello las tensiones residuales no juegan un papel decisivo en estructuras fuertemente solicitadas; pero, en cambio, sí son determinantes en la vida del

componente soldado cuando éste se haya sometido a bajos esfuerzos mecánicos y mecanismos de daño, como: fractura frágil, fatiga y corrosión bajo tensión.

La **resistencia a la fatiga** de una estructura soldada se ve favorecida si ésta presenta esfuerzos residuales de compresión en su superficie. Asimismo, es posible que estas tensiones residuales puedan irse liberando durante la carga cíclica y, por tanto, sus efectos en la resistencia a la fatiga de las uniones soldadas sean poco importantes.

En presencia de **ambientes corrosivos**, los esfuerzos residuales pueden provocar la fractura en materiales sin necesidad de que estén sometidos a cargas externas. Esto es particularmente severo cuando los mecanismos son corrosión bajo tensión y fragilización por hidrógeno.

2.6 Medición de Esfuerzos Residuales en Soldadura.

Los esfuerzos residuales se pueden medir a través de las siguientes técnicas:

1. Técnica de relajación de esfuerzos.
2. Difracción de Rayos X.
3. Técnica de ultrasonido.

2.6.1 Técnica de Relajación de Esfuerzos.

Se basan en el hecho de que las tensiones residuales siempre están en el rango elástico y, al provocar una relajación del metal, a través de seccionamiento, taladrado, etc. del elemento, se produce una liberación de las tensión internas que provoca una deformación, la cual puede ser medida a través de bandas extensométricas (strain gages) fijadas a la superficie del metal (Figuras 2.14 y 2.15)

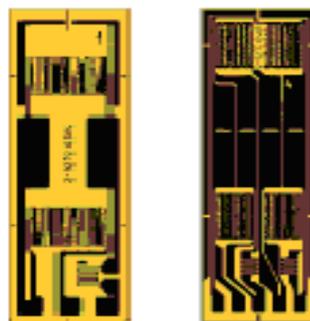


FIGURA 2.14: BANDAS EXTENSOMÉTRICAS PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES (8).

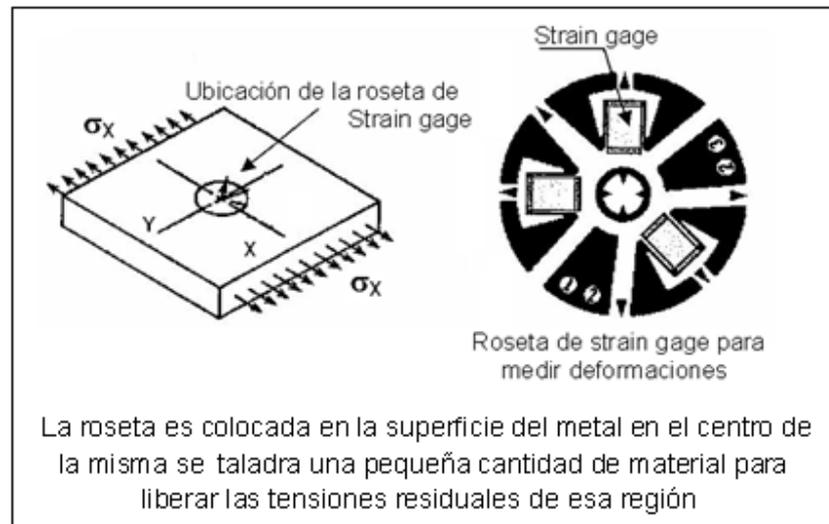


FIGURA 2.15: ROSETA PARA MEDICIÓN (1)

Las **bandas extensométricas** son filamentos embebidos en una lámina de plástico que se adhieren a la superficie sobre la cual se quiere medir las deformaciones. Cuando se produce una deformación en el material, la galga también se distorsiona modificando la longitud de los filamentos y con ello su resistencia eléctrica de estas galgas, es posible medir las deformaciones de cualquier componente. (Figura 2.16)

Resulta claro que la técnica mide **variaciones de deformación** y no estados absolutos. Si el material tenía una deformación al momento de colocarse la

banda extensométrica, ésta no podrá medir el estado inicial de deformación y solo medirá cualquier deformación posterior a partir de este estado inicial. Por lo tanto, tensiones residuales presentes en un elemento no pueden ser determinados directamente una vez que hemos adherido las galgas a éste; quedaran ocultas a la medición a menos que se altere el estado inicial y se pueda medir el efecto de éstas tensiones a través de deformaciones originadas por ellas.

Para medir tensiones residuales, se emplea un método denominado "The Hole-Drilling Strain Gage Method" (método del agujero perforado), el cual se lo emplea con el sistema MTS 3000 que es un sistema automático para la determinación de esfuerzos residuales usando bandas extensométricas (strain gages) que está normalizada de acuerdo a la norma ASTM Standard E837.

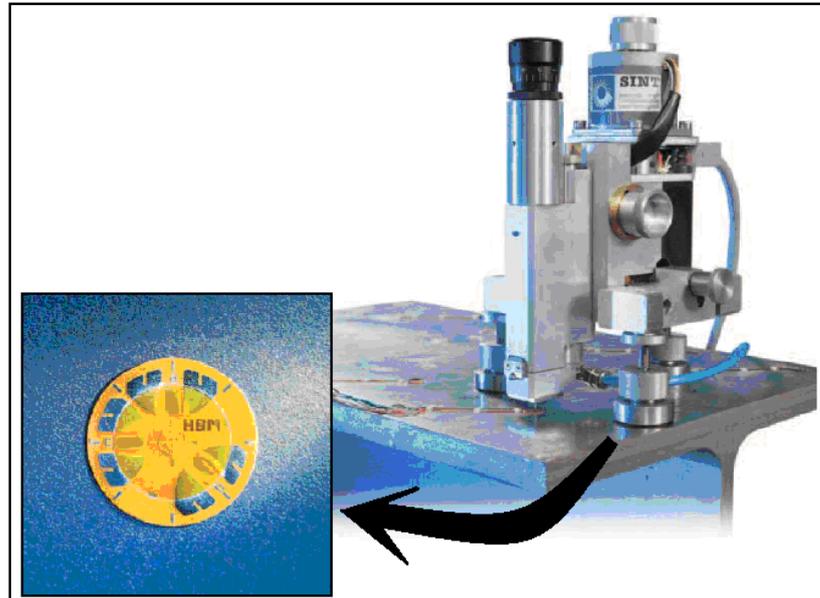


FIGURA 2.16: TÉCNICA DE MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES CON GALGAS (8).

Una vez colocada la roseta en la superficie del componente, se coloca un posicionador de precisión de forma que se mida la correcta ubicación de una broca respecto al agujero de la roseta. Luego se extrae el microscopio y se coloca la broca sobre la guía con el fin de proceder al taladrado de una pequeña porción del material y provocar la liberación de las tensiones residuales a través de deformaciones, que es medida por la roseta de Strain Gages.

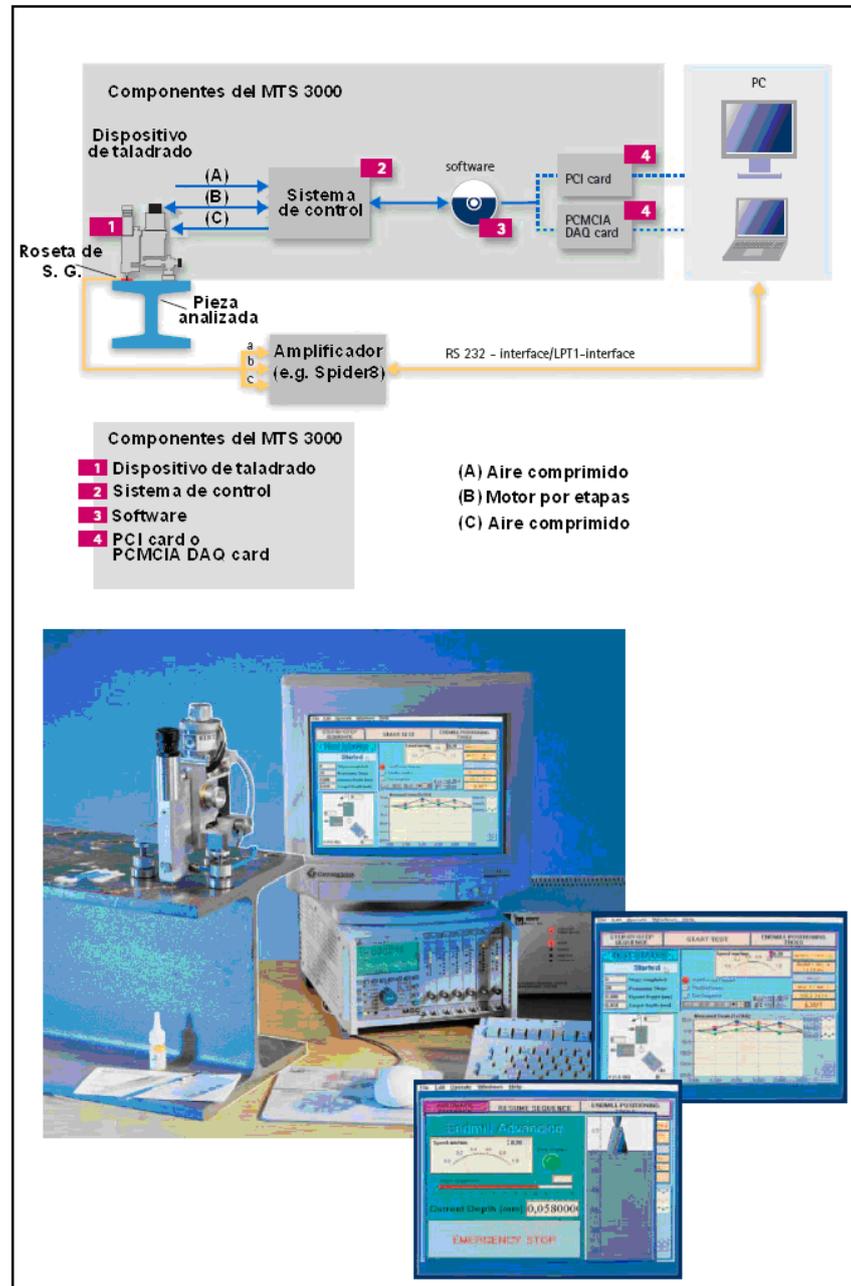


FIGURA 2.17: SOFTWARE PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES (8).

2.6.2 Difracción de Rayos X.

Las deformaciones elásticas en los metales pueden ser estimados a través de la medición de los cambios en el espacio interatómico usando la técnica de difracción de rayos X. con ésta técnica, se pueden determinar deformaciones superficiales en una pequeña área (algunos mm^2). Esta técnica es no destructiva y es posible hoy en día realizarla en el campo (figura 2.18)



FIGURA 2.18: EQUIPO DE R-X PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES.

El principio de la medición de tensiones residuales se basa en el hecho que cuando un material cristalino es sometido a un esfuerzo mecánico la red cristalina se distorsiona, produciéndose un cambio en las distancias interatómicas. El cambio en el espacio interatómico es siempre proporcional a la tensión.

2.6.3 Técnica de Ultrasonido.

Frente a la técnica de difracción de RX, la determinación de tensiones residuales mediante la técnica de ultrasonido tiene ciertas ventajas, como su carácter no es destructivo, su aplicación sencilla en obra y la ausencia de medidas de seguridad durante su aplicación.

Las tensiones residuales pueden ser correlacionadas con la velocidad de propagación d una onda en el interior del material. Sin embargo, el cálculo preciso de los esfuerzos residuales es un tanto complejo y dar un valor promedio de los esfuerzos existentes a lo largo del camino que recorre la onda en el interior del material. A diferencia de la técnica de difracción de R-X el método de ultrasonidos permite conocer esfuerzos residuales en el interior.

En resumen, tanto la técnica de ultrasonido como la de difracción de R-X, son costosas, tanto por el equipo que requieren, como por el desarrollo de la medición. A continuación se presenta un sistema de ultrasonido para medición de esfuerzos residuales. (Figura 2.19)



FIGURA 2.19: EQUIPO DE ULTRASONIDO PARA MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES (SISTEMA UCC) (9).

El sistema complejo computarizado ultrasónico (UCC) para la medición de esfuerzos residuales fue desarrollado en un proyecto entre el Integrity Testing Laboratory Inc. De Toronto y la Nacional Academy of Science de Ucrania. Este sistema incluye un software de soporte y una computadora portátil con una base de datos avanzada para calcular los efectos y el análisis de la influencia de las tensiones residuales en la vida de los componentes estructurales.

2.7 Alivio de Esfuerzos Residuales en Soldadura.

Las tensiones internas se originan en complejas interacciones térmicas y/o mecánicas. Por consiguiente, los métodos de alivio de tensiones residuales se basan justamente en:

1. Tratamientos Térmicos
2. Tratamientos Mecánicos.

2.7.1 Tratamiento Térmico.

Consiste en calentar la unión soldada a una temperatura y a un periodo de tiempo determinado. Se recomienda un calentamiento gradual uniforme de toda la pieza, un mantenimiento a temperatura, que en el caso de los aceros ferríticos es alrededor de 600⁰C durante una hora por pulgada de espesor, seguido de un enfriamiento igualmente gradual y uniforme. Cuando es posible, todo el componente soldado es introducido en un horno y cuando no se puede, se somete sólo la unión a un calentamiento local como el indicado en la figura 2.20



FIGURA 2.20: TRATAMIENTO TÉRMICO A UN TANQUE CILÍNDRICO

Cuando el material es sometido a un calentamiento, se produce en él una disminución de su límite elástico; como las tensiones residuales los cordones de soldadura (especialmente las longitudinales) pueden alcanzar valores muy cercanos a éste, el nivel de las tensiones residuales se reducirá al redistribuirse para mantener el equilibrio de fuerzas.

También es posible que se presenten mecanismos de termofluencia que relajen las tensiones durante el tratamiento térmico; sin embargo, para alcanzar un efecto importante se requieren permanencias prolongadas que no siempre son posibles en la práctica.

Para alcanzar óptimos resultados en el tratamiento térmico de alivio de tensiones, es importante ejecutar de manera correcta cada una de las etapas del tratamiento térmico: velocidad, temperatura y tiempo de calentamiento, y velocidad de enfriamiento. En la medida de lo posible, es necesario garantizar que el incremento o disminución de la temperatura sea lo más uniforme posible en el componente soldado con fin de no generar nuevas tensiones residuales.

2.7.2 Tratamiento Mecánico.

Este tratamiento se realiza a temperatura ambiente y el material a distensionar debe ser lo suficiente dúctil como para producir la deformación local necesaria para aliviar las tensiones. Una forma de realizar este tratamiento es a través de un **martillado** de la superficie (shot peening) que induce esfuerzos residuales de compresión los cuales contrarrestan el efecto de los posibles esfuerzos residuales de tracción y mejoran la resistencia a la fatiga del componente.

El martillado consiste en golpear repetidamente con un martillo a la pieza que se ha soldado. Este método se lo ha aplicado por aproximadamente 50

años en la industria pero los requerimientos y regulaciones que gobiernan este procedimiento han sido basados en la opinión antes que en datos científicos, debido a que no ha habido un método práctico para medir el efecto del golpe.

Sin embargo se tiene algunas especificaciones y códigos que recomiendan el no golpear ni la primera ni la última capa de soldadura. La primera por que puede ocasionar un desplazamiento de los miembros; y la última capa se prohíbe por que se presume que trabajado en frío dañaría la soldadura, y no hay una aplicación posterior de calor que lo anule.

El equipo de golpeo debe ser cuidadosamente seleccionado. El martillo, herramientas neumáticas y por demás, deben ser lo suficientemente pesadas en la fuerza del golpe, de manera que sea efectivo sin producir excesivo endurecimiento, pero no tan pesadas que involucren momentos de doblado o produzcan agotamiento en la soldadura.

Otra forma de aplicar este tratamiento de alivio de tensiones es aplicando **vibración mecánico** a la soldadura a través de un equipo que se conecta

con la estructura y ejecuta el tratamiento mecánico sobre una gran superficie del componente (Figura 2.21)

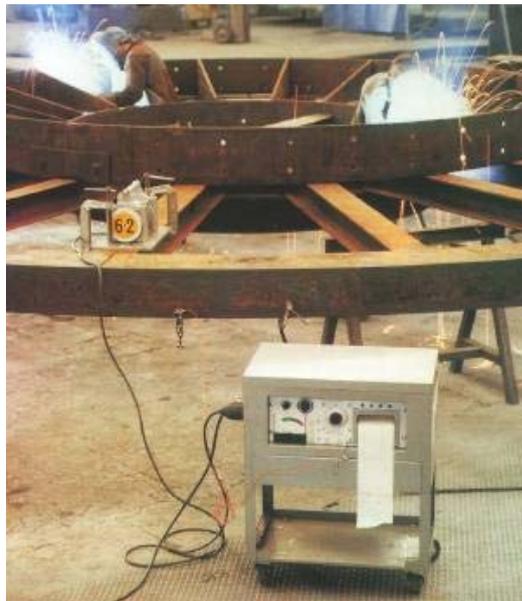


FIGURA 2.21: EQUIPO DE ELIMINACIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES POR VIBRACIÓN MECÁNICA (10).

Presenta un sistema de eliminación de tensiones residuales F62 de Metronic que está especialmente diseñado para después de los procesos de soldadura. La máquina F62 consta de un vibrador que se sujeta a la pieza y de una consola electrónica encajada dentro de un gabinete portátil.

A diferencia de los métodos para alivio de tensiones por tratamiento térmico, este método presenta las diferentes ventajas:

- El equipo es compacto y portátil, de este modo, puede moverse a cualquier parte de la planta de producción.
- Los costes de inversión, funcionamiento y mantenimiento son bajos.
- El proceso dura entre 15 y 30 minutos por ubicación, según el peso y configuración del componente o estructura.
- Es fácil de usar y no requiere la necesidad de extensas instrucciones para el operario.
- Se puede usar en una amplia gama de materiales.
- No tiene efectos negativos en el material.

- Las tolerancias de las piezas pueden mantenerse en límites imposibles o imprácticos de alcanzar con el tratamiento térmico.
- El proceso de estabilizado se puede llevar a cabo después y también durante el proceso de soldadura.

CAPÍTULO 3

3. DISTORSIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO SOLDADAS.

Durante el proceso de soldadura, el calentamiento y enfriamiento en el metal de aporte y el metal base adyacente a la soldadura no son uniformes, los cuales causan complejas deformaciones térmicas.

Los esfuerzos resultantes por las deformaciones producen fuerzas internas causando contracción del material, la cual se la conoce como distorsión de los elementos soldados.

En la fabricación de estructuras soldadas, a menudo los fabricantes se topan con este problema, lo cual afecta la integridad del servicio y el comportamiento de las estructuras.

3.1 Tipos de Deformaciones en Uniones Soldadas.

Como ya se había mencionado en el capítulo uno, los tipos de deformaciones tanto en soldadura a tope como en filete son:

- ✓ Contracción (distorsión) transversal.
- ✓ Contracción (distorsión) longitudinal.
- ✓ Distorsión angular.

3.1.1 Contracción (Distorsión) Transversal.

La contracción transversal es una reducción adimensional en una dirección perpendicular a la línea de soldadura, dicha reducción ocurre cuando el elemento soldado comienza a enfriarse.

La cantidad de contracción varía con:

- ✓ El grado de restricción en los miembros durante la soldadura y el enfriamiento.
- ✓ El área de la sección trasversal del metal soldado.

- ✓ El extenso flujo de calor el cual está dentro del metal base adyacente
- ✓ El número de pases empleados para realizar la soldadura y el ciclo de temperatura – tiempo el cual ocurre durante la deposición.

Soldadura a Tope.

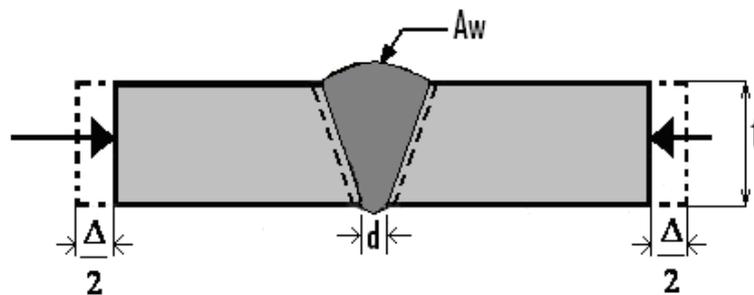


FIGURA 3.1: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL DE UNA JUNTA A TOPE (4).

La contracción transversal viene siendo estudiada por muchos investigadores y ha propuesto varias fórmulas para estimar la contracción transversal sin restricción para aceros al carbono y aceros de baja aleación.

