

# CAPÍTULO 4.

## APLICACIONES PRÁCTICAS

### 4.1 DISEÑO DE LAS JUNTAS PARA PROBETAS

El diseño y la preparación de cualquier tipo de junta son de vital importancia como la propia soldadura, ya que de este depende la seguridad y la vida útil de los elementos soldados. Un diseño correcto debe producir una soldadura de resistencia apropiada y de buen desempeño en servicio, además ayuda a controlar las distorsiones, reduce la posibilidad de agrietamiento, facilita el trabajo del operador y produce sueldas sanas a un bajo costo.

Para el diseño de una junta soldada se debe analizar los siguientes aspectos

- Tipo de junta y unión a realizar
- Posición de soldadura
- Proceso de soldadura a utilizar
- Condiciones de servicio al cual va a ser sometido la junta (tipo de carga, naturaleza de la carga)<sup>1</sup>

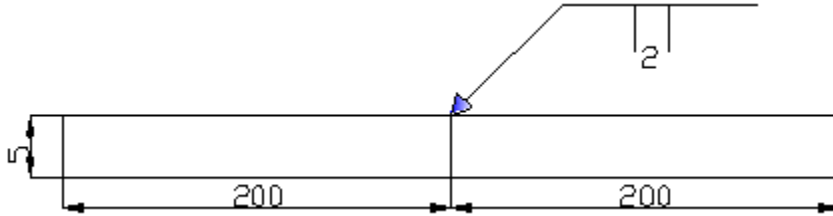
Los soldadores pueden o no participar en la preparación de la unión pero deben conocer los procedimientos correctos para ensamblar la junta.

#### Diseño de la juntas

**Cuadro 4.1 Parámetros del diseño de las juntas soldadas**

Tipo de junta y unión a realizar	Junta a tope
Posición de soldadura	Plana horizontal
Proceso de soldadura a utilizar	Soldadura SMAW
Condiciones de servicio al cual va a ser sometido la junta	Proceso de Taladrado

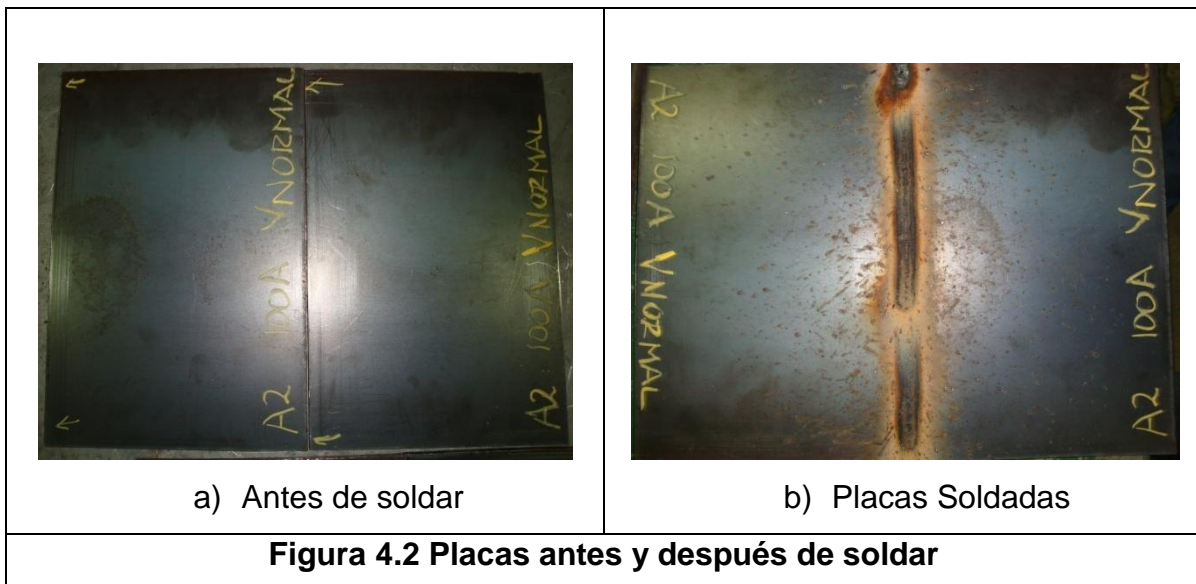
<sup>1</sup> NARANJO C, Folleto de Tecnología de Soldadura, p. 28



**Figura 4.1 Diseño de las juntas soldadas**

Las medidas de las probetas se establecieron en el orden de:

- 1) Generar esfuerzos residuales, debido a que se desea que exista una zona que no esté afectada por el calor de la soldadura para que los procesos de dilatación y contracción se realicen efectivamente, y además por que la masa tiene directa relación con la distribución de temperaturas provocadas por el proceso.
- 2) Poder realizar las mediciones de los esfuerzos residuales, la norma ASTM E 837 no establece ningún tipo de recomendación para establecer las dimensiones, en lo que si da mucho énfasis es en la diferencia entre un placa delgada y un placa gruesa ya que el método de medición y cálculo son distintos.



Para la realización de estas pruebas, se seleccionó el material A36, por su gran uso en la industria ecuatoriana y por sus propiedades mecánicas.

## 4.2 HABILIDADES Y DESTREZAS DEL SOLDADOR

Para la realización de las probetas del presente proyecto se contó con soldadores calificados y capacitados con lo cual se tiene la certeza de que la soldadura tendrá un mínimo de defectos y cumplirá con las propiedades mecánicas necesarias.

Lo ideal para este proyecto sería que las probetas fuesen soldadas por la misma persona y en las mismas circunstancias, pero lamentablemente por el tiempo y la disponibilidad de los soldadores, son tres personas diferentes que soldaron y en lugares diferentes por las máquinas, ya que se necesitó soldadoras que trabajen con corriente alterna y con continua, entonces se dispuso de la maquinaria de FMSB y las maquinaria del laboratorio de Manufactura del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

Los soldadores deben tener destrezas, por ejemplo una destreza de los soldadores por arco, es que tiene que establecer un arco eléctrico en un extremo de la junta a realizar y mantenerlo, para conseguir la fusión de los bordes de las piezas y del electrodo. El material fundido del extremo del electrodo se deposita entre las piezas y junto con el que resulta de la fusión de los bordes forma el baño de fusión.<sup>2</sup>

También debe tener los conocimientos suficientes para el uso de los electrodos adecuados en función del trabajo a realizar, además ser capaz de seguir las instrucciones establecidas en las especificaciones; por ejemplo: leer símbolos de soldadura y realizar cualquier tipo de costura utilizando la técnica adecuada, o especializarse en un proceso.

El soldador también es responsable de establecer los factores adecuados para cada material a soldar, además de la alineación correcta de las piezas a unir.

Todos los soldadores necesitan una buena habilidad manual, buena vista, y buena coordinación entre vista y manos. Deben ser capaces de concentrarse durante largos periodos de tiempo sobre un trabajo muy detallado y estar libres de

---

<sup>2</sup> WEEKS J. y WEEKS W. ,Técnica y practica de la soldadura, p 6

cualquier incapacidad física, que pudiera impedirles el trabajo en posiciones difíciles o incómodas.

Los soldadores deben ser calificados, puede ser por la empresa, o alguna institución certificada, para tener la certeza de pueden desempeñar este trabajo sin ningún tipo de problema y dando buenos resultados.

Otra de las capacidades para que los soldadores sean calificados deben ser la de planificar y desarrollar el trabajo a partir de planos o de especificaciones escritas. Además de tener un cierto nivel de conocimientos sobre materiales, tales como las propiedades, los efectos de calor sobre las estructuras, el control de las fuerzas de dilatación y contracción, interpretación de símbolos y defectos de las soldaduras. Estos soldadores expertos, también deben conocer los riesgos que se pueden presentar durante cualquier operación de corte o soldadura y seguir las normas de seguridad pertinentes.

Es importante que se tenga un conocimiento general de los tratamientos térmicos, ya que deberá controlar los procesos de calentamiento o enfriamiento durante la soldadura, para evitar que exista alguna modificación del material.

Es necesario mencionar que el soldador debe poseer una formación técnica considerable y que no es suficiente con tener habilidad para depositar un buen cordón.

Por estas razones, se contó con la colaboración de soldadores que laboran en FMSB, los cuales participan en la fabricación de estructuras metálicas, principalmente puentes, y tienen la suficiente experiencia y habilidad para realizar cordones de soldadura confiables.

Para este proyecto se necesitó 24 probetas, que fueron divididas en 4 grupos de 6, el primer y tercer grupo se soldaron en FMSB, el día 18 de marzo del 2009 y el 16 de mayo, y por los Sres. Pedro Ruiz y Segundo Carrera respectivamente; el segundo y cuarto grupo fueron soldados en los laboratorio de la ESPE porque se precisaba una soldadora con alimentación AC, el 23 de abril y el 16 de mayo, por los Sres. Pedro Ruiz y Santiago Topa, respectivamente.