Spraragen y Ettinger propusieron la siguiente fórmula:

$$\Delta = c \frac{A_w}{t} + 0.05d \text{ (Ec. 3.1)}$$

Donde:

Δ : Contracción transversal (*in*)

d : Apertura de raíz (*in*)

t : Espesor de la placa (*in*)

A_w : Area de la sección transversal. (in^2)

c : constante: $c = \begin{cases} 0.18 \longrightarrow t < 1'' \\ 0.20 \longrightarrow t > 1'' \end{cases}$

De acuerdo con esta ecuación, se puede ver que la contracción transversal se incrementa con el incremento de A_w . Para un espesor de placa t una efectiva manera de reducir la contracción es reducir el área, esto puede ser llevado a cabo usando una doble V en lugar de una ranura simple V, o considerando otro tipo de junta, especialmente cuando el espesor de la placa es mayor a 1".

Otra ecuación ha sido propuesta usando los parámetros de aporte de calor, espesor de la placa y la velocidad de avance de la soldadura.

$$\Delta = \frac{17.4 \times 10^{-3} H}{t} \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde:

Δ : Contracción transversal (*mm*)

t : Espesor de la placa (*mm*).

H : Aporte de calor [*Watts*],

Donde:

$$\text{Parámetros de la soldadura} \left\{ \begin{array}{l} H = \frac{VI}{v} \\ I : \text{Corriente}(A) \\ V : \text{Voltaje}(V) \\ v : \text{Velocidad}(cm / \text{min}) \end{array} \right\}$$

Esta ecuación nos dice que a medida que se incrementa el calor de aportación se incrementa la contracción.

Soldadura en Angulo o a Filete.

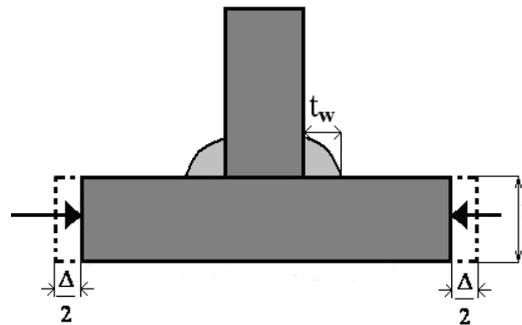


FIGURA 3.2: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL DE UNA JUNTA A FILETE (4).

Esta es una ecuación que aproxima a la contracción transversal de una soldadura a filete.

$$\Delta = 1.02 \frac{t_w}{t} \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Donde:

Δ : Contracción transversal (mm)

t : Espesor de la placa (mm)

t_w : Tamaño del filete (mm)

Se puede apreciar que para evitar esta contracción se debería realizar la soldadura tal que el tamaño del filete sea mucho menor al espesor de la placa.

Otro punto importante a mencionar es que cuando se suelda dos planchas en soldadura a tope puede producir una distorsión llamada **Distorsión Rotacional** debido al calor suministrado. Al hablar de calor suministrado implica decir que con diferentes procesos de soldadura se puede aumentar el amperaje al equipo y obtener un mayor aporte de calor que con otro proceso de soldadura para la misma junta a tope.

Distorsión Rotacional

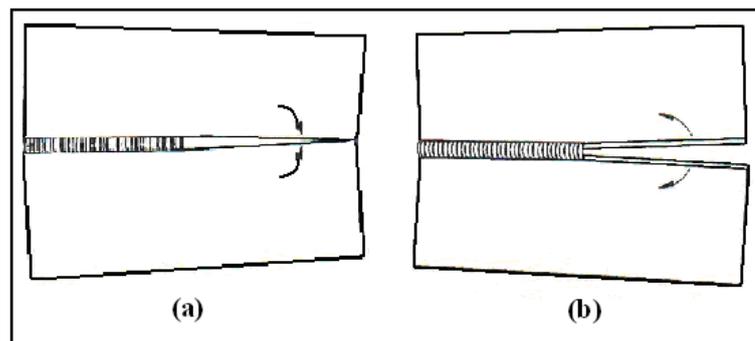


FIGURA 3.3: DISTORSIÓN ROTACIONAL DE DOS PLACAS DE ACERO EN JUNTA A TOPE (1).

Cuando dos placas libres son soldadas a tope, la porción no soldada de la junta cercana se cierra como se muestra en la figura 3.3 (a), esto sucede cuando se utiliza el proceso SMAW. También dichas placas pueden abrirse como se muestra en la figura 3.3 (b), en cambio, esto sucede cuando se utiliza el proceso SAW.

Existen métodos para prevenir esto, los cuales serán mencionados en la sección 3.3.3

3.1.2 Contracción (Distorsión) Longitudinal.

Esta contracción ocurre paralela a la línea de la soldadura y tiende a reducir la anchura de la placa en la soldadura como se muestra en la figura 3.4. Esto es razonable de creer que ésta contracción longitudinal sería proporcional al largo de la soldadura. Igualmente se han propuesto ecuaciones para medir esta distorsión longitudinal para elementos soldados en juntas a tope y a filete.

Soldadura a Tope.

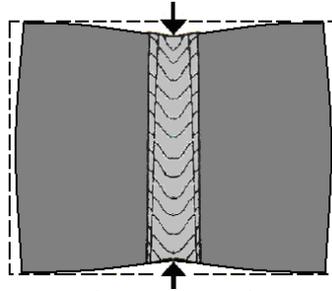


FIGURA 3.4: CONTRACCIÓN LONGITUDINAL DE UNA JUNTA A TOPE (2)

La siguiente ecuación tiene que ver con la corriente y longitud de soldadura y el espesor de la placa:

$$\Delta = \frac{C_3 I L}{t} \times 10^{-7} \text{ (Ec. 3.5)}$$

Donde:

Δ : Contracción longitudinal (*in, mm*)

C_3 : 12 y 305 cuando L y t son en pulgadas y en mm respectivamente

I : Corriente de soldadura (A)

L : Longitud de la soldadura (*in, mm*)

t : Espesor de la placa (*in, mm*)

Como la cantidad de Contracción longitudinal es directamente proporcional a la longitud de soldadura depositada, una reducción de esta contracción puede ser obtenida usando soldadura intermitente, siempre que sea posible.

Distorsión Longitudinal en una Soldadura a filete o Distorsión longitudinal por Flexión.

Este tipo de distorsión es producido por esfuerzos de flexión, inducidos por las fuerzas de compresión longitudinal de la soldadura no coincidiendo con el eje neutral de la pieza soldada. La figura 3.5 muestra la distorsión longitudinal por flexión que por lo regular se la ve en vigas soldadas.

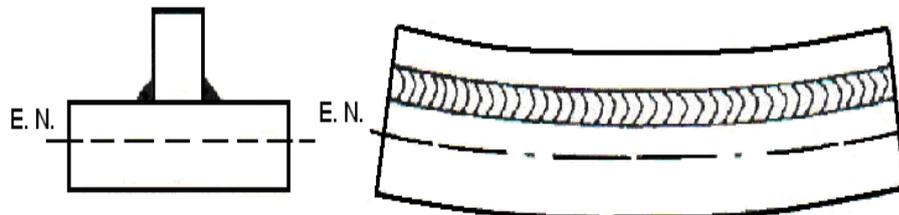


FIGURA 3.5: A) DISTORSIÓN POR EFECTO DE SOLDADURA POR ENCIMA DEL EJE NEUTRO (2).

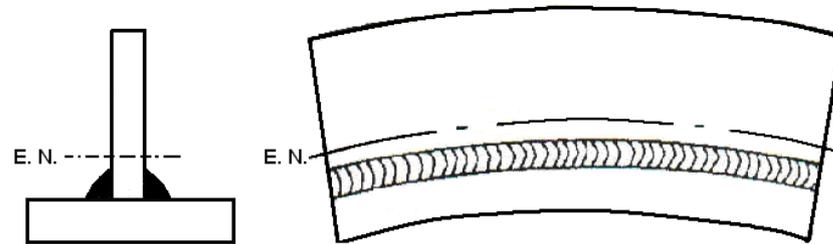


FIGURA 3.6: B) DISTORSIÓN POR EFECTO DE SOLDADURA POR DEBAJO DEL EJE NEUTRO (2).

En la figura 3.7 explica como una fuerza de contracción F , la cual se asume que actúa a través del centroide en una distancia " d " desde el eje neutral de la junta, produciendo un momento M y coloca la junta en flexión.

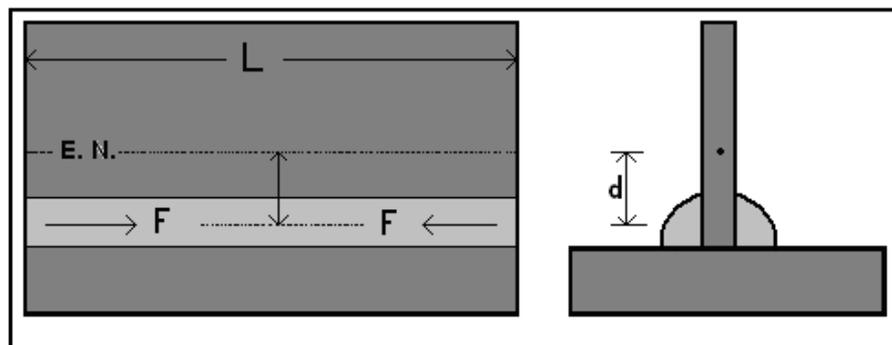


FIGURA 3.7: FUERZA DE CONTRACCIÓN F ACTUANDO SOBRE LA DISTANCIA " d " (5).

En la figura 3.8 se puede observar la distorsión final, la cual depende de la magnitud de la fuerza de contracción y en la resistencia del miembro flexionado dado por la geometría del miembro y la secuencia de la soldadura.

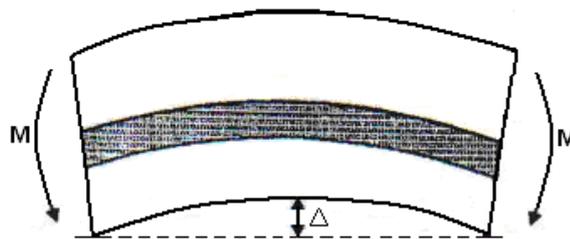


FIGURA 3.8: DEFLEXIÓN DE LA VIGA DEBIDO A LAS FUERZAS DE CONTRACCIÓN (5).

Una fórmula para calcular la cantidad de deflexión es la siguiente:

$$\Delta = \frac{FdL^2}{8EI} \text{ (Ec. 3.6)}$$

Donde:

Δ : Contracción longitudinal (mm)

L : Longitud de la viga. (mm)

d: Distancia entre el eje neutral y eje de acción de la fuerza de contracción. (mm)

F: Fuerza de contracción(N)

E: Módulo de Elasticidad (Pa)

I: Momento de inercia de la junta alrededor del eje neutral (mm²)

Debido a que el parámetro de la fuerza no es factible obtenerlo, se presenta otra ecuación que se deriva de la 3.6 asumiendo que la fuerza de contracción es proporcional al área de la sección transversal de la soldadura:

$$\Delta = \frac{0.005A_w dL^2}{I} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

Δ : Contracción longitudinal (*in*)

A_w : Área de la sección transversal. (*in*²)

L: Longitud de la viga. (*in*)

d: Distancia entre el eje neutral y eje de acción de la fuerza de contracción. (*in*)

I: Momento de inercia de la junta alrededor del eje neutral.

En el caso de vigas I, los momentos flexionantes son iguales y opuestos, pero la distorsión final dependería en la secuencia de soldadura.

En algún caso la cantidad de metal soldado por unidad de longitud muestra un importante rol en el control de la distorsión angular debido al factor que la fuerza de contracción es proporcional a A_w .

Algún intento de reducir la cantidad de metal ayudaría a minimizar la distorsión

3.1.3 Distorsión Angular.- En las mediciones tanto reales como analíticas se mide la deflexión en el borde de las planchas debido a que estos valores son fácilmente llevados a grados.

Soldadura a Tope.

La distorsión angular en soldadura a tope es un cambio angular que ocurre debido a una contracción térmica no uniforme a través del espesor de las placas soldadas, como se ilustra en la figura 3.9

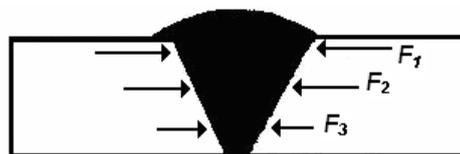


FIGURA 3.9: CONTRACCIÓN DE FUERZAS EN UNA SOLDADURA A TOPE (5).

El cambio angular depende en muchos factores, como son: la forma y dimensiones de la junta, el espesor de la placa y el procedimiento de soldadura.

No hay fórmulas exactas para predecir este tipo de distorsión, pero un entendimiento del mecanismo que origina este tipo de distorsión ayudaría a minimizar y en algunas situaciones eliminar el cambio angular.

En el caso de una junta simple V tal como se muestra en la figura 3.10, el resultado de la fuerza de contracción la cual se asume que pasa a través del centroide de la soldadura A, no coincide con el centroide del elemento B creando un momento M el cual tira o ala el extremo de la placa hacia arriba.

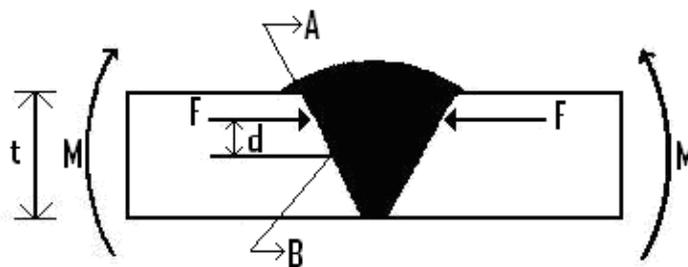


FIGURA 3.10: FUERZA DE CONTRACCIÓN ACTUANDO ALREDEDOR DE LA DISTANCIA "d" (5).

F: Fuerza resultante.

A: Centroide de la soldadura.

d: Brazo del momento.

t: Espesor.

Luego, al enfriarse el elemento soldado, la distorsión provocaría el levantamiento de las placas tal como se muestra en la figura 3.11:

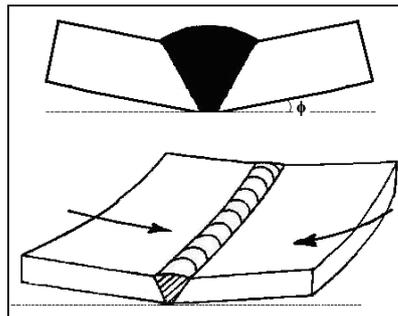


FIGURA 3.11: DISTORSIÓN ANGULAR EN UNA JUNTA A TOPE (2)

Para un ángulo de ranura dado, d y F dependerían en el peso del metal soldado por unidad de longitud, debido a su relación con el espesor de la placa.

En las diferentes construcciones metal mecánicas, este es el problema mas común, el cual se lo contrarresta aplicando una serie de pasos para evitar este tipo de distorsiones.

Soldadura a Filete.

Similar a la distorsión angular de una soldadura a tope, la contracción térmica no uniforme a través del espesor del ala (Figura 3.12a) crea un momento M sobre el eje neutral del ala, el cual produce un cambio angular durante la soldadura a filete (Figura 3.12b).

El cambio angular depende principalmente del tamaño del filete, el espesor del ala y el procedimiento de soldadura.

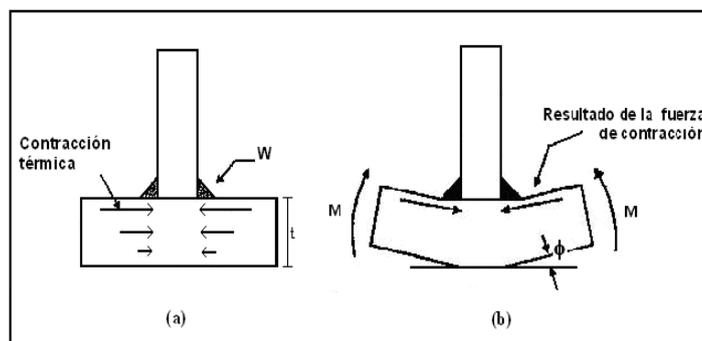


FIGURA 3.12: DISTORSIÓN ANGULAR EN UNA JUNTA A FILETE (5).

La distorsión angular puede ser minimizada teniendo un calor más uniforme a través del espesor de la placa el cual depende en parámetros de soldadura, especialmente aquellos relacionados a entradas de calor y penetración.

En este tipo de distorsión las fórmulas no son muy exactas para calcular la cantidad de distorsión angular causada por soldadura a filete debido a las muchas variables y las complicadas condiciones. Sin embargo algunos gráficos como los mostrados en la figura 3.13 y algunas ecuaciones desarrolladas bajo condiciones particulares como la ecuación 3.9. ayudarían a determinar aproximadamente la distorsión de los elementos soldados.

$$\Delta = \frac{0.02W(w^{1.3})}{t^2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Donde:

Δ : Deflexión en el borde del ala. (in)

W : Ancho del ala (in)

w : Tamaño del filete (in)

t : Espesor del ala (in)

A continuación se presentan algunos gráficos que ayudan a determinar la distorsión angular dependiendo del espesor del ala y del peso del metal soldado (electrodo depositado) por unidad de longitud ($*W$). (Figura 3.12).

Este parámetro W (peso del metal soldado), es diferente al W (Ancho del ala) que aparece en la ecuación 3.9

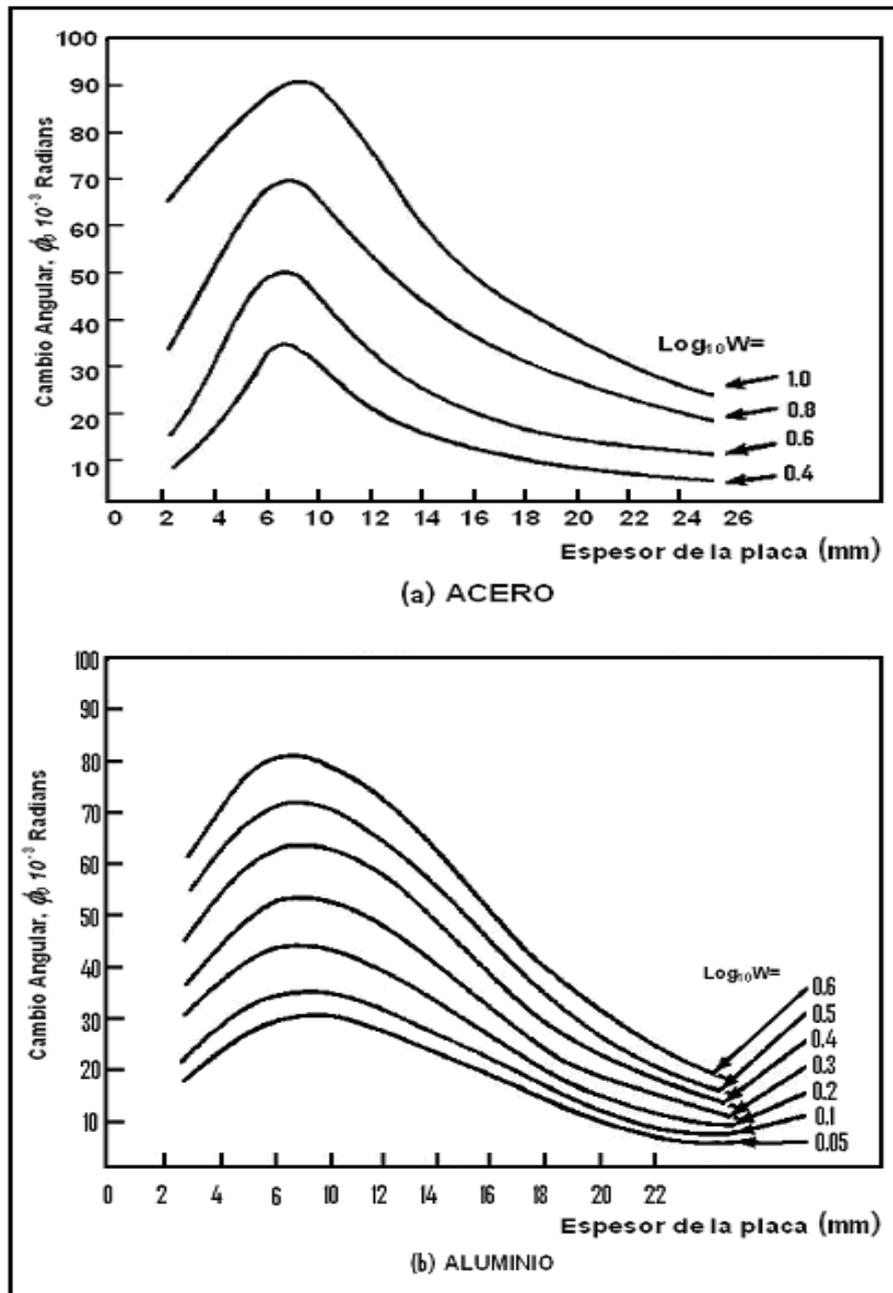
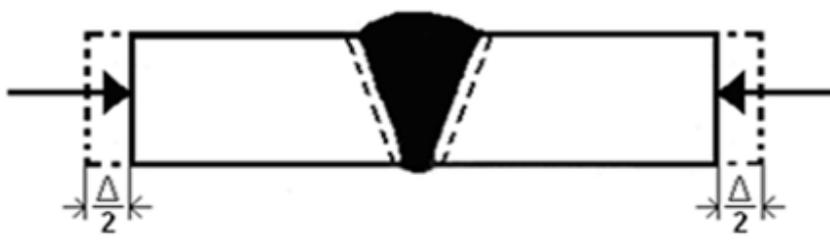


FIGURA 3.13: EFECTO DEL ESPESOR DE LA PLACA (T) Y DEL PESO DEL METAL SOLDADO POR UNIDAD DE LONGITUD (W) PARA EL CAMBIO ANGULAR EN UNA SOLDADURA A FILETE NO RESTRINGIDA (3).