## **4.3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE SOLDADURA**

La soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), es un proceso en el cual se unen dos metales mediante una fusión localizada producida por un arco eléctrico entre el electrodo metálico y el metal base que se desea unir. La parte metálica del electrodo conduce la corriente eléctrica hacia la arco y a la vez se utiliza con material de aporte para formar el cordón de soldadura, en tanto el revestimiento provee la atmósfera de protección para que el material fundido no se contamine con el aire de atmósfera.

El proceso de soldadura SMAW, es uno de los procesos más utilizados en la industria ecuatoriana, debido a su gran versatilidad y por sus costos.

### **4.3.1 PARÁMETROS DEL PROCESO SMAW**

Los parámetros de soldadura afectan directamente al proceso y se los debe seleccionar correctamente según varios factores, como material a soldar, electrodo, aplicación del elemento soldado y necesidad. Los parámetros más importantes este proceso son:

- Tipo de Corriente
- Intensidad de corriente
- Longitud de arco
- Angulo del electrodo
- Velocidad de avance

El electrodo seleccionado para realizar las probetas del proyecto es el E6011, a partir de este factor se establecerán los parámetros de soldadura para el proceso.

1) Tipo de corriente: Este tipo de electrodo puede ser soldado tanto con AC como DC, por lo que se seleccionan estos dos tipos de corriente, además se desea verificar si esto es un factor influyente en la aparición de esfuerzos residuales en la soldadura

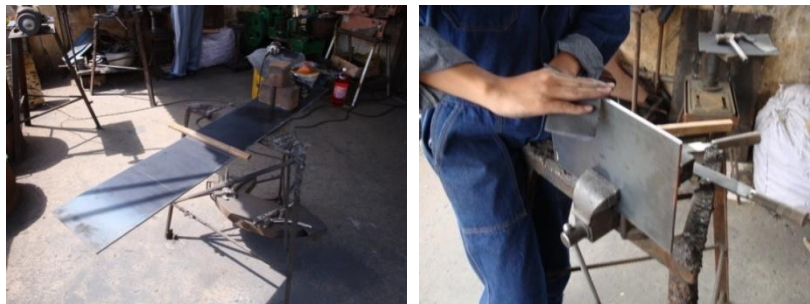
2) Intensidad de corriente: Se selecciona los amperajes de 90A, 100A y 110A, ya que se encuentran dentro del rango recomendado por el fabricante del electrodo.

3) Velocidad de avance: Los valores de velocidad de avance se establecen a partir de la relación de que un electrodo normalmente se consume en un minuto. A partir de esto se pueden establecer tres tipos de velocidades: Normal de 30 cm/min, Baja de 10-12 cm/min y Alta de 50 cm/min.

Se seleccionan dos tipos de velocidades para la elaboración de las probetas: normal y baja, y de esta manera poder establecer si este parámetro influye en la generación de esfuerzos residuales

Todos estos factores influyen en el aporte de calor, lo que se desea establecer como estos afectan al apareamiento de los esfuerzos residuales.

Una vez realizado el diseño de las juntas y establecidos los parámetros de soldadura, se procede con la preparación de las placas, se cortan los pedazos de la plancha por medio de la cortadora de plasma, se procede a la preparación de los bordes, limándolos.

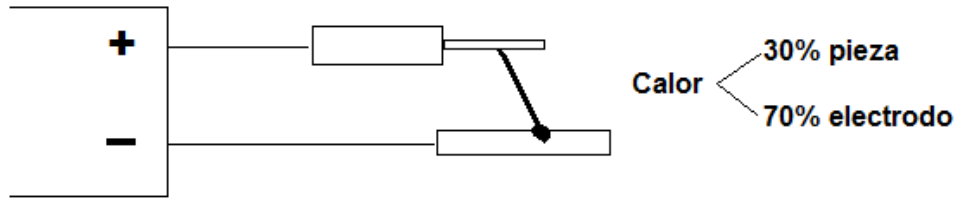


**Figura 4.3 Preparación de placas**

#### **4.3.1.1. Proceso de soldadura SMAW con corriente continua con electrodo positivo**

El electrodo usado para el proceso de soldadura es el E6011, el cual es un electrodo celulósico potásico, y la polaridad a emplear en este proceso es corriente continua electrodo positivo.

El calor aportado al realizar el proceso de soldadura se distribuye de la siguiente manera: 30% a la pieza y un 70% al electrodo.



**Figura 4.4 Proceso de soldadura SMAW con corriente continua con electrodo positivo**

Una vez preparadas las placas y seleccionados los parámetros del proceso, se realiza la soldadura de las mismas:

### Procedimiento

1) El soldador debe contar con todo el equipo de seguridad. (Guantes, casco, botas, mandil).



**Figura 4.5 Equipo de seguridad**

2) Preparar el equipo de soldadura: Seleccionar el tipo corriente y realizar las conexiones adecuadas de los cables.

3) Colocar las placas para soldadura en el lugar destinado para este proceso.



**Figura 4.6 Ubicación de las probetas**

4) Ubicar el electrodo en el porta electrodo.

5) Seleccionar el amperaje de soldadura y establecer la velocidad de avance.

6) Realizar el proceso de soldadura, tomando en cuenta que las placas son soldadas a tope, con una separación de 2mm y realizando un solo cordón de soldadura.



**Figura 4.7 Proceso de soldadura**

7) En la hoja de datos, registrar todos los datos obtenidos, colocar el código de la placa soldada, amperaje seleccionado y el tiempo de soldeo.

8) Una vez finalizado el proceso, se retira las placas, dejándolas enfriar, siempre con la precaución de no golpearlas.

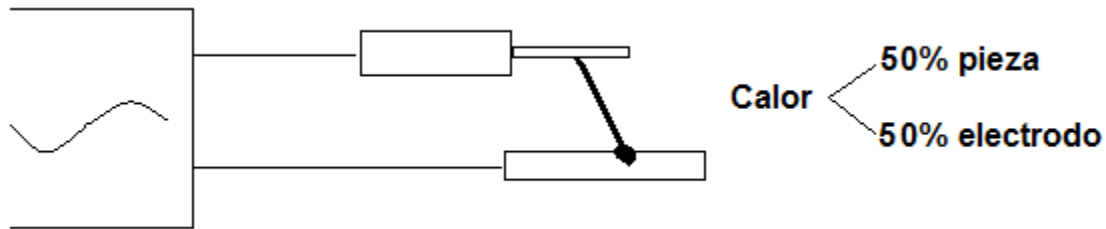


**Figura 4.8 Placas soldadas**

#### **4.3.1.2. Proceso de soldadura SMAW con corriente alterna**

El proceso de soldadura utilizando el electrodo E6011, se lo puede realizar en corriente alterna como directa. En el proceso de soldadura SMAW con corriente directa, el aporte de calor se distribuye de la siguiente manera: 50% a la pieza y un 50% al electrodo.





**Figura 4.9 Proceso de Soldadura SMAW con corriente alterna**

El procedimiento de soldadura SMAW en corriente alterna sigue los mismos pasos que el procedimiento anterior.

## **4.4 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES**

### **4.4.1 MEDICIÓN DE ESFUERZOS RESIDUALES**

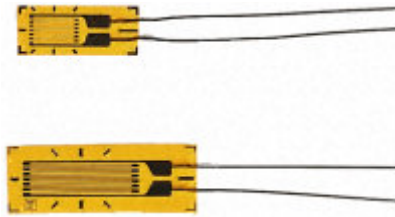
Para medir los esfuerzos residuales producidos por el proceso de soldadura, en este proyecto se aplicará la técnica de relajación de esfuerzos, usando el método del agujero perforado (hole drilling technique ).

Los esfuerzos residuales permanecen dentro del rango elástico y para poder medirlos deben ser aliviados de alguna forma. Por medio del método del agujero perforado, se provoca la relajación de los esfuerzos mediante el seccionamiento de las placas, el cual se lo realiza taladrando las mismas, produciéndose la liberación de las tensión internas que provoca una deformación, la cual puede ser medida a través de galgas extensiométricas (strain gages) fijadas a la superficie del metal.

#### **4.4.1.1 Principio de funcionamiento de las galgas extensiométricas.**

Las galgas extensiométricas son filamentos colocadas 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, haciendo posible medir las deformaciones de cualquier componente. (Figura 4.6).<sup>3</sup>



**Figura 4.10 Galga extensiométrica**

Las galgas extensiométricas son totalmente insensibles a todo lo ocurrido anteriormente en la pieza y solo pueden medir cambios producidos después de la instalación de los mismos. Si el material tenía una deformación al momento de colocarse la banda extensiométrica, ésta no podrá medir el estado inicial de deformación y solo medirá cualquier deformación posterior a partir de este estado inicial.