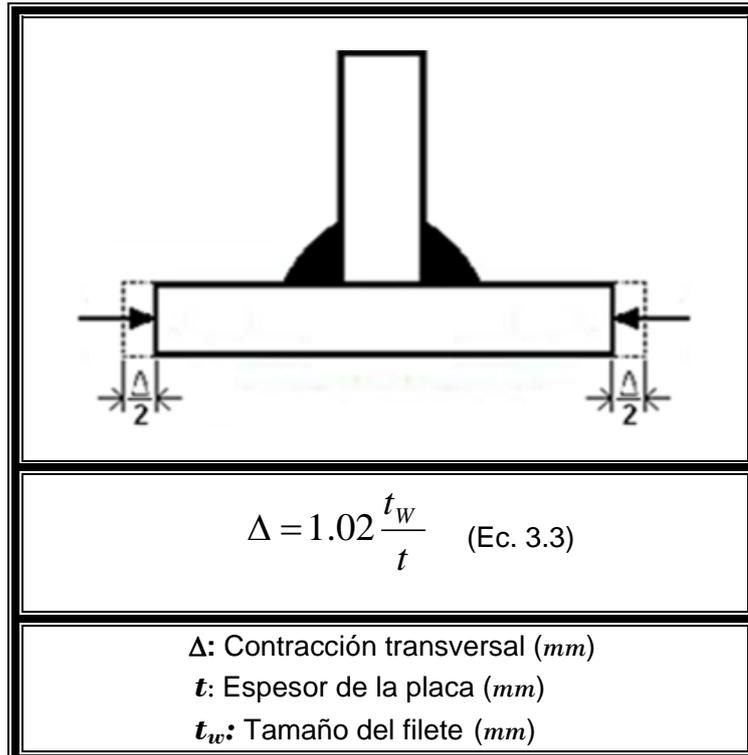
3.2 Resumen de Formulas Empíricas y Tablas para los Diferentes Tipos de Distorsión en Elementos Soldados.

1. CONTRACCION TRANSVERSAL

1.1 Soldadura a Tope

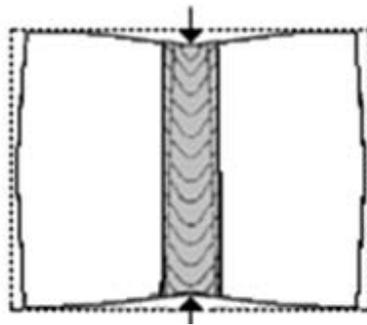
	
$\Delta = c \frac{A_w}{t} + 0.05d \quad (\text{Ec. 3.1})$	$\Delta = \frac{17.4 \times 10^{-3} H}{t} \quad (\text{Ec. 3.2})$
<p> Δ: Contracción transversal (<i>in</i>) d: Apertura de raíz (<i>in</i>) t: Espesor de la placa (<i>in</i>) A_w: Área de la sección transversal. (<i>in</i>²) c: constante: $c = \begin{cases} 0.18 \longrightarrow t < 1'' \\ 0.20 \longrightarrow t > 1'' \end{cases}$ </p>	<p> Δ: Contracción transversal (<i>mm</i>) t: Espesor de la placa (<i>mm</i>). H: Aporte de calor [<i>Watts</i>] Parámetros del Proceso de Soldadura: $\begin{cases} H = \frac{VI}{v} \\ I: \text{Corriente}(A) \\ V: \text{Voltaje}(V) \\ v: \text{Velocidad}(cm/min) \end{cases}$ </p>

1.2 Soldadura en Angulo o a Filete.



2. CONTRACCIÓN LONGITUDINAL.

2.1 Soldadura a Tope



$$\Delta = \frac{C_3 I L}{t} \times 10^{-7} \text{ (Ec. 3.5)}$$

Δ : Contracción longitudinal (in, mm)

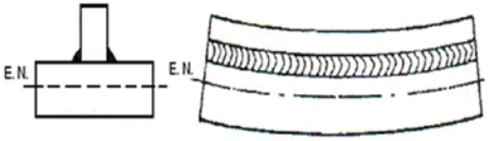
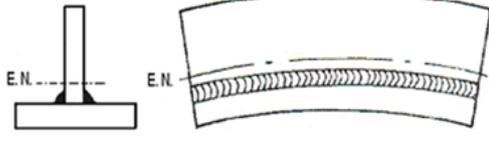
C_3 : 12 y 305 cuando L y t son en pulgadas y en mm respectivamente

I : Corriente de soldadura (A)

L : Longitud de la soldadura (in, mm)

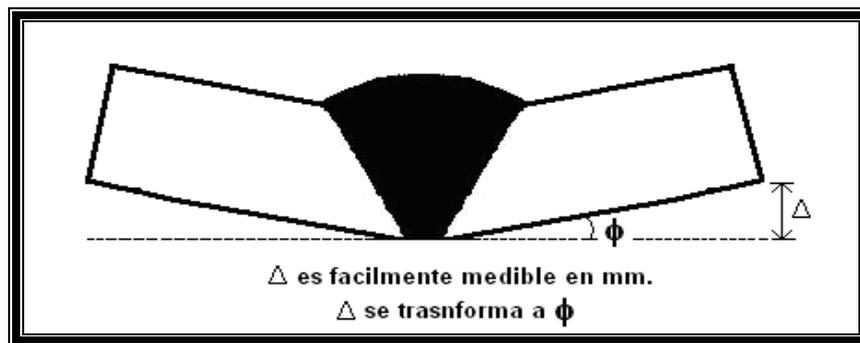
t : Espesor de la placa (in, mm)

2.2 Soldadura en Angulo o a Filete.

	
$\Delta = \frac{FdL^2}{8EI} \quad (\text{Ec. 3.6})$	$\Delta = \frac{0.005A_w dL^2}{I} \quad (\text{Ec. 3.7})$
<p> Δ: Contracción longitudinal (mm) L: Longitud de la viga. (mm) d: Distancia entre el eje neutral y eje de acción de la fuerza de contracción. (mm) F: Fuerza de contracción(N) E: Módulo de Elasticidad (Pa) I: Momento de inercia de la junta alrededor del eje neutral (mm²) </p>	<p> Δ: Contracción longitudinal (<i>in</i>) A_w: Area de la sección transversal. (<i>in</i>²) L: Longitud de la viga. (<i>in</i>) d: Distancia entre el eje neutral y eje de acción de la fuerza de contracción. (<i>in</i>) I: Momento de inercia de la junta alrededor del eje neutral. </p>

3. DISTORSIÓN ANGULAR.

3.1 Soldadura a Tope



3.2 Soldadura en Angulo o a Filete.

Δ se transforma a φ

$$\Delta = \frac{0.02W(w^{1.3})}{t^2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

Δ: Deflexión en el borde del ala. (in)
W: Ancho del ala (in)
w: Tamaño del filete (in)
t: Espesor del ala (in)

3.3 Control de Distorsión

La presencia de distorsión es casi inevitable en un proceso de soldadura, sin embargo es posible minimizar optimizando el diseño y la ejecución planificada del efecto.

3.3.1 En el Montaje de Elementos Soldados.

Para reducir las deformaciones nos interesa reducir las contracciones; se podría conseguir con cualquiera de los siguientes métodos:

- ✓ Anticiparse a la deformación: situar las placas y embridarlas de forma que se minimice la deformación.

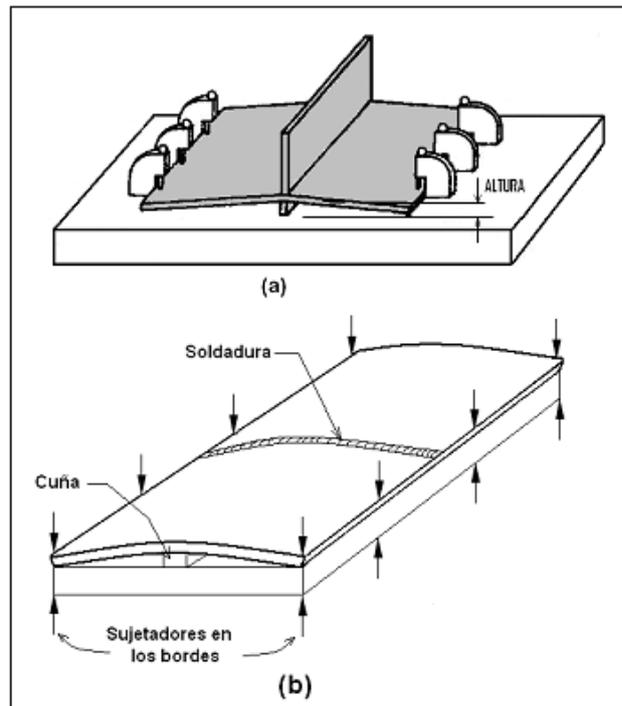


FIGURA 3.14: PREDEFORMACIÓN DE LA PIEZA ANTES DE LA SOLDADURA. (6)

- ✓ Soldar cerca del eje neutro. La colocación y el balanceo de la soldadura son factores importantes en el diseño para minimizar la distorsión. Cuanto más cerca una soldadura se coloque al eje neutro de una fabricación de piezas, menor será el efecto de curvatura de las fuerzas de contracción y de distorsión final.

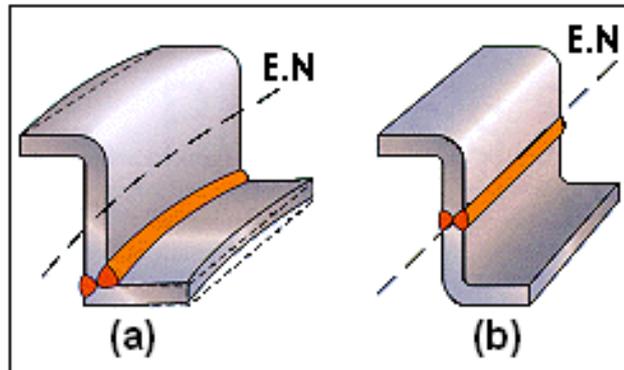


FIGURA 3.15: ESQUEMATIZACIÓN QUE DEMUESTRA QUE SOLDAR CERCA DEL EJE NEUTRO AYUDA A EVITAR DISTORSIONES (6).

- ✓ Ensamble: Otra técnica usada para el control de distorsión en juntas a tope es la mostrada en la figura 3.16 (a): Sujetadores son colocados para que la placa no se levante. 3.16 (b): La junta a tope es sujeta con un yunque de igual espesor de la separación de raíz. 3.16 (c) y (d): soldando soportes para que no se levante ni se contraigan las placas.

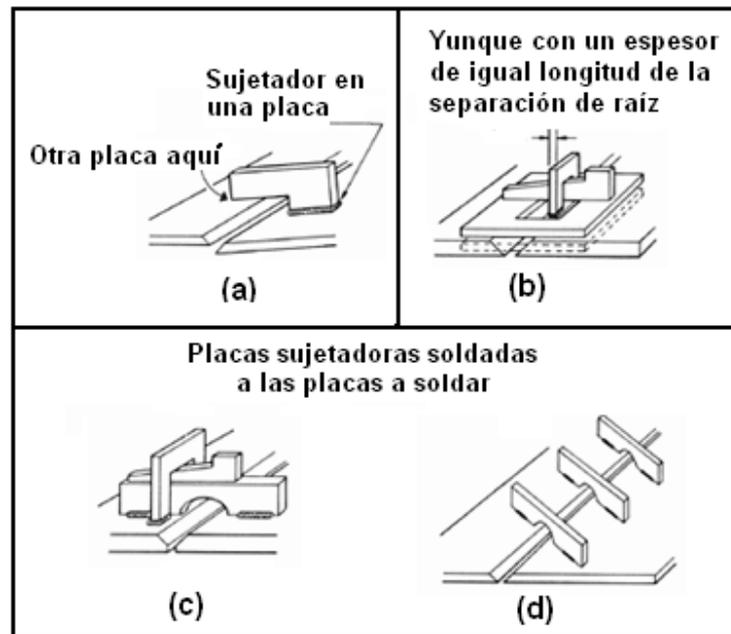
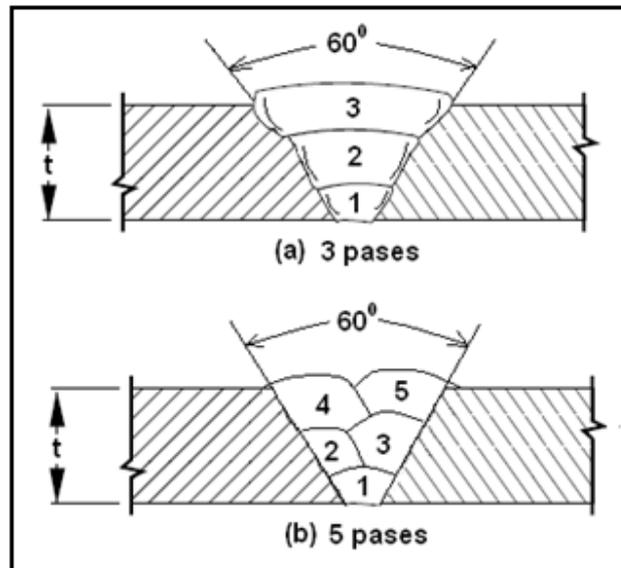


FIGURA 3.16: SUJETADORES PARA SOLDADURAS A TOPE (6).

3.3.2 En el Procedimiento de Soldadura

- ✓ Completar la unión con el mínimo número de pasadas posible y con el diámetro de electrodo, varilla o alambre máximo posible. Asimismo, se ha comprobado que soldaduras hechas con una sola pasada tienen menores niveles de distorsión o de energía elástica almacenada (es decir, tensiones residuales) que la misma unión realizada en múltiples pasadas.



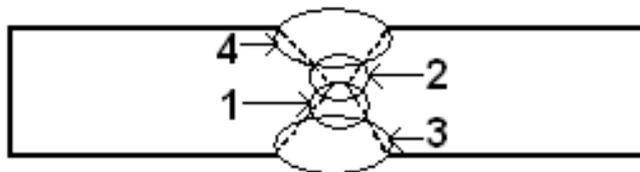
FUGURA 3.17: UTILIZAR EL MÍNIMO NÚMERO DE PASES (6).

- ✓ Realizar la soldadura a una velocidad tal que se pueda reducir el calor aportado.
- ✓ Comenzar soldando las uniones que provoquen la contracción máxima.
- ✓ Precalear las piezas para evitar que se enfríen rápidamente, de esta forma se permite a las piezas que se adapten a los cambios de volumen producidos por el calor, reduciéndose las tensiones y deformaciones.

- ✓ Durante el proceso de soldadura avanzar de forma simétrica, de modo que cada pasada contrarrestare las deformaciones producidas por la anterior.

Para esto se tendrá que tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ Soldar simultáneamente por las dos caras de la unión en las soldaduras en ángulo, así como las soldaduras a tope en doble V, de esta manera la deformación producida por una cara de la soldadura la contrarresta el otro soldador por el otro lado.



FUGURA 3.18: UTILIZAR JUNTAS EN DOBLE V O U Y SOLDAR EN SECUENCIA (6).

- ✓ En las uniones en doble V o U simétricas se deberá realizar la soldadura como lo indica la figura 3.19, alternando los cordones de soldadura por ambos lados de la unión.

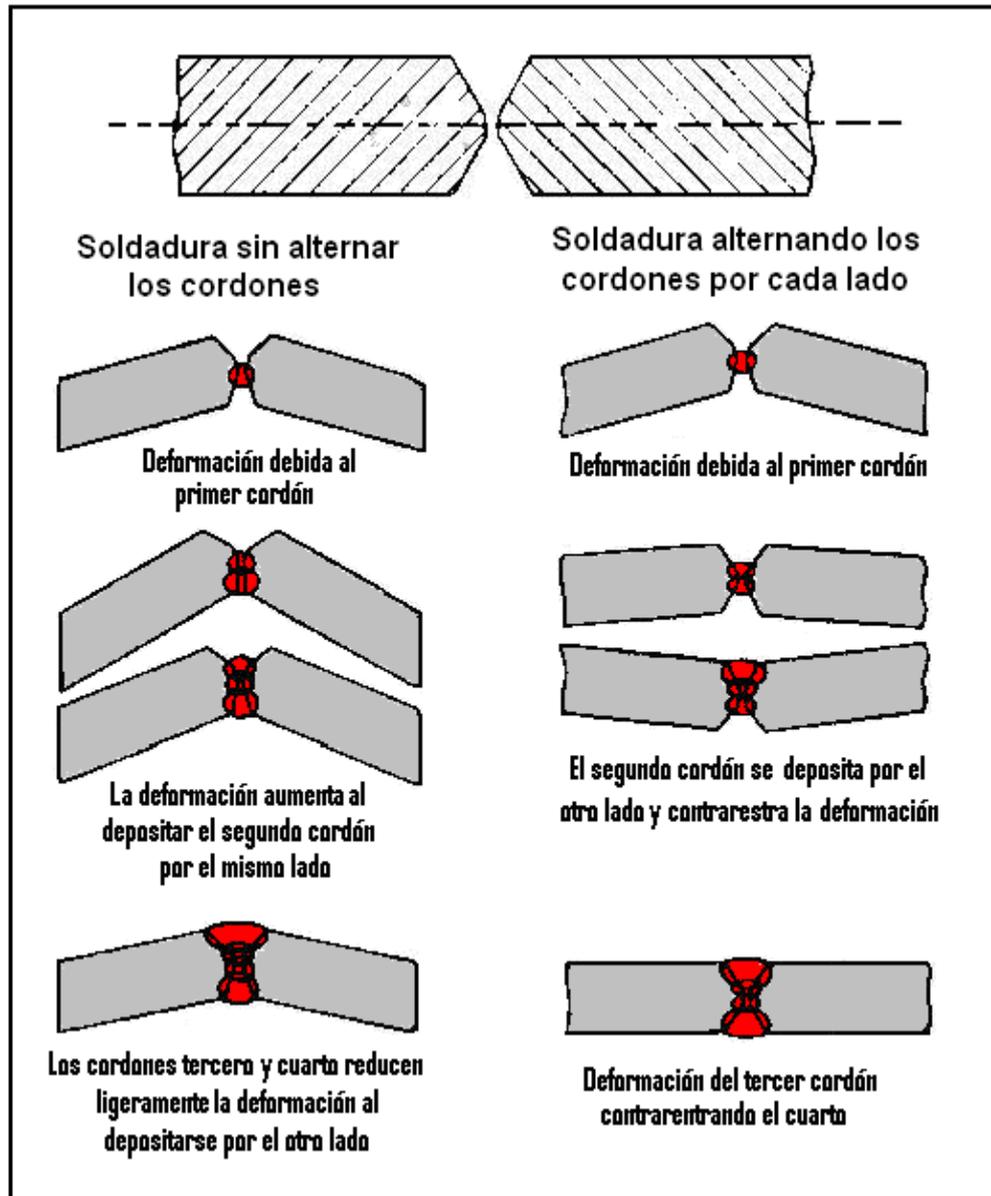


FIGURA 3.19: UNIÓN EN DOBLE V SIMÉTRICA. ALTERNAR LOS CORDONES POR AMBOS LADOS (2).

3.3.3 En la Secuencia de Soldadura.

La secuencia de soldadura es el orden en que se efectúan los cordones y las pasadas de soldadura. Se pueden utilizar secuencias que minimicen la deformación.

Observando los ejemplos en la figura 3.20: Se suelda desde dentro hacia fuera; primero las soldaduras a tope y después a solape; primero las cortas y después las largas; primero las transversales, luego las longitudinales. En depósitos, se soldaran primero las longitudinales y luego de las circunferenciales.