#### **4.4.1.2 Características del método del agujero perforado**

El método del agujero perforado es uno de las técnicas más modernas y es ampliamente utilizada para la medición de esfuerzos residuales, además es conocida como una técnica "semidestructiva", ya que en pocas ocasiones el pequeño agujero perjudicará la estructura de la pieza ensayada. El método es también muy versátil y puede ser desarrollado en el laboratorio o en el exterior, en una amplia gama de formas o tallas del objeto a ensayar

Esta técnica ha sido normalizado por el ASTM (Método de Ensayo Estándar) E837.1, y puede ser aplicado para materiales isotrópicos con un comportamiento lineal elástico pero sin embargo es aplicable en todos los casos en lo que los esfuerzos residuales no superen el límite elástico.

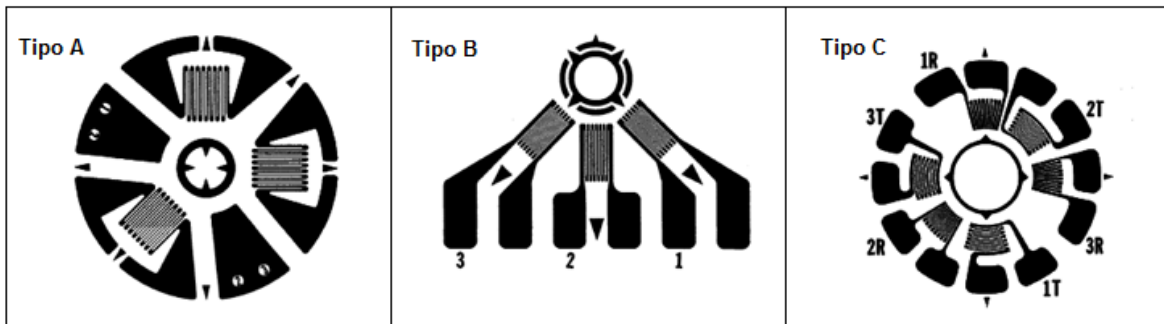
Para aplicar este método es necesario la utilización de galgas extensiométricas o rosetas de deformación; las cuales pueden ser colocadas en varias disposiciones

---

<sup>3</sup> AJILA, C.F. Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas. Tesis Ing. Mec. Guayaquil, Escuela Politécnica del Litoral. 2008. p 67

dependiendo del número de galgas que se vaya a utilizar, estas deben ser concéntricas y equidistantes al punto en donde se va a realizar la medición de los esfuerzos residuales, este centro debe estar definido claramente porque es un punto clave para que los valores medidos sean confiables.

Existen tres tipos de rosetas usadas para la medición de los esfuerzos residuales como se muestra a continuación:



**Figura 4.11 Tipos de rosetas para medición de los esfuerzos residuales**

Las rosetas tipo A son las más usadas en el medio y es recomendada para usos generales. Las galgas están colocadas en tres ejes principales para realizar una medición. Se tiene un eje de referencia en el que se encuentra ubicada la primera galga, la segunda es perpendicular a ésta y la tercera a 45° del eje de referencia.

La roseta tipo B tiene ubicadas las galgas en solo lado y son muy útiles para realizar mediciones cerca de un obstáculo.

La roseta tipo C tiene tres pares de galgas extensiométricas y sus mallas están colocadas de forma opuesta, y se las usa en casos especiales en los cuales se necesita alta sensibilidad y alta estabilidad térmica.

Los principales ejes de las rosetas pueden ser orientados según las necesidades y facilidades del proceso.

Se debe tener mucho cuidado en la preparación de la superficie de las probetas ya que puede inducir esfuerzos residuales superficiales. Para la preparación de las probetas es necesario que en el lugar donde se colocan las galgas o las rosetas se realice una minuciosa limpieza, el área debe estar libre de grasa. Se precisa

una superficie completamente lisa ya que las galgas extensiométricas tienen una alta sensibilidad, cualquier grieta o rayadura puede influir considerablemente en las mediciones de las deformaciones.

Se debe tomar en cuenta que la distancia de separación entre las galgas y el borde del agujero influye en los valores que se obtengan, mientras más cerca sea el valor de aliviación de los esfuerzos se aproxima al 100%, pero se debe tener la precaución que si se coloca demasiado cerca la posibilidad de tener valores inservibles es alta, entonces la selección de esta distancia es responsabilidad de los ejecutores de la técnica.