Por ejemplo, si se quiere soldar un conjunto de placas, el procedimiento será como sigue (Figura 3.20: a, b, c)

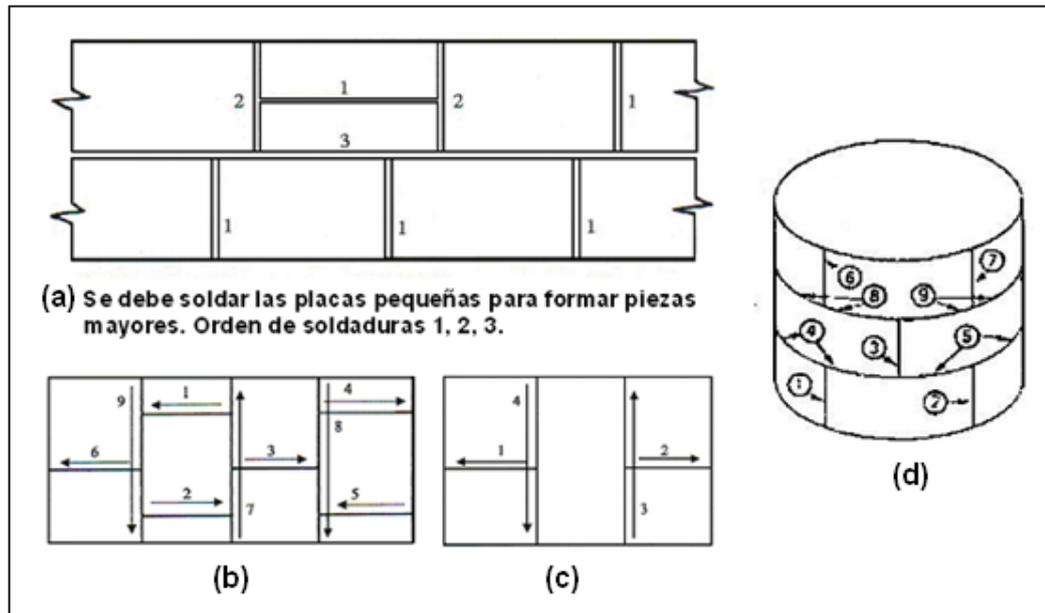


FIGURA 3.20: SOLDADURA DE UN CONJUNTO DE PLANCHAS Y DE UN TANQUE (1).

- ✓ Se soldarán primero las piezas más pequeñas para formar piezas de tamaño parecido a la mayor.
- ✓ Las uniones contiguas se realizaran en sentido contrario.
- ✓ Ninguna unión terminará en otra ya realizada.
- ✓ Se debe soldar comenzando por el centro y terminando en los extremos.

Para soldar uniones en ángulo:

- ✓ Colocar refuerzos angulares antes de soldar cuando sea necesario para evitar deformaciones angulares.
- ✓ Si la pieza es de gran espesor, utilizar el paso de peregrino.
- ✓ En la figura 3.21 se ha indicado una secuencia, pudiéndose utilizar otras, por ejemplo soldar del centro hacia los extremos y soldar con dos soldadores al mismo tiempo, uno por cada lado si las placas son de gran espesor.

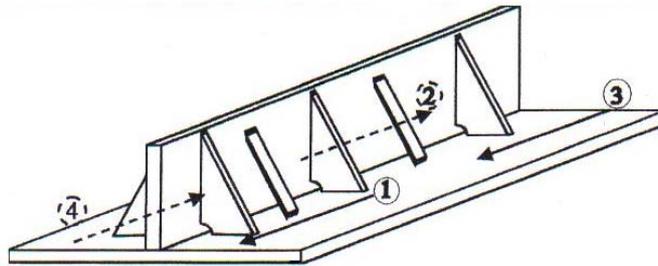


FIGURA 3.21: SECUENCIA PARA SOLDAR UNIONES EN ÁNGULO (1).

- ✓ Soldar del centro hacia los extremos libres

A continuación se presenta dos secuencias de cómo soldar para evitar deformaciones en planchas de acero.

a) Secuencia de Paso de Peregrino.

Este método se lo muestra en la figura 3.22 (a) y es un método fácil para reducir la deformación durante el proceso de soldadura. Se evita de esta forma el efecto de cierre de las placas que en otro caso tendrían a reducir la separación en la raíz. Consiste en efectuar cada pasada en sentido contrario al del avance del soldadura. Se emplea fundamentalmente:

- ✓ En uniones largas.

- ✓ En las primeras pasadas de grandes espesores.

- ✓ Donde se produzcan cruces de soldaduras.

- ✓ Zonas de grandes esfuerzos y gran responsabilidad.

b) Secuencia de Soldadura a Saltos.

La figura 3.22 (b) muestra un proceso llamado “soldadura a saltos” que es una variante del proceso “soldadura de paso peregrino”, consiste en realizar cordones espaciados regularmente soldando también en sentido contrario al de avance de la soldadura.

En la figura 3.22 (c) se presenta una técnica para realizar las uniones en ángulo alternando los cordones de soldadura.

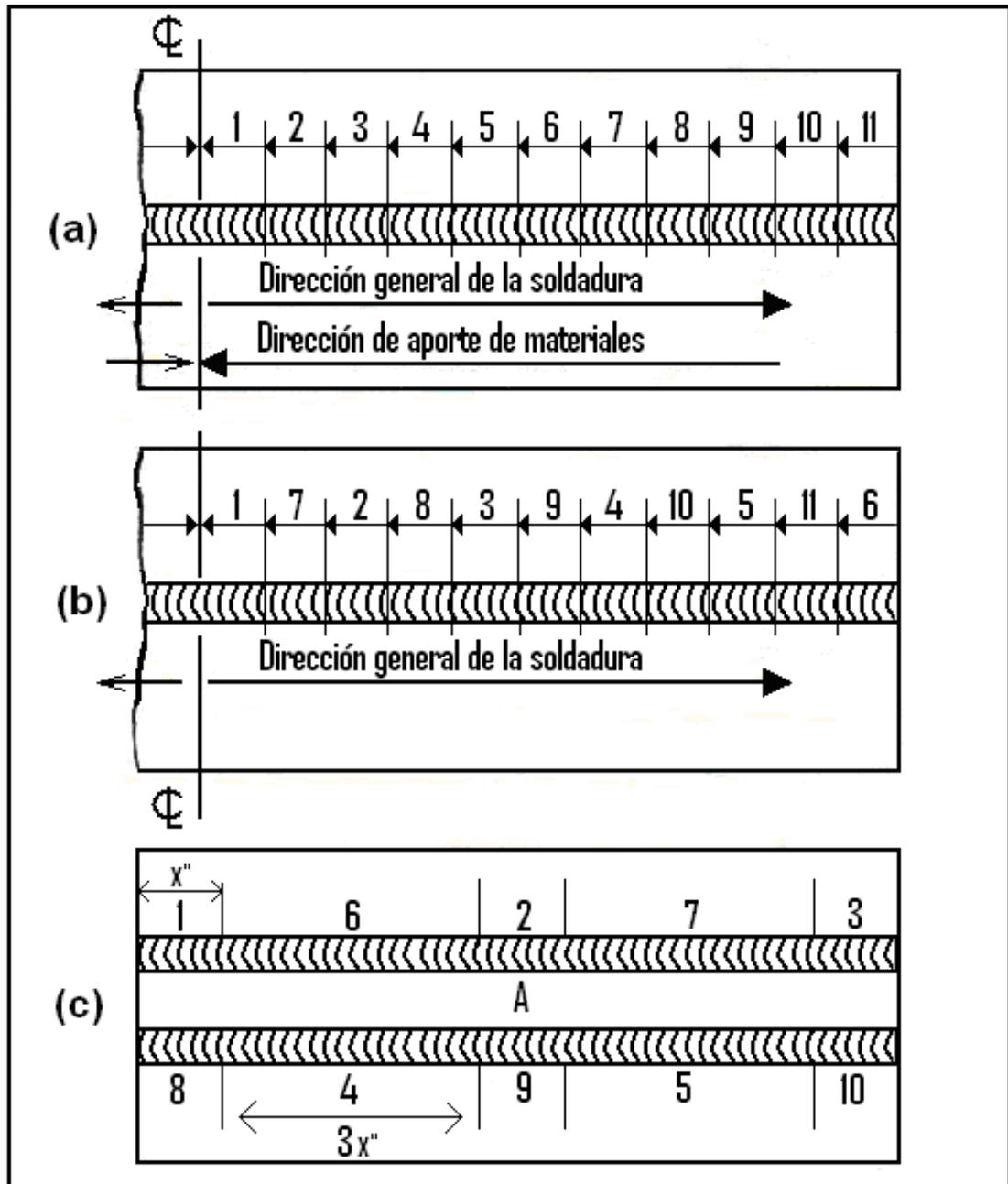
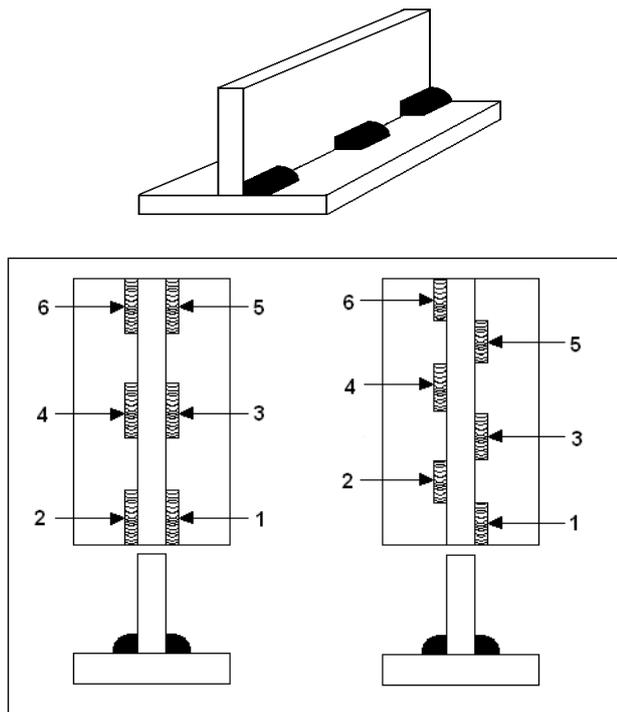


FIGURA 3.22: SECUENCIA DE SOLDADURA (2).

(a) Soldadura de paso peregrino, (b) Soldadura a saltos, (c) Técnica para realizar dos soldaduras en ángulo.

c) Soldaduras Intermitentes

En soldaduras a filete, se recomienda realizar soldaduras intermitentes y de forma simétrica, es decir, haciendo pases en ambos lados.



FUGURA 3.23: SOLDADURAS INTERMITENTES (6).

Una secuencia bien ejecutada al momento de soldar, ayuda a minimizar la distorsión angular. Debido a que las fuerzas se contrarrestan y no permite que el alma se desvíe para los lados

d) Secuencia de la Soldadura para evitar la Distorsión Rotacional.

Una forma de evitar la distorsión rotacional que se mencionó en la sección 3.3.1 es la siguiente:

Cuando en el proceso de soldadura de dos placas a tope se juntan como muestra la figura 3.24 (a), se podrá corregir en algunos casos invirtiendo el sentido del avance de la soldadura, para ello se comenzará el nuevo cordón a unos 50 – 75mm del final de la anterior figura 3.24 (b).

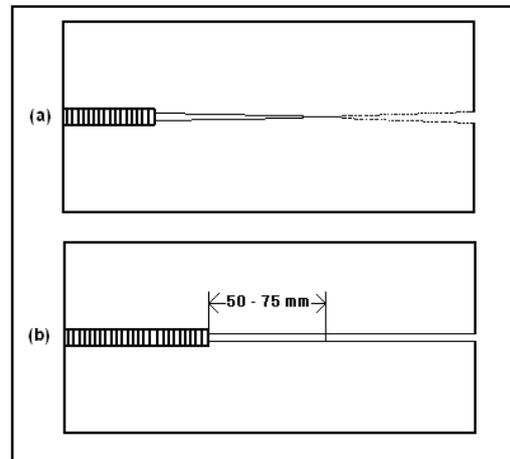


FIGURA 3.24: MÉTODO PARA EVITAR DISTORSIONES ROTACIONALES (2).

Otro método para evitar este tipo de distorsión es de colocar cuñas como se muestra en la figura 3.25, las cuñas deben ser movidas conforme el cordón avanza.

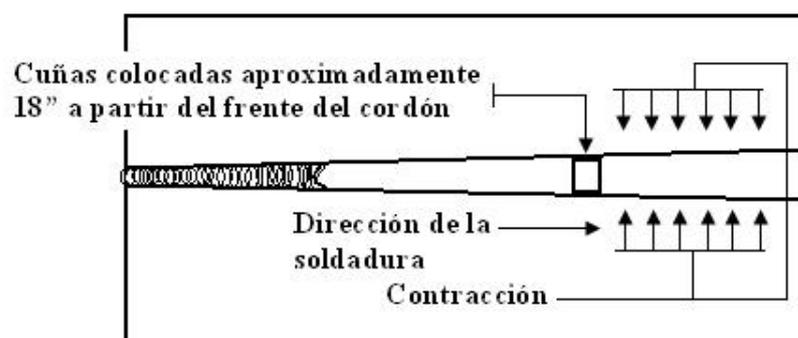


FIGURA 3.25: USO DE CUÑAS PARA EVITAR DISTORSIONES ROTACIONALES (1).

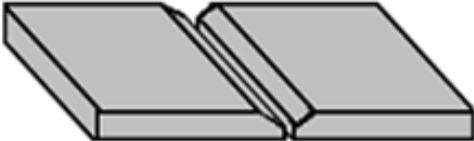
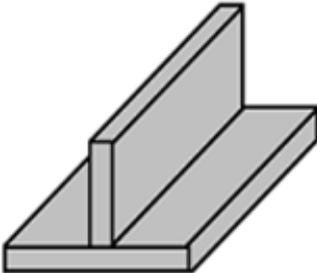
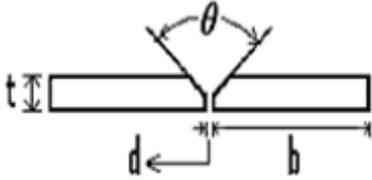
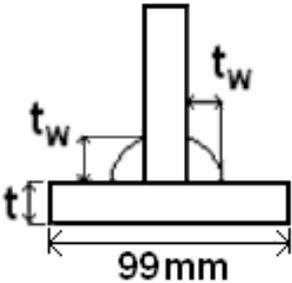
CAPÍTULO 4

4. TRABAJO EXPERIMENTAL: COMPARACIÓN DE MEDICIÓN Y CÁLCULO DE DISTORSIÓN EN PIEZAS SOLDADAS DE ACERO, EXPERIMENTAL VS. ANALÍTICA

4.1 Detalle de las Piezas Soldadas.

A continuación se presenta el detalle de los elementos soldados, tipo de junta, sus dimensiones, proceso de soldadura, y los parámetros que se regulan en el equipo de soldadura los cuales varían de acuerdo al tipo de proceso que se utilice.

4.1.1 Contracción Transversal.

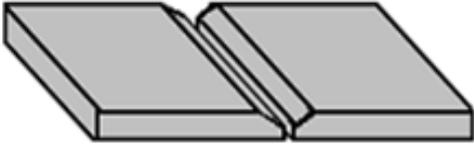
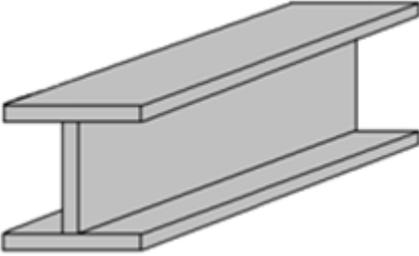
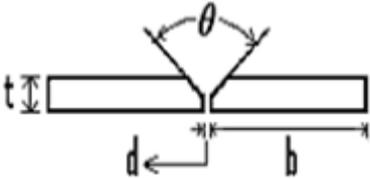
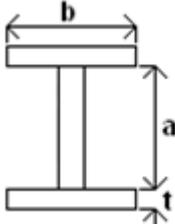
PROBETA # 01	PROBETA # 02
<p data-bbox="475 667 711 696" style="text-align: center;">JUNTA A TOPE</p> 	<p data-bbox="1007 667 1270 696" style="text-align: center;">JUNTA A FILETE</p> 
Material A -36	Material A -36
<p data-bbox="352 1193 834 1223">2 Planchas de 102 x 74 x 10 mm.</p>  <p data-bbox="323 1462 459 1621"> $d = 3\text{mm}$ $\theta = 60^\circ$ $t = 10\text{mm}$ $b = 74\text{mm}$ </p>	<p data-bbox="895 1193 1337 1223">1 Plancha de 86 x 99 x 10 mm.</p> <p data-bbox="895 1249 1337 1279">1 Plancha de 53 x 86 x 10 mm.</p> 
Proceso de Soldadura SMAW Electrodo E7018	Proceso de Soldadura SMAW Electrodo E7018

4.1.2 Distorsión Rotacional.

<p style="text-align: center;">JUNTA A TOPE</p>  <p style="text-align: center;">Cuando se empieza a soldar</p> <p style="text-align: center;">Luego de que se enfriado</p>	<p style="text-align: center;">JUNTA A TOPE</p>  <p style="text-align: center;">Cuando se empieza a soldar</p> <p style="text-align: center;">Luego de que se enfriado</p>
<p>Utilizando un proceso SMAW para soldar dos planchas de acero en junta a tope, las planchas tienden a unirse en el extremo no soldado si a éste no se lo restringe de manera adecuada.</p>	<p>Utilizando un proceso SAW para soldar dos planchas de acero en junta a tope, las planchas tienden a separarse en el extremo no soldado si a éste no se lo restringe de manera adecuada.</p>

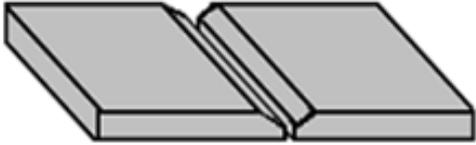
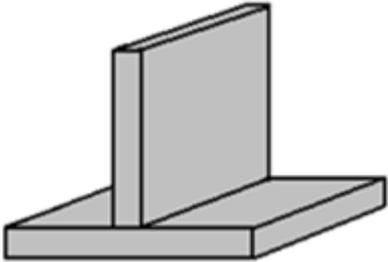
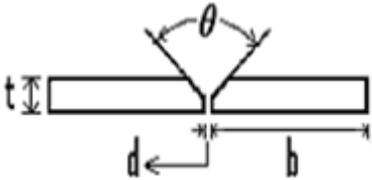
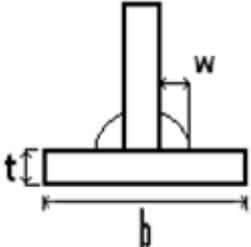
No existen ecuaciones empíricas para estimar el grado de apertura o cierre en estos casos.

4.1.3 Contracción Longitudinal.

PROBETA # 03	PROBETA # 04
<p data-bbox="517 667 751 696" style="text-align: center;">JUNTA A TOPE</p> 	<p data-bbox="1054 667 1315 696" style="text-align: center;">JUNTA A FILETE</p> 
Material A -36	Material A -36
<p data-bbox="395 1178 874 1211">2 Planchas de 280 x 142 x 5 mm.</p>  <p data-bbox="357 1447 512 1581"> $d = 3\text{ mm}$ $\theta = 60^\circ$ $t = 5\text{ mm}$ $b = 280\text{ mm}$ </p>	<p data-bbox="970 1178 1401 1211">2 Alas de 6600 x 300 x 8 mm.</p> <p data-bbox="970 1234 1401 1267">1 Alma de 6600 x 485 x 8 mm.</p>  <p data-bbox="938 1536 1114 1603"> $a = 485\text{ mm}$ $b = 300\text{ mm}$ </p>
Proceso de Soldadura SMAW Electrodo E7018	Proceso de Soldadura SAW

Este análisis se lo hizo en la fabricación de vigas I de acero

4.1.3 Distorsión Angular.

PROBETA # 05	PROBETA # 06
<p data-bbox="491 667 724 696">JUNTA A TOPE</p> 	<p data-bbox="1031 667 1289 696">JUNTA A FILETE</p> 
Material A -36	Material A -36
<p data-bbox="368 1196 847 1225">2 Planchas de 500 x 150 x 8 mm.</p>  <p data-bbox="331 1464 448 1494">$d = 3\text{mm}$</p> <p data-bbox="331 1518 432 1547">$\theta = 60^\circ$</p> <p data-bbox="331 1576 432 1606">$t = 8\text{mm}$</p>	<p data-bbox="916 1196 1394 1225">2 Planchas de 200 x 200 x 16.5 mm.</p>  <p data-bbox="916 1532 1054 1561">$b = 200\text{mm}$</p>
Proceso de Soldadura SMAW Electrodo E7018	Proceso de Soldadura SMAW Electrodo E7018

4.2 Medición y Cálculo de las Distorsiones en las Piezas Soldadas.

En esta sección se toman los resultados de las distorsiones reales de las piezas soldadas y se calculan las distorsiones en base a las ecuaciones propuestas.

PROBETA # 01

Distorsión Transversal – Junta a Tope.

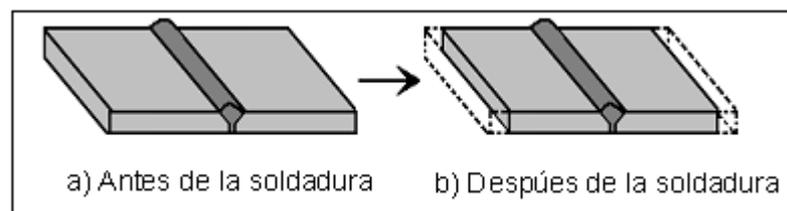


FIGURA 4.1: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL JUNTA A TOPE.