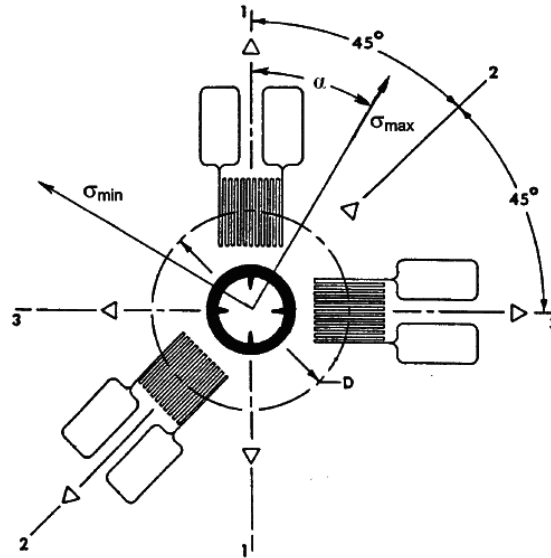
El proceso de taladrado debe realizarse a temperatura constante. Antes de comenzar el taladrado las galgas extensiométricas deben estar enceradas, el taladrado debe realizarse con velocidad constante y suavemente, dependiendo del espesor del material de prueba.

La norma expone que uno de los principales problemas para valores errados en esta técnica, es la falta de precisión en la colocación del taladro, el centro de la roseta de deformación debe ser exacto, se debe recordar también que el proceso de taladrado y las herramientas que se usen deben tratar de eliminar las deformaciones plásticas que se pueden dar en el área cercana al agujero, por el proceso de taladrado.

Se debe tener claro que la teoría en la cual se basa el proyecto considera que los esfuerzos residuales son biaxiales y macroscópicos.

#### **4.4.1.3 Especificaciones del método del agujero perforado**

Para aplicar este método la norma ASTM E837.1 especifica que la profundidad del agujero ( $h$ ) con respecto a diámetro entre los centros de las galgas ( $D$ ) debe ser menor a 0.4, además debe considerarse otros aspectos fundamentales como radio óptimo de la colocación de las galgas.



**Figura 4.12 Diagrama de ubicación de las galgas**

Cuando el espesor del material de prueba es como mínimo  $1.2D$  se lo considera como espesor grueso, para este espesor se tiene 8 lecturas de las deformaciones incrementando cada vez  $0.05D$ , y cuando se llega a la profundidad del agujero de  $0.4D$ . Otros incrementos en la profundidad similares al anterior son aceptables, pero hay que tener en cuenta que se debe interpolar valores de los coeficientes  $a$  y  $b$  para que los resultados sean confiables. Cuando se trabaja con especímenes gruesos, se debería realizar una prueba para comprobar que los esfuerzos residuales son uniformes en todo el espesor del material.

Los espesores menores a  $0.4D$  se los considera como espesor delgado, para este material se obtiene una lecturas de las 3 galgas, después de que el agujero pasante fue perforado.

En este proyecto se tomó datos de las deformaciones en función del tiempo, (cada 30 seg.) mientras se realiza el proceso de taladrado y de esta manera poder determinar el comportamiento de las deformaciones mientras se realiza este proceso.

Y los espesores entre  $0.4D$  y  $1.2D$  no forman parte de método de prueba estándar una aproximación de resultados se puede obtener realizando un agujero pasante e

interpolando los valores de los coeficientes. Estos resultados deberían ser mostrados como valores no estándar y como una aproximación.

Las fórmulas que usa en el presente proyecto son descritas en el punto 4.4.1.5, existen dos coeficientes indispensables para calcular los esfuerzos residuales que están en función de los radios del agujero, radio de ubicación de las galgas, coeficiente de Poisson y son los coeficientes A y B.

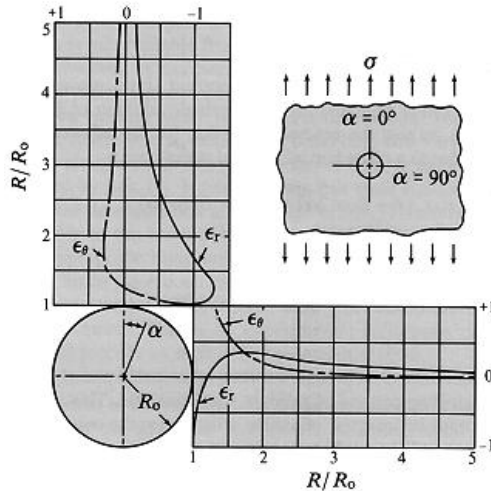
Estos pueden ser calculados por medio de fórmulas teóricas o por medio de valores tabulados que la norma ASTM E837 pone a consideración (a, b) los cuales fueron deducidos de una serie de pruebas realizadas por la asociación. Los valores tabulados están en función de la profundidad del agujero, tienen una mínima dependencia del material.

En el proyecto los valores presentados por la norma serán considerados como valores prácticos y los calculados mediante formula serán considerados teóricos

#### **4.4.1.4 Radio óptimo de colocación de las galgas extensiométricas**

Las deformaciones que aparecen debido a los esfuerzos residuales varían de forma compleja con respecto a la distancia a la superficie del agujero; estas variaciones se observan claramente figura 4.13, y están representadas en los ejes principales, en  $\alpha = 0$ , y  $\alpha = 90$ .

Las deformaciones decrecen con la distancia al agujero, debido a esto, es deseable medir las deformaciones cerca del borde del agujero para hacer que la señal de las galgas sea lo mayor posible pero por otra parte, los efectos parásitos también aumentan en las proximidades inmediatas del agujero. Estas consideraciones, junto con aspectos prácticos del diseño y aplicación de las galgas extensiométricas, exigen un compromiso para elegir el radio óptimo (R) para la colocación de la galga.



**Figura 4.13. Variación con la distancia (a lo largo de los ejes) desde el centro del agujero perforado, de las deformaciones radiales y tangenciales aliviadas. Tensión residual uniaxial**

Los estudios analíticos y experimentales han establecido un rango práctico de  $0.3 < r' < 0.45$  donde  $r' = R_o / R$  y  $R$  es la distancia al centro de la galga.

#### 4.4.1.5 Fórmulas para el cálculo de esfuerzos residuales

##### 4.4.1.5.1 Fórmulas para el cálculo de esfuerzos residuales biaxiales para agujero pasante

Las fórmulas presentadas a continuación son las usadas para el cálculo de los esfuerzos residuales del método del agujero perforado. En el anexo C se explica con mayor detalle la deducción de las mismas.

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad 4.1$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2)^2} \quad 4.2$$

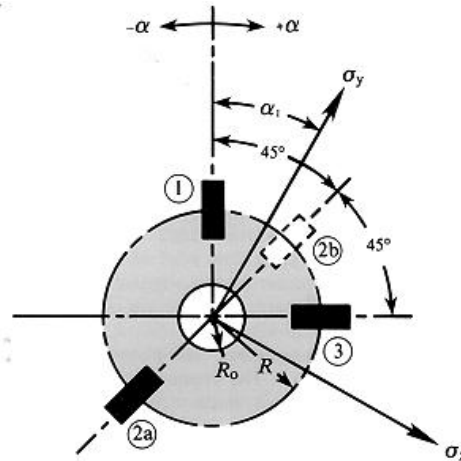
$$\tan(2\alpha) = \left( \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3} \right) \quad 4.3$$

Donde:

$\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$  : Son los esfuerzos principales

$\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  y  $\varepsilon_3$  : Son las deformaciones unitarias medidas

$\alpha$ : Es el ángulo que forma la galga 1 con el eje principal más cercano (en la dirección de la numeración de las galgas, sí es positivo; u opuesto, si es negativo).



**Figura 4.14: Disposición de la roseta de galgas extensiométricas para determinar la tensión residual.**

Los coeficientes A, B, y C son indispensables para el cálculo de los esfuerzos residuales y son partes de las ecuaciones principales.

$$A = -\frac{(1+\nu)}{2E} \left( \frac{1}{r^2} \right) \quad 4.4$$

$$B = \frac{-(1+\nu)}{2E} \left[ \left( \frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} - \left( \frac{3}{r^4} \right) \right] \quad 4.5$$

$$C = \frac{-(1+\nu)}{2E} \left[ - \left( \frac{4}{1+\nu} \right) \frac{1}{r^2} + \left( \frac{3}{r^4} \right) \right] \quad 4.6$$

La galga 2, se la puede colocar en la posición a o b, ya que se puede verificar que matemáticamente se obtendrá el mismo resultado, pero solo si se supone que las tensiones residuales son uniformes en el área que luego ocupará el agujero.

Para aplicaciones de propósito general, la posición que se prefiere es 2a, ya que proporciona un muestreo de la deformación alrededor del agujero y cuando el espacio para la galga es limitado, como uniones o estribos, la posición 2b permite posicionar el agujero lo más cercano posible al área de interés.