FIGURA 4.2: PLANCHAS ANTES DE SOLDARLAS.

Medición Real.

Las planchas, unas ves cortadas y con un bisel de 60 grados, se prepara el conjunto soldando en 2 puntos para que la probeta quede lista. Se tomaron tres mediciones exactas en los puntos indicados antes de soldar para poder medir la distorsión una vez que la placa se haya enfriado.



FIGURA 4.3: PUNTOS DONDE SE TOMARON LAS MEDIDAS ANTES DE SOLDAR LAS PLANCHAS.

Las mediciones antes de soldar son:

$$X_1 = 151.50 \text{ mm}$$

$$X_2 = 151.35 \text{ mm}$$

$$X_3 = 151.55 \text{ mm}$$

Luego de tomar las mediciones con la probeta lista se procede a soldar con los siguientes parámetros:

TABLA 3
PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW – PROBETA # 01

Corriente de soldadura	120 A
Voltaje de soldadura	23 V
Velocidad de avance	15,83 cm/min
Número de pases	3
Posición:	Plana 1G
Electrodo:	E7018



FIGURA 4.4: LIMPIEZA DE LA ESCORIA LUEGO DEL PRIMER CORDÓN DE SOLDADURA.

Se realizaron tres pases limpiando la escoria en cada uno de ellos.

A continuación se presenta el tiempo en realizar cada pase:

TABLA 4
TIEMPO DE LOS CORDONES DE SOLDADURA - PROBETA # 01

Numero de pase.	Tiempo de soldadura (seg)
Primero	35,32
Segundo	39,73
Tercero	41,25

Tomando un promedio del tiempo tenemos: $\bar{t} = 38.7 \text{ seg.}$

Todos estos pases con el voltaje y amperaje descrito anteriormente.

Finalmente las planchas quedan soldadas y una vez alcanzada la temperatura ambiente se procede a medir la contracción transversal que ha sufrido la probeta debido al calentamiento y enfriamiento en las tres posiciones que se las midió antes de soldar.



FIGURA 4.5: PUNTOS DONDE SE TOMARON LAS MEDIDAS DESPUÉS DE LA SOLDADURA.



FIGURA 4.6: PRIMERA MEDICIÓN, $X_1' = 149.60$ mm



FIGURA 4.7: SEGUNDA MEDICIÓN, $X_2' = 149,30$ mm



FIGURA 4.8: TERCERA MEDICIÓN, $X_3' = 149.70$ mm

Una vez obtenido las tres mediciones se calcula la contracción real.

Contracción Real.

$$\Delta = X - X' \quad (\text{Ec. 4.1})$$

TABLA 5
CONTRACCIÓN REAL - PROBETA # 01

Medidas antes de soldar	Medidas después de soldar	Contracción Real $\Delta = X - X'$
151.50 mm	149.60 mm	1.9 mm
151.35 mm	149.30 mm	2.05 mm
151.55 mm	149.70 mm	1.85 mm

El promedio de la distorsión es: $\Delta = 1.93mm$

Medición Analítica:

Para el área de la sección transversal de la soldadura se trabaja con el área teórica, la cual se la calcula con el programa de costos de soldadura cortesía de INDURA S.A. y los otros parámetros se los obtiene midiendo.

Utilizando la ecuación 3.1 con la constante $c = 0.18$ debido a que el espesor es menor a 1 in, y los demás parámetros tenemos:

$d(in)$	1/8
$t(in)$	0.4
$A_w(in^2)$	0.15
c	0.18

$$\Delta = c \frac{A_w}{t} + 0.05d = 0.074 \text{ in} = 1.86 \text{ mm}$$

En resumen:

Valor real de la distorsión	Valor teórico de la distorsión
1.93 mm	1.86 mm

Empleando la ecuación 3.3, y obteniendo los demás parámetros midiendo y regulando en el equipo, tenemos:

$t(mm)$	10
$I(A)$	120
$V(V)$	23
$v(cm/min)$	15,83
$H(Watts)$	174.35

$$\Delta = \frac{17.4 \times 10^{-3} H}{t} = 0.030 \text{ mm}$$

Utilizando esta ecuación no se obtuvo los resultados esperados debido a que es más utilizable en procesos automatizados.

PROBETA # 02

Distorsión Transversal – Junta a Filete.

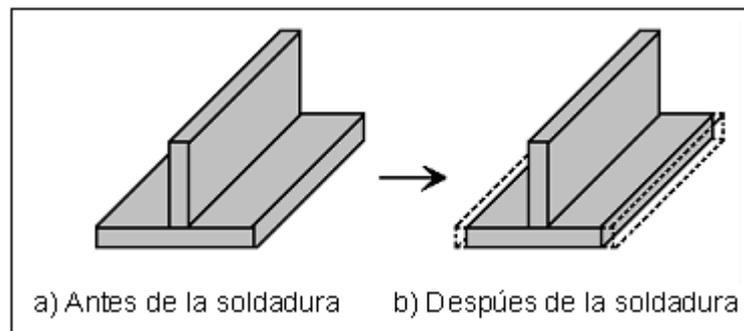


FIGURA 4.9: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL JUNTA A FILETE.

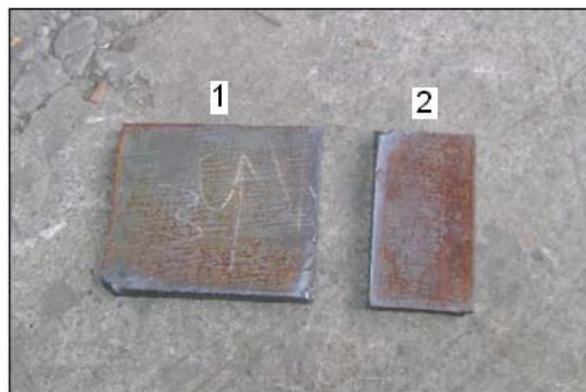


FIGURA 4.10: PLANCHAS CORTADAS ANTES DE SOLDARLAS.

Medición Real.

Se realiza 2 puntos de soldadura para que la probeta quede lista y luego de esto se procede a tomar tres mediciones antes de empezar a soldar.



FIGURA 4.11: PUNTOS DONDE SE TOMARON LAS MEDIDAS ANTES DE LA SOLDADURA.

Las mediciones antes de soldar son:

$$X_1 = 99.00 \text{ mm}$$

$$X_2 = 99.30 \text{ mm}$$

$$X_3 = 99.35 \text{ mm}$$

Luego de tomar las mediciones con la probeta lista se procede a soldar con los siguientes parámetros:

TABLA 6
PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW – PROBETA # 02

Corriente de soldadura	120 A.
Voltaje de soldadura	23 V.
Número de pases	2
Posición:	Plana 1F
Electrodo:	E7018



FIGURA 4.12: SOLDADURA DE LAS PLANCHAS EN POSICIÓN 1F CON PROCESO SMAW.

Se realizan 2 pases de cada lado, la probeta queda lista y se espera a que esta se enfríe hasta que alcance la temperatura ambiente para medir su contracción. Cabe indicar que las planchas al ser soldadas a filete también sufren distorsión angular, pero en este caso es mínima.

A continuación se presenta la probeta soldada y enfriada para realizar las mediciones en los puntos medidos antes de realizar la soldadura.

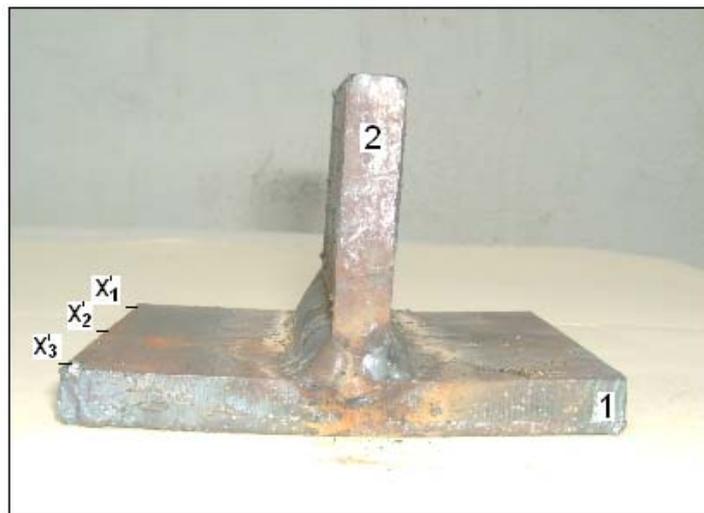


FIGURA 4.13: PUNTOS DONDE SE TOMARON LAS MEDIDAS DESPUÉS DE LA SOLDADURA.

Una vez soldado el conjunto se toman las medidas en tres puntos para tener una estimación mas aproximada.



FIGURA 4.14: PRIMERA MEDICIÓN, $X_1' = 99.10$ mm



FIGURA 4.15: SEGUNDA MEDICIÓN, $X_2' = 99.30$ mm



FIGURA 4.16: TERCERA MEDICIÓN, $X_3' = 99.35\text{mm}$

Una vez obtenido las tres mediciones se calcula la contracción real.

Contracción Real:

TABLA 7
CONTRACCIÓN REAL - PROBETA # 02

Medidas antes de soldar (X)	Medidas después de soldar (X')	Contracción Real $\Delta = X - X'$
99.10 mm	98.60 mm	0.50 mm
99.30 mm	98.65 mm	0.65 mm
99.35 mm	98.75 mm	0.60 mm

El promedio de la distorsión sería: $\Delta = 0.58mm$

Medición Analítica.

Para la aplicar la ecuación 3.4 se necesita el tamaño del filete y el espesor de la placa:

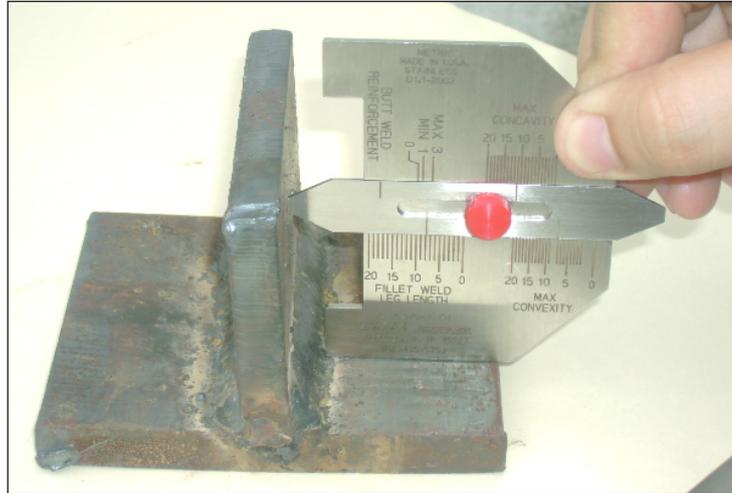


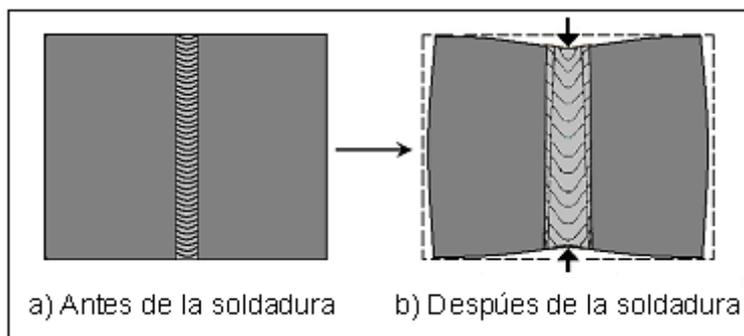
FIGURA 4.17: MEDICIÓN DEL TAMAÑO DEL FILETE (t_w)

$t_w(mm)$	8
$t(mm)$	10

$$\Delta = 1.02 \frac{t_w}{t} = 0.82 \text{ mm}$$

En resumen:

Valor real de la distorsión	Valor teórico de la distorsión
0.58 mm	0.82 mm

PROBETA # 03**Distorsión Longitudinal – Junta a Tope.****FIGURA 4.18: CONTRACCIÓN LONGITUDINAL JUNTA A TOPE.****FIGURA 4.19: PREPARACIÓN DE LAS PLANCHAS.**

Medición Real.

Se realiza 2 puntos de soldadura para que la probeta quede lista y luego de esto se procede a tomar tres mediciones antes de empezar a soldar.



FIGURA 4.20: PLANCHAS LISTAS PREVIO A LA SOLDADURA, TOMANDO 2 MEDICIONES A LA PROBETA.



FIGURA 4.21: PRIMERA MEDICIÓN, $X_1 = 141,35$ mm

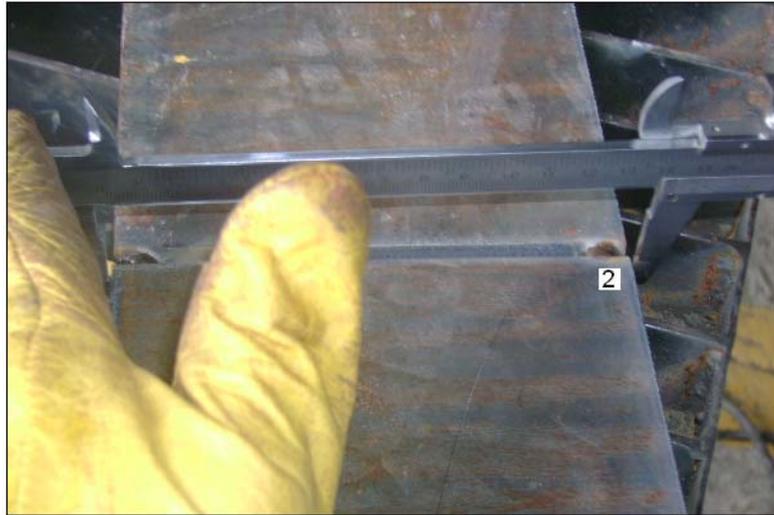


FIGURA 4.22: SEGUNDA MEDICIÓN, $X_2 = 141,70$ mm

Luego de tomar las mediciones con la probeta lista se procede a soldar con los siguientes parámetros:

TABLA 8
PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW – PROBETA # 03

Corriente de soldadura	90 A.
Voltaje de soldadura	23 V.
Número de pases	2
Posición	Plana 1G
Electrodo	E7018



FIGURA 4.23: SOLDADURA DE LAS PLANCHAS EN POSICIÓN 1G CON PROCESO SMAW.

Se realizaron dos pases y una vez que esta haya alcanzado la temperatura ambiente se toma la medición en los puntos indicados para calcular la contracción longitudinal que ha sufrido.

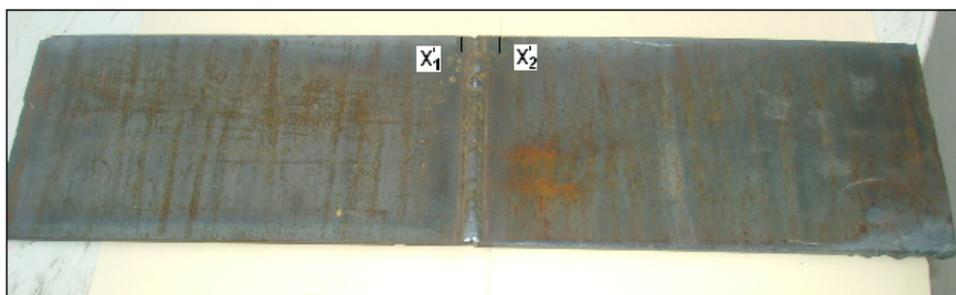


FIGURA 4.24: PUNTOS DONDE SE TOMARON LAS MEDIDAS DESPUÉS DE SOLDAR.

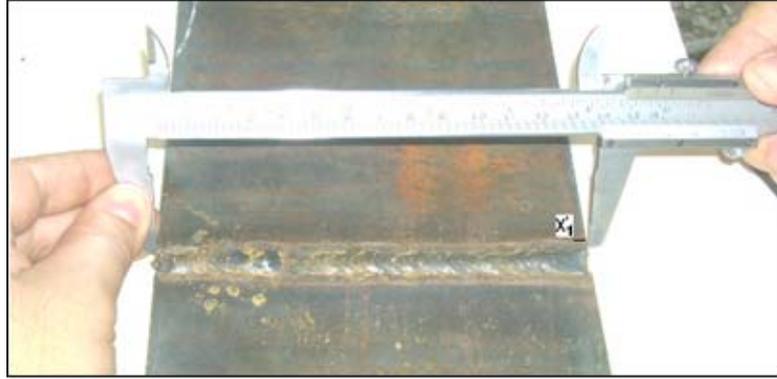


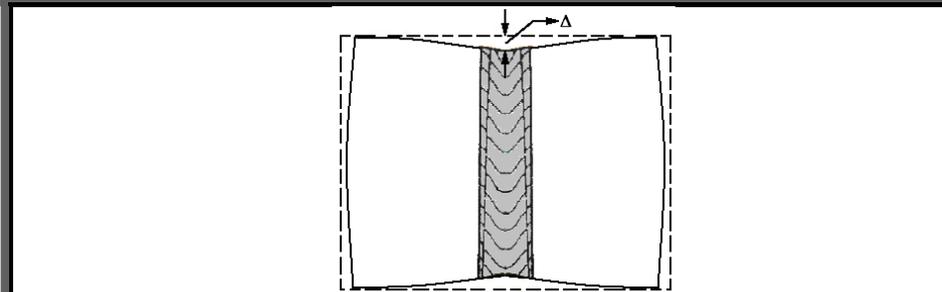
FIGURA 4.25: PRIMERA MEDICIÓN, $X_1' = 141,30$ mm



FIGURA 4.26: SEGUNDA MEDICIÓN, $X_2' = 141,70$ mm

Contracción Real.

TABLA 9
CONTRACCIÓN REAL - PROBETA # 03



Medidas antes de soldar	Medidas después de soldar	Contracción real $\Delta = X - X'$
141,35 mm	141.30 mm	0.05 mm
141.75 mm	141.70 mm	0.05 mm

El promedio de la distorsión es: $\Delta = 0.05\text{mm}$

Medición Analítica.

Para estimar la distorsión se utiliza la ecuación 3.6 con los siguientes parámetros.

C_3	305
$t(mm)$	5
$I(A)$	90
$L (mm)$	140

$$\Delta = \frac{C_3 I L}{t} \times 10^{-7} = 0.08 \text{ mm}$$

En resumen:

Valor real de la distorsión	Valor teórico de la distorsión
0.05 mm	0.08 mm

PROBETA # 04

Distorsión Longitudinal – Junta a Filete.

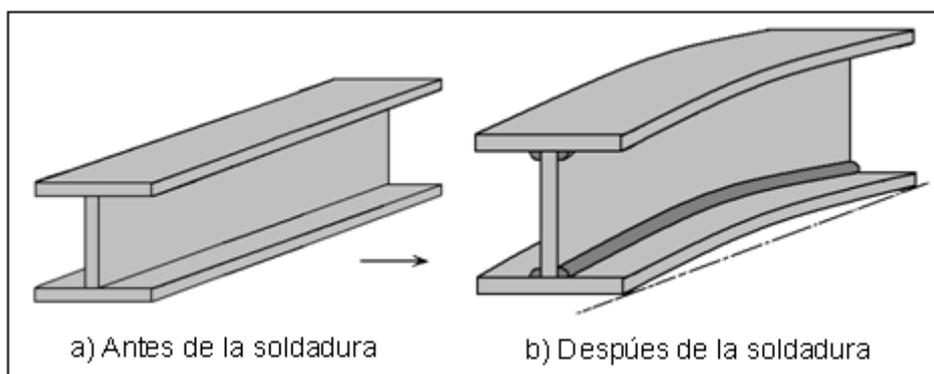


FIGURA 4.27: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL JUNTA A FILETE.

Medición Real.

SOLDADURA DE VIGAS I CON PROCESO SAW.

Se realizó la medición a tres vigas de las mismas características en el taller de Tainmesa S. A.

ACERO A-36.

- ✓ ALAS: 2 Planchas de 6600 mm x 300 mm x 8 mm
- ✓ ALMA: 1 Plancha de 6600 mm x 485 mm x 8 mm



FIGURA 4.28: CORTE Y PREPARACION DE LAS PLANCHAS ANTES DE SOLDARLAS.

Una vez cortadas se procese a preparar la viga centrandola y soldadola con pequeños cordones con MIG y alineada con un sujetador de tornillo sin fin para que la viga quede lista para llevarla a la maquina de SAW.



FIGURA 4.29: PREPARACIÓN DE LA VIGA I

Una vez lista la viga se prosede a quitar los soportes y llevarla a la maquina de SAW para centrarla y poder soldarla.



FIGURA 4.30: EXTRACCIÓN DE LOS SOPORTES DE LAS ALAS



FIGURA 4.31: ALINEACIÓN DE LA VIGA EN LA MAQUINA

En esta figura vemos: (a) la alineación de la viga con respecto a la maquina SAW, y (b) la alineación de la boquilla a 45° antes de soldar y una vez colocada y alineada la viga se procede a tomar los parametros para cada cordón de soldadura que se realice.

Cabe indicar que para los 4 cordones se realizó un pase por cada uno en posición horizontal 2F.

La viga fue soldada en el siguiente orden:

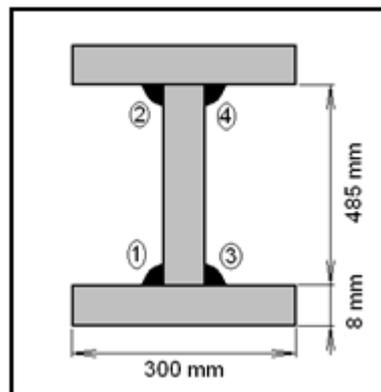


FIGURA 4.32: DIMENSIONES DE LA VIGA Y ENUMERACIÓN DEL ORDEN DE LOS CORDONES DE SOLDADURA.



FIGURA 4.33: PARAMETROS DE LA MAQUINA SAW

Primer cordón de soldadura.

El primer cordón de soldadura se lo realiza una vez que la viga a quedado completamente alineada y la boquilla esta en la posición adecuada (45°) para que pueda perderse el arco en el fundente.

TABLA 10

PARÁMETROS DEL PROCESO SAW – PROBETA # 04

Corriente de soldadura	400 A
Voltaje de soldadura	28 V
Tiempo de soldadura	14.41 min
Velocidad de avance	45.41 cm/min



FIGURA 4.34: SOLDADURA DEL PRIMER CORDÓN CON SAW.

Luego del primer cordón de soldadura se nota una leve distorsión angular debido al calentamiento y enfriamiento.



FIGURA 4.35: DISTORSIÓN ANGULAR PROVOCADA POR EL CALENTAMIENTO

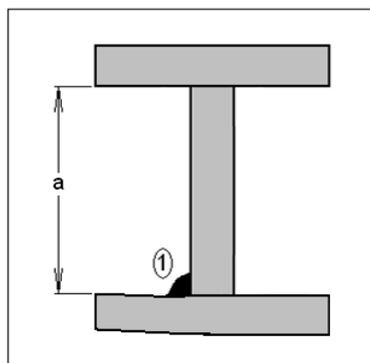


FIGURA 4.36: DISTORSIÓN ANGULAR POR EL PRIMER CORDÓN

Después del primer cordón de soldadura el valor de $a=485\text{mm}$ inicial tiende a reducirse. A continuación se presenta algunos valores tomados desde el inicio de la soldadura, 10 minutos luego de haber realizado el primer cordón.



FIGURA 4.37: DISMINUCIÓN DE LA DISTANCIA ENTRE LAS ALAS DEBIDO A LA DISTORSIÓN ANGULAR

TABLA 11

REDUCCIÓN ANGULAR DEL ALA DEBIDO AL PRIMER CORDÓN

Posición de la medición (m)	Valor de "a" (mm)
0 metros (Inicio)	477
2 metros	479
4 metros	478
6.6 metros	478

Segundo cordón de soldadura.

TABLA 12
PARÁMETROS DEL PROCESO SAW – PROBETA # 04

Corriente de soldadura	400 A.
Voltaje de soldadura	28 V.
Tiempo de soldadura	14.51 min
Velocidad de avance	45.48 cm/min



FIGURA 4.38: SOLDADURA DEL SEGUNDO CORDÓN.

De la misma forma, al realizar el otro cordón de soldadura se nota una distorsión angular en el ala de la viga quedando de la siguiente forma.

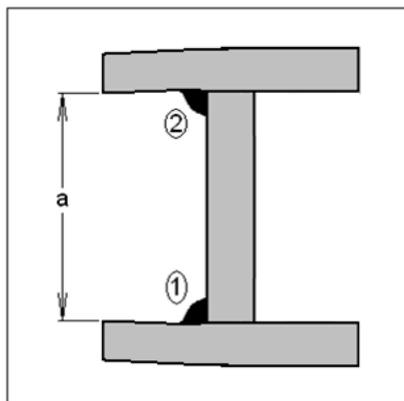


FIGURA 4.39: DISTORSIÓN ANGULAR POR EL SEGUNDO CORDÓN

Estos son los valores tomados una 10 minutos luego de haber terminado el segundo cordón de soldadura.

TABLA 13

REDUCCIÓN ANGULAR DEL ALA DEBIDO AL SEGUNDO CORDÓN

Posicion de la medición (m)	Valor de a (mm)
0 metros (Inicio)	475
2 metros	475
4 metros	474
5 metros	474
6.6 metros	474

Como se puede observar, la deformación ahora es mayor debido a que ahora se deformó por ambos lados.

Tercer cordón de soldadura.

TABLA 14

PARÁMETROS DEL PROCESO SAW – PROBETA # 04

Corriente de soldadura	400 A
Voltaje de soldadura	28 V
Tiempo de soldadura	15.11 min
Velocidad de avance	43.68 cm/min



FIGURA 4.40: SOLDADURA DEL TERCER CORDÓN CON SAW.

Al igual que los anteriores cordones, este produce una distorsión angular en el ala quedando la viga de esta forma.

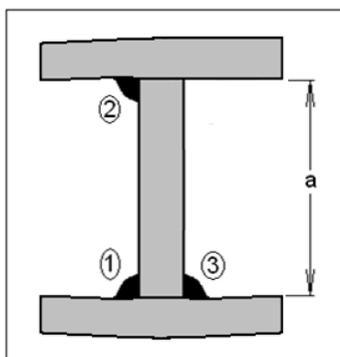


FIGURA 4.41: DISTORSIÓN ANGULAR POR EL TERCER CORDÓN

De la misma forma, se presenta a continuación los valores tomados 10 minutos luego de haber terminado el tercer cordón de soldadura.

TABLA 15

REDUCCIÓN ANGULAR DEL ALA DEBIDO AL TERCER CORDÓN

Posición de la medición (m)	Valor de a (mm)
0 metros (Inicio)	476
2 metros	473
4 metros	473
5 metros	474
6.6 metros	475

Cuarto cordón de soldadura.

TABLA 16
PARÁMETROS DEL PROCESO SAW – PROBETA # 04

Corriente de soldadura	400 A
Voltaje de soldadura	28 V
Tiempo de soldadura	15.25 min
Velocidad de avance	43.28 cm/min



FIGURA 4.42: SOLDADURA DEL CUARTO CORDÓN CON SAW.

Luego de la soldadura y al igual que los anteriores cordones, esto produce una distorsión angular en el ala quedado la viga:

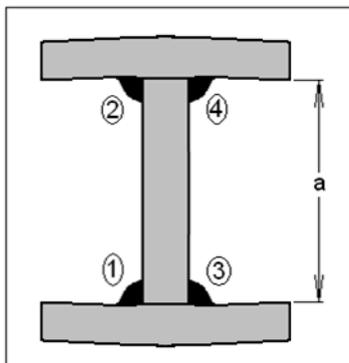


FIGURA 4.43: DISTORSIÓN ANGULAR POR EL CUARTO CORDÓN

Los valores de a son tomados 10 minutos luego de haber terminado el cuarto cordón de soldadura.

TABLA 17

REDUCCIÓN ANGULAR DEL ALA DEBIDO AL CUARTO CORDÓN

Posición de la medición (m)	Valor de a (mm)
0 metros (Inicio)	470
2 metros	471
4 metros	470
5 metros	474
6.6 metros	474

A demás de esta deformación angular, éstas vigas sufren una **distorsión longitudinal**, la misma que hace que se defleccione hacia un lado

A continuación se presenta la distorsión longitudinal por flexión a la que están expuestas estas vigas debido a longitud. Esta distorsión se puede apreciar en la siguiente fotografía.



FIGURA 4.44: CURVATURA EN LA VIGA I

Esta curvatura se debe a la distorsión longitudinal provocada por la soldadura por debajo del eje neutro.

Se utilizó una piola a lo largo de la viga y se tomo una medición en el centro siendo ésta de $\Delta_{\text{REAL}} = 1.5 \text{ mm}$

Medición Analítica:

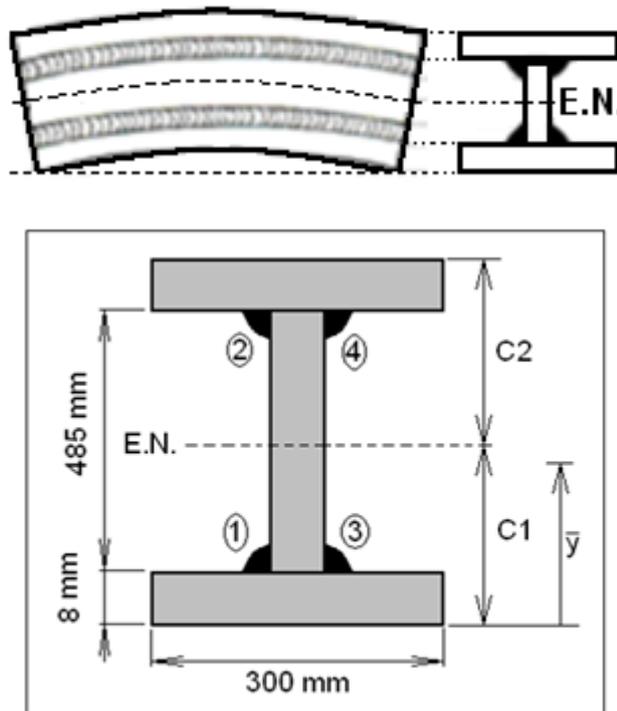


FIGURA 4.45: DIMENSIONES DE LA VIGA I

Para aplicar la ecuación 3.8 primero se obtienen los parámetros de distancia y momento de inercia.

Para el parámetro d :

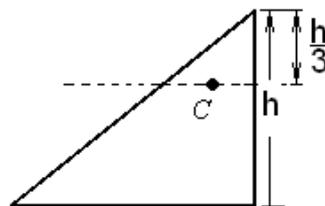
Como la viga I es simétrica, de la gráfica 4.45, tenemos:

$$\bar{y} = C_1 = 250.5 \text{ mm}$$

Este valor es el centro debido a que es simétrica.

Para obtener el parámetro d , se debe calcular el punto de acción de la fuerza de contracción el cual se asume que pasa por el centroide de la soldadura:

Se asume que la soldadura es un triángulo cuyo centroide es:



Entonces el valor de "d" será:

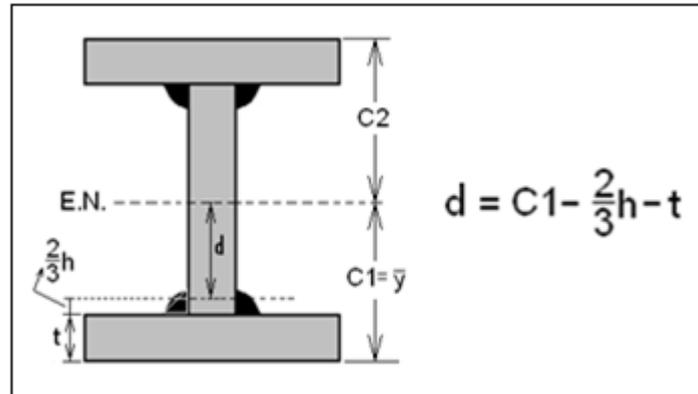
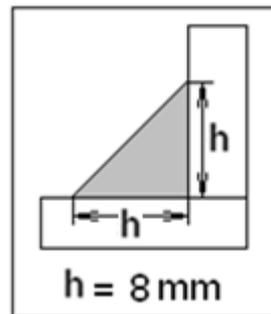


FIGURA 4.46: VALOR DEL PARÁMETRO "d"



FIGURA 4.47: MEDICIÓN DE LA ALTURA DE LA PIERNA



$$d = C1 - \frac{2}{3}h - t$$

$$d = 25.05 - \frac{2}{3}(0.8) - 0.8 =$$

$$d = 23.72 \text{ cm}$$

Para el momento de Inercia de la viga, debido a que la viga I es simétrica podemos hacer el siguiente cálculo.

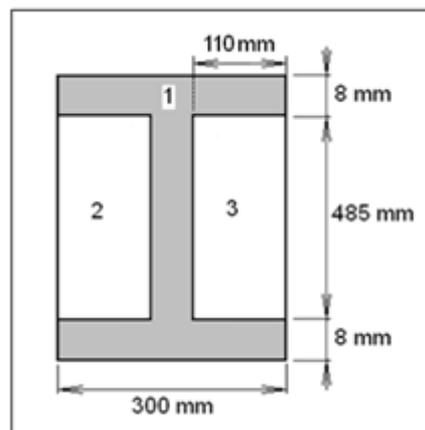


FIGURA 4.48: DIMENSIONES PARA OBTENER EL MOMENTO DE INERCIA DE LA VIGA I

Momento de inercia = M. de inercia del rectángulo 1 – M. de inercia del rectángulo 2 - M. de inercia del rectángulo 3

$$M. \text{ Inercia } I = M. \text{ Inercia } \square_1 - M. \text{ Inercia } \square_2 - M. \text{ Inercia } \square_3$$

Como: $\square_2 = \square_3$, entonces:

$$I = \left(\frac{bh^3}{12}\right)_1 - 2\left(\frac{bh^3}{12}\right)_{2,3}$$

$$b_1 = 30\text{cm}$$

$$h_1 = 50.1\text{cm}$$

$$b_{2,3} = 11\text{cm}$$

$$h_{2,3} = 48,5\text{ cm}$$

$$I = \left(\frac{bh^3}{12}\right)_1 - 2\left(\frac{bh^3}{12}\right)_{2,3} = 105224.52\text{ cm}^4$$

Momento de inercia de la viga es: $105224.52\text{ cm}^4 = 2528.03\text{ in}^4$

Para el área de la soldadura se utiliza el programa de costos.

$A_w = 35,20\text{ mm}^2$ ($0,05456\text{ pulg}^2$) es el área transversal teórica de la soldadura.

Entonces:

A_w (in ²)	0.05456
\bar{d} (in)	9.34
L (in)	260
I (in ⁴)	2528.03

$$\Delta = \frac{0.005A_w d L^2}{I} = 6.81 \times 10^{-2} \text{ in} = 1,73 \text{ mm}$$

En resumen:

Valor real de la distorsión	Valor teórico de la distorsión
1.50 mm	1,73 mm

PROBETA # 05

Distorsión Angular – Junta a Tope.

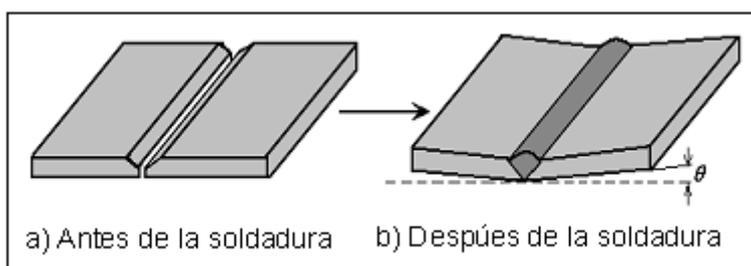


FIGURA 4.49: CONTRACCIÓN TRANSVERSAL JUNTA A FILETE.

Medición Real.

Para esta probeta se utilizaron 2 placas de acero A-36 con estas dimensiones:

2 placas de 500 x 150 x 8 mm.

TABLA 18

PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW – PROBETA # 05

Corriente de soldadura	120 A.
Voltaje de soldadura	24 V.
Número de pases	1
Posición	Plana 1G
Electrodo	E 7018

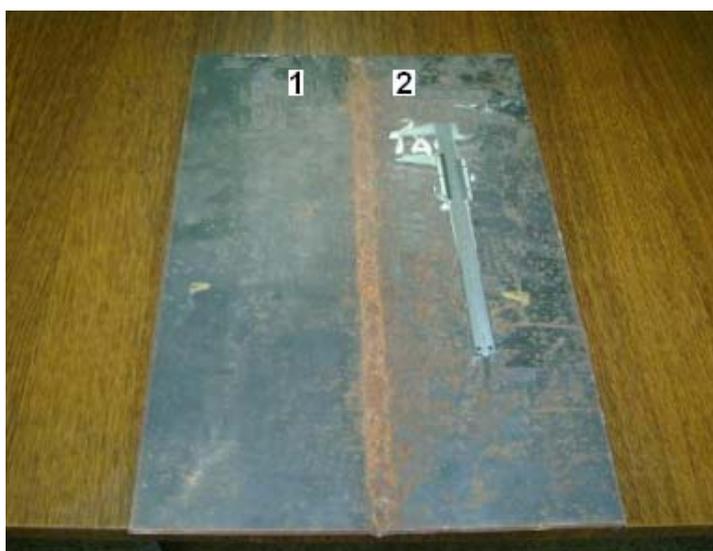


FIGURA 4.50: DISTORSIÓN ANGULAR EN UNA JUNTA A TOPE

Luego de realizar la soldadura con el proceso SMAW dejamos que se enfríe hasta alcanzar la temperatura ambiente y procedemos a tomar las mediciones de la distorsión angular.



FIGURA 4.51: EFECTO DE LA DISTORSIÓN ANGULAR

La distorsión ocasionada por el calentamiento y enfriamiento debido a la soldadura de una junta a tope sin restricción es:

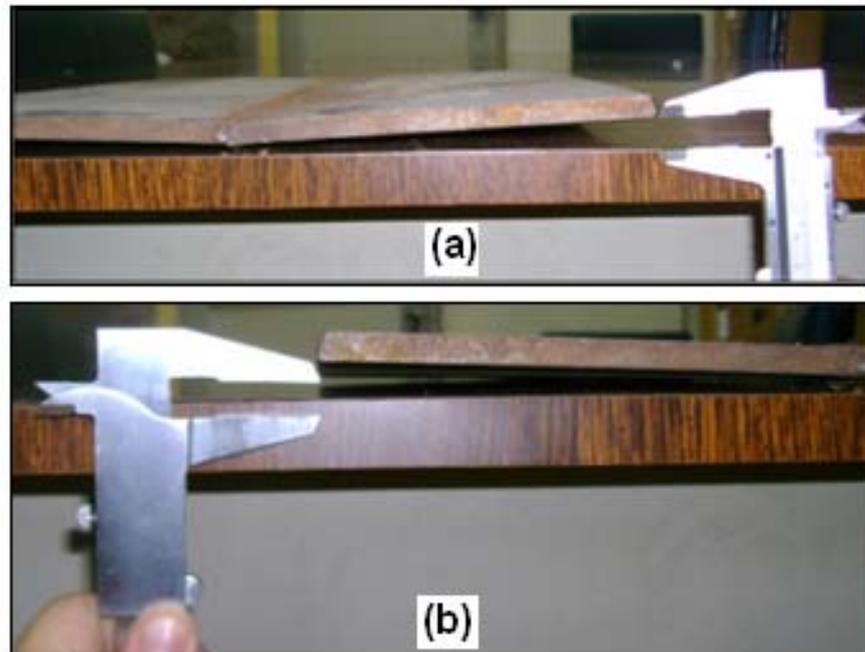


FIGURA 4.52: MEDICIÓN REAL DE LA DISTORSIÓN – JUNTA A TOPE

El valor es medido como deflexión en el borde de las planchas, los cuales son fácilmente llevados a grados mediante funciones trigonométricas.

a) Lado derecho $\Delta_{\text{REAL}} = 8.85 \text{ mm}$ ($\theta = 3.40^\circ$)

b) Lado izquierdo $\Delta_{\text{REAL}} = 8.40 \text{ mm}$ ($\theta = 3.21^\circ$)

Sacando un promedio tenemos:

$$\Delta_{\text{REAL}} = 8.63 \text{ mm. } (\theta = 3.30^\circ)$$

Medición Analítica.

No se encuentra datos para mediciones en este caso.

Distorsión Angular (Junta a Filete)

Medición Real:

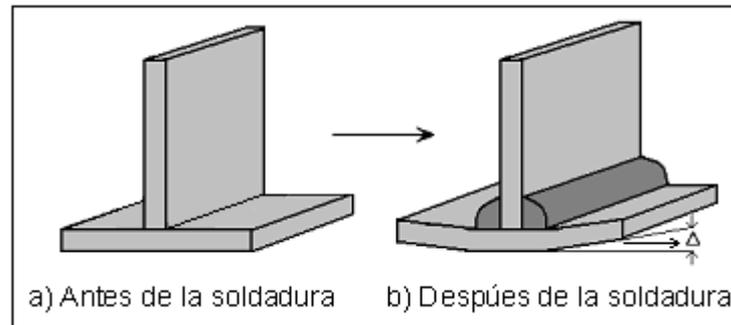


FIGURA 4.53: DISTORSIÓN ANGULAR EN UNA JUNTA A FILETE.

Esta distorsión angular es fácilmente medible como deflexión en el borde del ala, cuyo valor es llevado a grados mediante la utilización de funciones trigonométricas.

Para esta probeta se utilizaron 2 placas de acero A-36 con estas dimensiones: 2 placas de 200 x 200 x 16,5 mm. Se realizó la soldadura con los siguientes parámetros:

TABLA 19
PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW – PROBETA # 06

Corriente de soldadura	125 A
Voltaje de soldadura	24 V
Número de pases	4
Posición	Plana 1F
Electrodo	E 7018

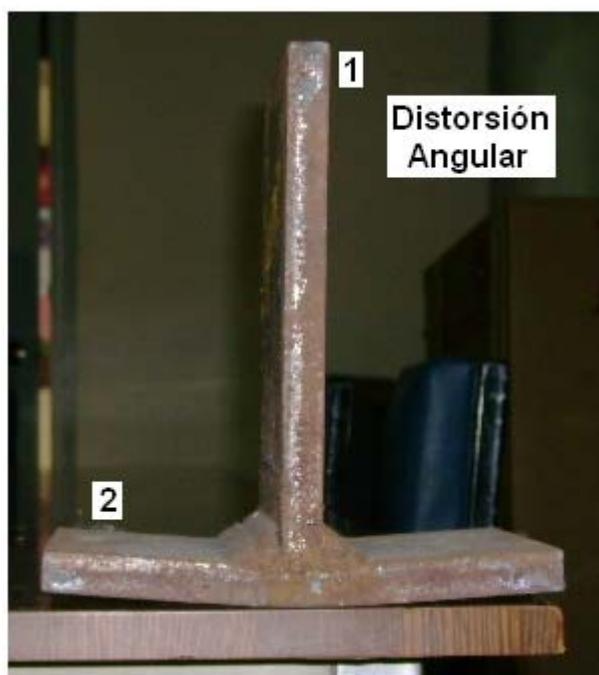


FIGURA 4.54: EFECTO DE LA DISTORSIÓN UNA VEZ QUE LAS PLACAS HAN ALCANZADO LA TEMPERATURA AMBIENTE

La distorsión ocasionada por el calentamiento y enfriamiento debido a la soldadura de una junta a tope sin restricción es:



FIGURA 4.55: MEDICIÓN REAL DE LA DISTORSIÓN – JUNTA A FILETE

a) Lado derecho $\Delta_{\text{REAL}} = 6.95 \text{ mm}$ ($\theta = 4.33^\circ$)

b) Lado izquierdo $\Delta_{\text{REAL}} = 6.65 \text{ mm}$ ($\theta = 4.15^\circ$)

Tomando un promedio de la distorsión tenemos: $\Delta = 6.80 \text{ mm}$ ($\theta = 4.24^\circ$)

Medición Analítica.

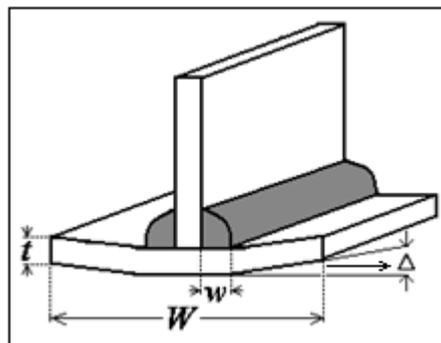


FIGURA 4.56: DIMENSIONES PARA EMPLEAR LA ECUACIÓN 3.9

<i>W (in)</i>	7.87
<i>w (in)</i>	0.78
<i>t (in)</i>	0.65

Una vez obtenidos los parámetros, utilizamos la ecuación 3.9:

$$\Delta = \frac{0.02W(w^{1.3})}{t^2} = 0.344 \text{ in} = 8.74 \text{ mm}$$

En resumen:

Valor real de la distorsión	Valor teórico de la distorsión
6.8 mm	8.74 mm

También existen graficas que permiten encontrar de manera aproximada la distorsión de las placas:

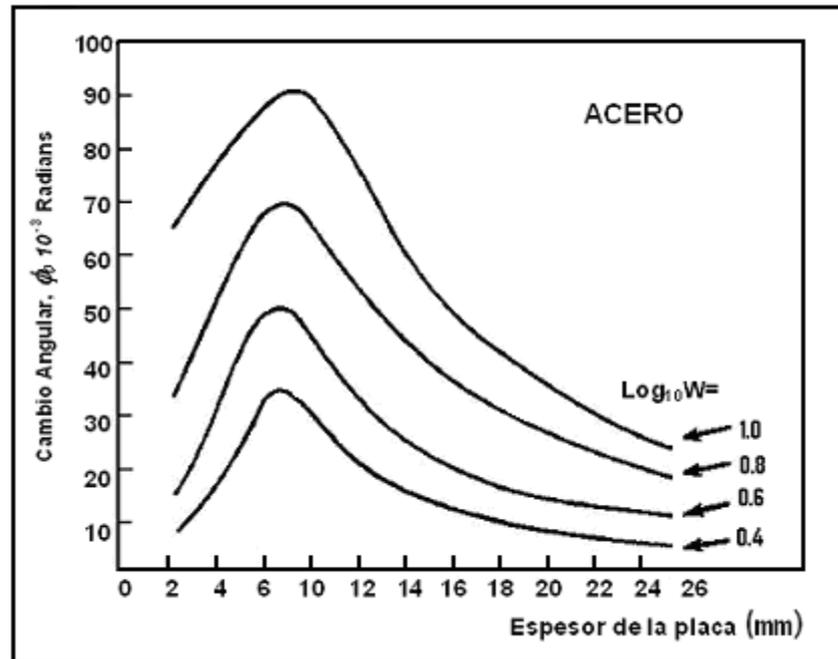


FIGURA 4.57: EFECTO DEL ESPESOR DEL ALA Y DEL PESO DEL MATERIAL DEPOSITADO POR UNIDAD DE LONGITUD EN LA DISTORSIÓN ANGULAR (3).

De este gráfico se obtiene el cambio angular en radianes para el acero A-36, el cual depende del espesor de las placas soldadas, y del peso por unidad de longitud.

Siendo el espesor $t = 16.5$ mm. El peso por unidad de longitud es:

$$W = \frac{\text{Peso}}{L}, \text{ la longitud de las placas es } L = 200 \text{ mm, por tanto el peso es el único}$$

parámetro a encontrar:

$\rho = \frac{m}{V}$; Donde la ***m*** es la masa (el peso) en kilogramos, ***ρ*** es la densidad del acero (electrodo): $\rho = 7.8 \text{ Kg/cm}^3$, y como el volumen es $V = AL$ y el área es conocida, entonces:

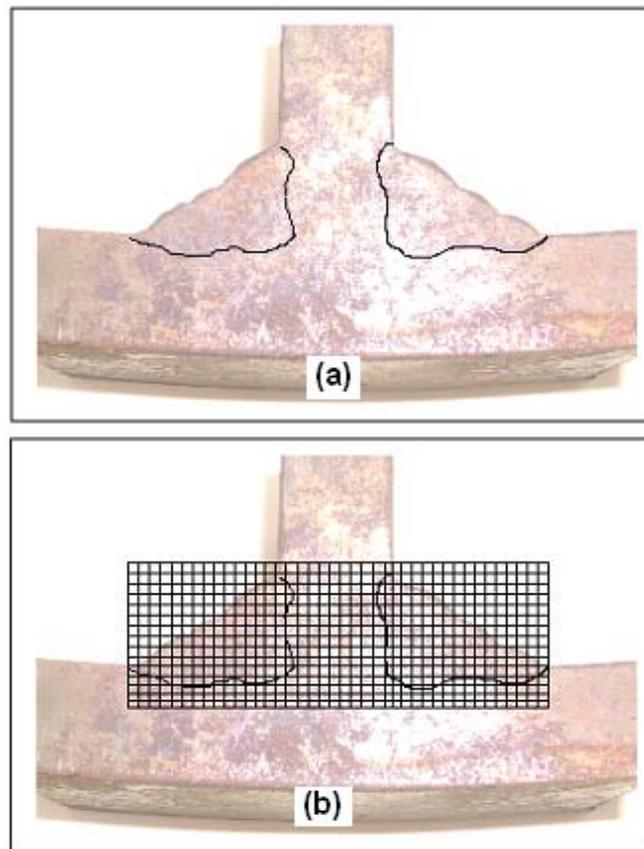


FIGURA 4.58: AREA DE SOLADURA REAL DE LA PROBETA # 06

a) Área obtenida luego del ataque químico.

b) $A = 3.97 \text{ cm}^2$

La densidad viene dada por: $\rho = \frac{m}{V}$; y el volumen: $V = AL$

$$W = \frac{\text{Peso}}{L} = \rho A$$

Finalmente con el espesor de $t = 16.5\text{mm}$ y el $W = 30,966 \text{ kg/cm}$ con su respectivo logaritmo de base 10: $\text{Log}_{10}W = 1.49$, vemos que este valor no aparece en la curva, pero al realizar el calculo nos da valores cercanos en caso de que haya una curva de $\text{Log}_{10}W = 1.49$

El ángulo real de inclinación es aproximadamente 2.5° , y es un valor que cercano a los valores que daría la grafica en caso de que exista la curva $\text{Log}_{10}W = 1.49$

4.3 Margen de Error de los Resultados Teóricos y Experimentales.

$$\% Error = \frac{\Delta_{teórico} - \Delta_{real}}{\Delta_{teórico}}$$

CONTRACCION TRANSVERSAL	
<u>PROBETA # 01</u>	<u>PROBETA # 02</u>
Valor Real: 1.93 mm Valor Teórico: 1.87 mm $\% Error : 3.53 \%$	Valor Real: 0,58 mm Valor Teórico: 0,82 mm $\% Error : 28.52 \%$
CONTRACCION LONGITUDINAL	
<u>PROBETA # 03</u>	<u>PROBETA # 04</u>
Valor Real: 0.05 mm Valor Teórico: 0.08 mm $\% Error : 35.75 \%$	Valor Real: 1.50 mm Valor Teórico: 1,73 mm $\% Error : 13.30\%$
(*) DISTORSION ANGULAR	
<u>PROBETA # 05</u>	<u>PROBETA # 06</u>
Valor Real: 8.63 mm	Valor Real: 6.80 mm Valor Teórico: 8.70 mm $\% Error : 21.84 \%$

(*) Distorsión angular: medida como deflexión en el borde de la plancha cuyos valores son fácilmente llevados a grados mediante funciones trigonométricas.

4.3 Discusión de Resultados

TABLA 20

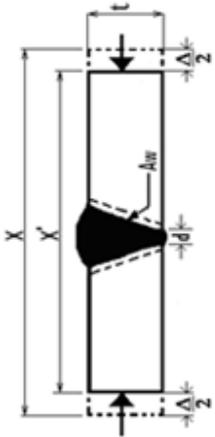
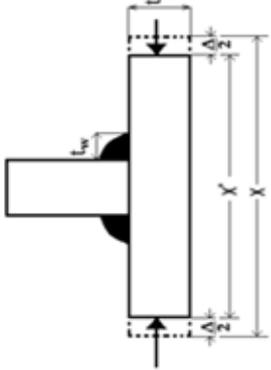
PARAMETROS Y RESULTADOS	Contracción Transversal	
	Probeta # 01 – Junta a Tope	Probeta # 02 – Junta a Filete
		
Proceso de soldadura	SMAW	SMAW
Corriente de soldadura (A)	120	120
Voltaje de soldadura (V)	23	23
Velocidad de avance (cm/min)	15,83	-
Número de pases (N)	3	2
Posición	Plana 1G	Plana 1F
Electrodo	E7018 1/8	E7018 1/8
Distorsión real (mm)	1,93	0,58
Distorsión teórica (mm)	1,87	0,82

TABLA 21

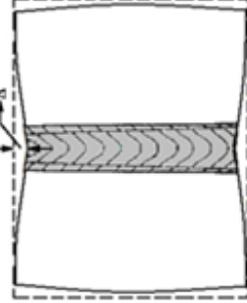
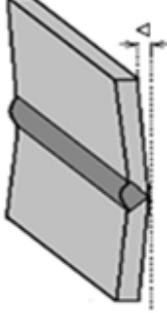
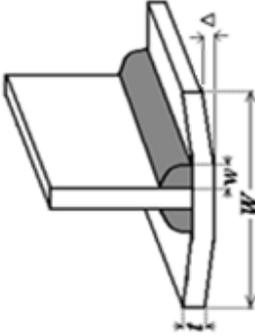
<u>PARAMETROS Y RESULTADOS</u>	Contracción Longitudinal	
	Probeta # 03 – Junta a Tope	Probeta # 04 – Junta a Filete
		
Proceso de soldadura	SMAW	SAW
Corriente de soldadura (A)	90	400
Voltaje de soldadura (V)	23	28
Velocidad de avance (cm/min)	-	45,41
Número de pases (N)	2	1
Posición	Plana 1G	Horizontal 2F
Electrodo	E7018 1/8	-
Distorsión real (mm)	0,05	1,50
Distorsión teórica (mm)	0,08	1,73

TABLA 22

PARAMETROS Y RESULTADOS	Distorsión Angular	
	Probeta # 05 – Junta a Tope	Probeta # 06 – Junta a Filete
		
Proceso de soldadura	SMAW	SMAW
Corriente de soldadura (A)	120	125
Voltaje de soldadura (V)	24	24
Velocidad de avance (cm/min)	-	-
Número de pases (N)	1	4
Posición	Plana 1G	Plana 1F
Electrodo	E7018 1/8	E7018 1/8
Distorsión real (mm)	8,63	6,80
Distorsión teórica (mm)	-	8,70

Distorsión Angular medida como deflexión en el borde de la plancha cuyo valor es fácilmente llevado a grados

- Los valores obtenidos de la contracción transversal real son los mas cercanos comparados a sus correspondientes valores teóricos.
- La contracción real que sufrieron las probetas #01 y #02 tuvieron una pequeña variación en los diferentes puntos donde fueron medidas inicialmente, lo que nos permite observar que para este caso, la contracción se produce por igual a lo largo de toda la soldadura.
- Las mediciones de distorsión en las Vigas I, nos indica un porcentaje de error bastante bajo.
- La contracción longitudinal en las planchas soldadas a tope no es considerable debido a que la longitud de la soldadura es pequeña.
- El resultado de la probeta # 06 es bastante aproximado y el más accesible para la medición real.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

Conclusiones:

1. Los resultados del cálculo de distorsión real vs. analítica en la mayoría de las probetas permiten obtener un error menor al 25% excepto en la contracción longitudinal en la junta a tope debido a ésta muestra un margen de error del 35.75%, ocasionado por la dificultad al tomar la medición real.
2. El resultado de la medición de la contracción longitudinal de las planchas soldadas a tope es la de menor grado de contracción, y el valor obtenido de la ecuación empírica para este caso lo demuestra.

3. Los valores obtenidos en las contracciones transversales de las probetas soldadas tanto a tope como a filete son resultados bastante pequeños y sus ecuaciones empíricas lo demuestran, debido a que en éstas no entran parámetros como el ancho ni el largo de las planchas y solo dependen de la cantidad de soldadura depositada y del espesor de las planchas.

4. Los mayores valores de distorsión se obtuvieron en las probetas que se distorsionaron angularmente, cuyos valores de las deflexiones en el borde de las planchas son superiores a 6 mm.

Recomendaciones:

1. Se recomienda utilizar instrumentos de mediciones más avanzados como micrómetro digitales para así obtener valores de contracciones reales más exactos ya que éstos son valores muy bajos y difícilmente medibles con un calibrador vernier.
2. Para la medición de la distorsión angular en junta a filete se recomienda utilizar las curvas que muestran las gráficas propuestas para algunos aceros debido a que estas curvas proporcionan valores más exactos de distorsión ya que dependen del espesor del ala y la cantidad de soldadura depositada.
3. Para la soldadura de elementos en junta a tope o a filete, se debe controlar los parámetros de aporte de calor, velocidad de avance, número de pases, espesor del ala, tamaño de junta, debido a que estos parámetros se encuentran en las ecuaciones empíricas y así poder disminuir la distorsión.

APÉNDICES

APÉNDICE A:

NORMA AWS D1.1

**TABLA 3.1: REQUERIMIENTOS DEL MATERIAL BASE
Y MATERIAL DE APORTE.**

Table 3.1
Prequalified Base Metal—Filler Metal Combinations for Matching Strength (see 3.3)

G F O U P	Steel Specification Requirements				Filler Metal Requirements		
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range	Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification
		ksi	MPa				
	ASTM A 36 ($\leq 3/4$ in. [20 mm])	36	250	58-80	400-550	A5.1	E60XX, E70XX
	ASTM A 53 Grade B	35	240	60 min	415 min	A5.5 ³	E70XX-X
	ASTM A 106 Grade B	35	240	60 min	415 min		
	ASTM A 131 Grades A, B, CS, D, DS, E	34	235	58-71	400-490		
	ASTM A 139 Grade B	35	241	60 min	414 min	A5.17	F6XX-EXXX, F6XX-ECXXX, F7XX-EXXX, F7XX-ECXXX
	ASTM A 381 Grade Y35	35	240	60 min	415 min		
	ASTM A 500 Grade A	33	228	45 min	310 min	A5.23 ³	F7XX-EXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 501 Grade B	42	290	58 min	400 min		
	ASTM A 516 Grade 55	30	205	55-75	380-515		
	ASTM A 516 Grade 60	32	220	60-80	415-550	A5.18	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix shall be excluded)
	ASTM A 524 Grade I	35	240	60-85	415-586		
	ASTM A 524 Grade II	30	205	55-80	380-550		
I	*						
	ASTM A 570 Grade 30	30	205	49 min	340 min	A5.28 ³	ER70S-XXX, E70C-XXX
	ASTM A 570 Grade 33	33	230	52 min	360 min		
	ASTM A 570 Grade 36	36	250	53 min	365 min		
	ASTM A 570 Grade 40	40	275	55 min	380 min	A5.20	E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than $1/2$ in. [12 mm])
	ASTM A 573 Grade 45	45	310	60 min	415 min		
	ASTM A 573 Grade 65	35	240	65-77	450-530		
	ASTM A 573 Grade 58	32	220	58-71	400-490		
	ASTM A 709 Grade 36 ($\leq 3/4$ in. [20 mm])	36	250	58-80	400-550		
	API 5L Grade B	35	240	60	415		
	API 5L Grade X42	42	290	60	415		
	ABS Grades A, B, D, CS, DS			58-71	400-490	A5.29 ³	E6XT-X, E6XT-XM, E7XT-X, E7XT-XM
	ABS Grade E ²			58-71	400-490		

*ASTM A 529 (min yield 42 ksi) has been deleted.

(continued)

Table 3.1 (Continued)

	Steel Specification Requirements			Filler Metal Requirements		
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength	Tensile Range	Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification
G		ksi	MPa			
F		ksi	MPa			
D		ksi	MPa			
P		ksi	MPa			
	ASTM A 36	36	250	58-80	400-550	E7015, E7016, E7018, E7028
	ASTM A 131		315	68-85	470-485	
	ASTM A 441	51	350	71-90	490-620	E7015-X, E7016-X, E7018-X
	ASTM A 516	40-50	275-345	60-70	415-485	
	ASTM A 529	35	240	65-85	450-585	F7XX-BXXX-XX, F7XX-ECXXX-XX
	ASTM A 537	38	260	70-90	485-620	
	ASTM A 570	50	345	70-100	485-690	
	ASTM A 572	55	380	70-100	485-690	
	ASTM A 588 ⁵	45-50	310-345	65-90	450-620	
	ASTM A 595	50	345	65	450	
	ASTM A 606 ⁵	55	380	70	480	
	ASTM A 607	42	290	60 min	415 min	ER70S-X, E70C-XC, E70C-XM (Electrodes with the -GS suffix shall be excluded)
	ASTM A 618	50	345	65 min	450 min	
	ASTM A 633	55	380	70 min	485 min	
	ASTM A 709	60	415	70 min	480 min	ER70S-XXX, E70C-XXX
	ASTM A 710	45-50	310-340	65 min	450 min	
	ASTM A 808	45	310	60 min	410 min	
	ASTM A 913	50	345	65 min	450 min	
	ASTM A 992	55	380	70 min	480 min	
	API 2H	46-50	315-345	65 min	450 min	E7XT-X, E7XT-XM (Electrodes with the -2, -2M, -3, -10, -13, -14, and -GS suffix shall be excluded and electrodes with the -11 suffix shall be excluded for thicknesses greater than 1/2 in. [12 mm])
	API 2W	42	290	63-83	430-570	
	API 2Y	50	345	70-90	485-620	
	API 3L	36	250	58-80	400-550	
	ABS	50	345	65 min	450 min	
		50	345	70 min	485 min	
		55	380	70 min	480 min	
		42	290	63-83	430-570	
		50	345	70-90	485-620	
		36	250	58-80	400-550	
		50	345	65 min	450 min	
		50	345	70 min	485 min	
		55	380	65 min	450 min	
		42	290	60 min	415 min	
		50	345	65 min	450 min	
		50-65	345-450	65	450	
		42	290	62-80	430-550	
		50	345	70 min	485 min	
		42-67	290-462	62 min	427 min	
		50-75	345-517	65 min	448 min	
		50-80	345-552	70 min	483 min	
		42-67	290-462	62 min	427 min	
		50-75	345-517	65 min	448 min	
		50-80	345-552	70 min	483 min	
		52	360	66-72	455-495	
		45.5	315	71-90	490-620	
		51	350	71-90	490-620	

(continued)

Table 3.1 (Continued)

G I o u P	Steel Specification Requirements				Filler Metal Requirements			
	Steel Specification	Minimum Yield Point/Strength		Tensile Range		Process	AWS Electrode Specification	Electrode Classification
		ksi	MPa	ksi	MPa			
III	API 2W	Grade 60	60-90	414-621	75 min	517 min	SMAW	E8015-X, E8016-X, E8018-X
	API 2Y	Grade 60	60-90	414-621	75 min	517 min		
	ASTM A 572	Grade 60	60	415	75 min	515 min	SAW	F8XX-EXXX-XX, F8XX-ECXXX-XX
		Grade 65	65	450	80 min	550 min		
	ASTM A 537	Class 2 ²	46-60	315-415	80-100	550-690	GMAW	ER80S-XXX, E80C-XXX
	ASTM A 633	Grade E ²	55-60	380-415	75-100	515-690		
	ASTM A 710	Grade A, Class 2 ≤ 2 in. [50 mm]	60-65	415-450	72 min	495 min	FCAW	E8XTX-X, E8XTX-XM
	ASTM A 710	Grade A, Class 3 > 2 in. [50 mm]	60-65	415-450	70 min	485 min		
	ASTM A 913 ¹	Grade 60	60	415	75 min	520 min		
		Grade 65	65	450	80 min	550 min		
IV	ASTM A 709	Grade 70W	70	485	90-110	620-760	SMAW	E9015-X, E9016-X, E9018-X, E9018-M
			70	485	90-110	620-760		
	ASTM A 852	Grade 70W	70	485	90-110	620-760	SAW	F9XX-EXXX-XX, F9XX-ECXXX-XX
			70	485	90-110	620-760		
GMAW	Grade 70W	70	485	90-110	620-760	GMAW	ER90S-XXX, E90C-XXX	
		70	485	90-110	620-760			
FCAW	Grade 70W	70	485	90-110	620-760	FCAW	E9XTX-X, E9XTX-XM	

General Notes:

- In joints involving base metals of different groups, either of the following filler metals may be used: (1) that which matches the higher strength base metal, or (2) that which matches the lower strength base metal and produces a low-hydrogen deposit. Preheating shall be in conformance with the requirements applicable to the higher strength group.
- Match API standard 2B (fabricated tubes) according to steel used.
- When welds are to be stress-relieved, the deposited weld metal shall not exceed 0.05 percent vanadium.
- See Tables 2.3 and 2.5 for allowable stress requirements for matching filler metal.
- Filler metal properties have been moved to nonmandatory Annex C.
- AWS A5M (SI Units) electrodes of the same classification may be used in lieu of the AWS A5 (U.S. Customary Units) electrode classification.
- Any of the electrode classifications for a particular Group (located on the right) may be used to weld any of the base metals in that Group (located on the left).

Notes:

1. The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A 913, Grade 60 or 65.
2. Special welding materials and WPS (e.g., E80XX-X low-alloy electrodes) may be required to match the notch toughness of base metal (for applications involving impact loading or low temperature), or for atmospheric corrosion and weathering characteristics (see 3.7.3).
3. Filler metals of alloy group B3, B3L, B4, B4L, B5, B5L, B6, B6L, B7, B7L, B8, B8L, B9, or any EXH grade in AWS A5.5, A5.23, A5.28, or A5.29 are not prequalified for use in the as-welded condition.

APÉNDICE B:

NORMA AWS D1.1

TABLA 3.2: TEMPERATURAS MÍNIMA DE PRE- CALENTAMIENTO

Table 3.2
Prequalified Minimum Preheat and Interpass Temperature (see 3.5)

C a 1 e B O T y	Steel Specification		Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature		
	in. [20 mm]	mm		in.	mm		°F	°C
A	ASTM A 36	3/4 in. [20 mm]	SMAW with other than low-hydrogen electrodes	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 ¹	0 ¹	
	ASTM A 53	Grade B		Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	150	65	
	ASTM A 106	Grades A, B, CS, D, DS, E		Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	225	110	
	ASTM A 131	Grade B		Over 2-1/2 thru 3 in.	Over 65 thru 150 incl.	300	150	
	ASTM A 139	Grade Y35						
	ASTM A 381	Grade A						
	ASTM A 500	Grade B						
	ASTM A 501	Grade B						
	ASTM A 36	3/4 in. [20 mm]						
	ASTM A 53	Grade B						
B	ASTM A 106	Grades A, B, CS, D, DS, E	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 ¹	0 ¹	
	ASTM A 131	Grade B		Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 thru	50	10	
	ASTM A 139	Grade B		Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 thru	150	65	
	ASTM A 381	Grade Y35		Over 2-1/2 thru 3 in.	Over 65 thru 150 thru	300	150	
	ASTM A 500	Grade B						
	ASTM A 501	Grade B						
	ASTM A 441	Grade A						
	ASTM A 500	Grade B						
	ASTM A 501	Grades 45 & 60						
	ASTM A 516	Grades 65 & 70						
B	ASTM A 524	Grades I & II	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, FCAW	1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	32 ¹	0 ¹	
	ASTM A 529	Grades 42, 50, 55		Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 thru	50	10	
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80		Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 thru	150	65	
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80		Over 2-1/2 thru 3 in.	Over 65 thru 150 thru	300	150	
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						
	ASTM A 537	Grades 42, 50, 55, 60, 65, 70, 80						

Table 3.2 (Continued)

	Steel Specification	Welding Process	Thickness of Thickest Part at Point of Welding		Minimum Preheat and Interpass Temperature	
			in.	mm	°F	°C
C			1/8 to 3/4 incl.	3 to 20 incl.	50	10
a	ASTM A 572 Grades 60, 65		Over 3/4 thru 1-1/2 incl.	Over 20 thru 38 incl.	150	65
b	ASTM A 633 Grade B		Over 1-1/2 thru 2-1/2 incl.	Over 38 thru 65 incl.	225	110
c	API 5L Grade X52		Over 2-1/2 thru 3 in.	Over 65 thru 90 incl.	300	150
d	ASTM A 913 ² Grades 60, 65	SMAW with low-hydrogen electrodes, SAW, GMAW, GTAW				
e	ASTM A 710 Grade A, Class 2 (≤2 in. [50 mm])					
f	ASTM A 710 Grade A, Class 3 (>2 in. [50 mm])					
g	ASTM A 709 ³ Grade 70W					
h	ASTM A 852 ¹					
i	API 2W					
j	API 2Y					
	ASTM A 710 Grade A (All classes)	SMAW, SAW, GMAW, and FCAW with electrodes or electrode-flux combinations capable of depositing weld metal with a maximum diffusible hydrogen content of 8 ml/100 g (H ₈), when tested according to AWS A4.3.				
D	ASTM A 913 ³ Grades 50, 60, 65		Over 2-1/2 thru 3 in.	Over 65 thru 90 incl.	32 ¹	0 ¹

General Notes:

- For modification of preheat requirements for SAW with parallel or multiple electrodes, see 3.5.3.
- See 3.12.2 and 3.6 for ambient and base-metal temperature requirements.

Notes:

1. When the base metal temperature is below 32°F (0°C), the base metal shall be preheated to a minimum of 70°F (20°C) and the minimum interpass temperature shall be maintained during welding.
2. The heat input limitations of 5.7 shall not apply to ASTM A 913.
3. For ASTM A 709 Grade 70W and ASTM A 852 Grade 70, the maximum preheat and interpass temperatures shall not exceed 400°F [200°C] for thicknesses up to 1-1/2 in. [40 mm], inclusive, and 450°F [230°C] for greater thicknesses.

APÉNDICE C:

COMPARACIÓN DE LA DISTORSIÓN ANGULAR DE UNA SOLDADURA EN JUNTA A FILETE DE ACERO VS. ALUMINIO

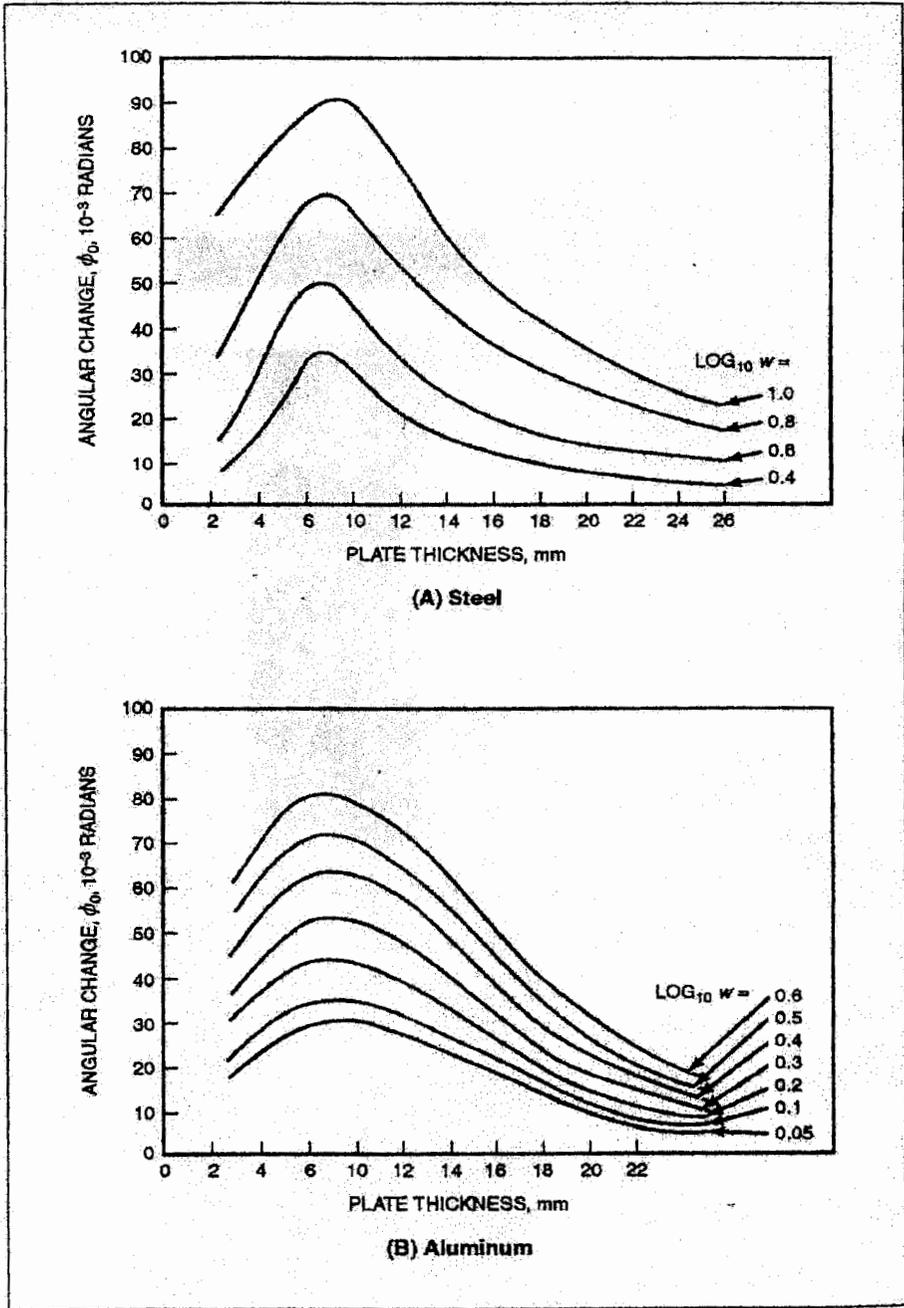


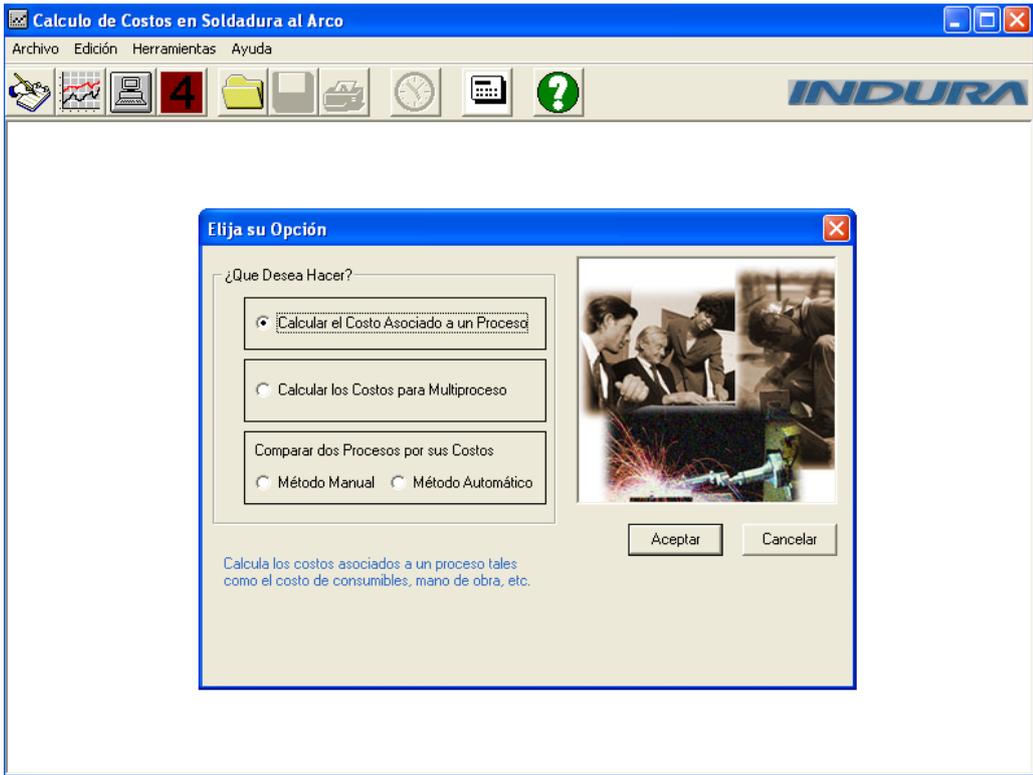
Figure 7.46—Effect of Plate Thickness, t , and Filler Metal Weight, f , per Unit Length of Weld on the Angular Change in Unrestrained Fillet Welds, ϕ_0 : (A) Steel and (B) Aluminum (SI Units)

Table 7.10
Ranges of Designs for Calculated Angular Distortion in Steel and Aluminum Fillet Welds

	Inches		Millimeters	
	Min	Max	Min	Max
Plate thickness (t)	0.24	0.70	6	18
Distance between stiffeners (L)	20	32	500	800
Weld leg size (D_f)	3/16	1/2	5	12

APÉNDICE D:

**PROGRAMA DE COSTOS INDURA S.A.
PARA CALCULAR ÁREAS EN TODO TIPO DE
SOLDADURAS**



Calculo para un Proceso

General | SMAW (Arco Manual) | Mano de Obra, Gastos Generales

Proceso de Soldadura

Area de Sección Transversal mm²

Proceso

Información General

Descripción

Fecha

Preparado por

Empresa



Area de Sección Transversal AST

Elija el Tipo de Unión

				Unión Cordón

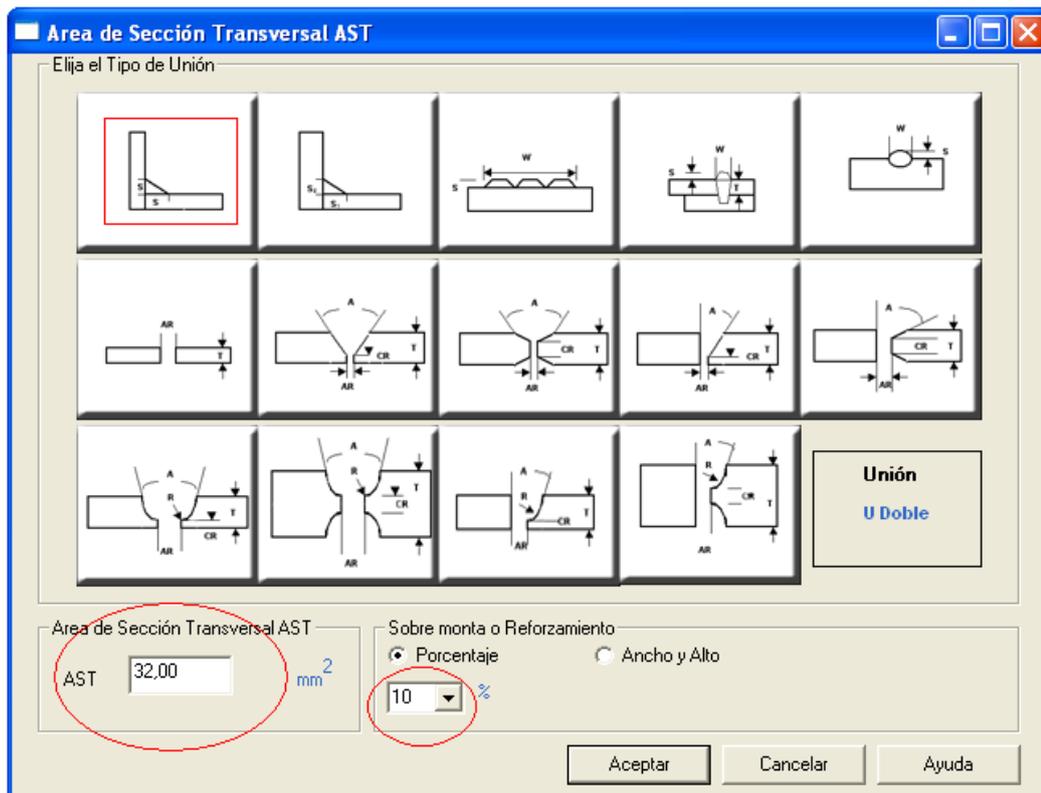
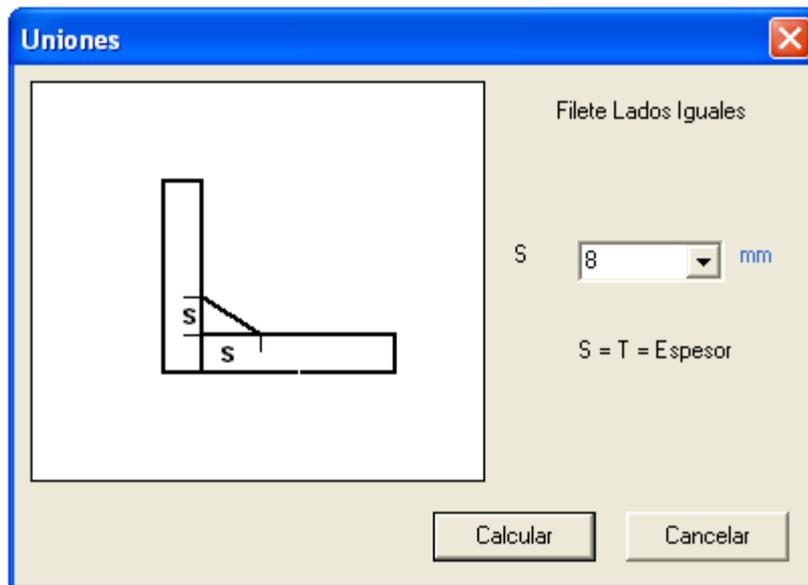
Area de Sección Transversal AST

AST mm²

Sobre monta o Reforzamiento

Porcentaje Ancho y Alto

%



Calculo para un Proceso

General | SMAW (Arco Manual) | Mano de Obra, Gastos Generales

Proceso de Soldadura

Area de Sección Transversal mm²

Proceso



Información General

Descripción

Fecha

Preparado por

Empresa

BIBLIOGRAFÍA

1. FOSCA CARLOS, Introducción a la Metalurgia de la Soldadura, Quinta Edición, Lima, Enero 2005.
2. HERNANDEZ R. GERMAN, CESOL, Manual Del Soldador, Doceava Edición, Madrid, Mayo 2004.
3. L. CYNTHIA, O' BRIEN A., Welding Handbook, Welding Science and Technology, Ninth Edition, Volume 1, Miami 2001.
4. Serrano V. Omar, Soldadura (Guía de estudio de la materia de Soldadura de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción de la ESPOL, Guayaquil).
5. J. PUCHAICELA, Welding Journal (Control of Distortion of Welded Steel Structures) August, 1998.

6. <http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/distortion.asp>
7. LINNERT GEORGE, Welding Metallurgy, Third Edition, Volume 2, Ohio, March 1996.
8. <http://www.infoab.uclm.es/labelec/Solar/Componentes/SDEFORMACION.htm>
9. <http://www.lanl.gov/residual/links.shtml> - 12k
10. <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/FeriaVirtual/ResenyaProducto.asp?R=18019>