#### 4.4.1.5.2 Fórmula presentada por norma ASTM E837



La norma ASTM E837 también hace referencia a una ecuación para el cálculo de los esfuerzos residuales, la cual es:

$$\epsilon_r = (\bar{A} + \bar{B} \cos(2\beta)) \sigma_{max} + (\bar{A} - \bar{B} \cos(2\beta)) \sigma_{min} \quad 4.7$$

Donde:

$\epsilon_r$  : Aliviación del esfuerzo

$\beta$ : Dirección del esfuerzo máximo con respecto a la galga 2

$\bar{A}$   $\bar{B}$ : Constantes de calibración

$\sigma_{max}$ : Esfuerzo Máximo

$\sigma_{min}$ : Esfuerzo Mínimo

D: Diámetro entre centro de galgas

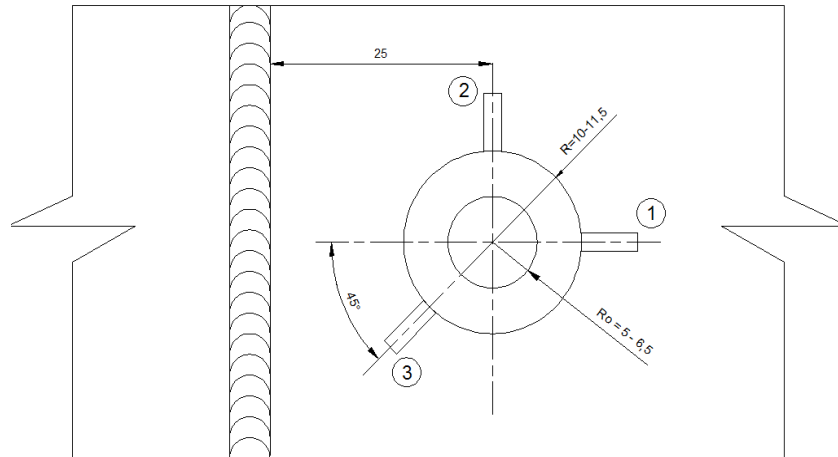
Do: Diámetro del agujero

La ecuación 4.7 es similar a la ecuación número 9 de la deducción de fórmulas (ver Anexo C), de las cuales parten las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3; debido a este por lo que se utilizarán estas ya que se encuentran simplificadas, por lo que realizar el cálculo de los esfuerzos residuales mediante estas es más sencillo.

#### **4.4.1.6 Aplicación del método del agujero perforado**

Para aplicar este método en este proyecto se utilizarán tres galgas extensiométricas OMEGA (SG-3/120-LY13) por cada probeta. El procedimiento para la medición de las deformaciones unitarias consiste en colocar las tres galgas extensiométricas en forma de roseta alrededor del lugar donde se va a perforar el agujero, se colocan radialmente con sus centros ubicados en el radio R desde el centro del agujero. Los ángulos entre galgas son 90° con respecto al eje de referencia y de 215° respectivamente.

Los puntos para realizar este proyecto se explican de manera detallada más adelante.



**Figura 4.15 Diagrama de ubicación de las galgas en las probetas**

La numeración de las probetas es distinta a la que presenta la norma, se realizó este cambio para el mejor manejo de los datos y facilidad al momento de utilizar el equipo de medición de deformaciones unitarias. Por este cambio los subíndices de las deformaciones unitarias de las formulas 4.1, 4.2 y 4.3 también deben ser cambiados para que tengan congruencia con nuestra numeración, estas ecuaciones se encuentran en la sección 4.4.3.3

#### **4.4.1.7 Medición de las deformaciones**

Como ya se mencionó en el capítulo 2 las deformaciones en el proceso de soldadura, son un resultado inevitable de las contracciones y expansiones del material, estos valores no deben exceder un límite para que no perjudique la función principal del elemento, las deformaciones que afectan principalmente son: la angular, longitudinal y transversal. Más adelante se explica el comportamiento de cada una de ellas y la forma de cálculo. En este proyecto se va a comparar los resultados de las fórmulas y las medidas de las probetas realizadas.

Cuando se forma perfiles para estructuras con soldadura, se debe tener un eje central de referencia para evitar las deformaciones excesivas por el proceso: generalmente este eje cruza el centro de gravedad del elemento.

Un factor importante que influye en la aparición de deformaciones es el aporte de calor que se obtiene por la soldadura. Este calor es calculado con la formula:

$$q_0 = \frac{0,8 U_w I_w}{V_w t} \quad 4.8$$

Donde:

$q_0$  : calor generado (J/cm<sup>2</sup>)

$U_w$ : Voltaje de soldadura (V)

$I_w$ : Corriente de soldadura (A)

$V_w$ : Velocidad de soldadura (cm/s)

$t$ : Espesor de la placa soldada (cm)

Es por esto que en los elementos que precisan de más de un cordón de soldadura son propensos a tener deformaciones transversales más grandes, que de los que solo necesitan un solo pase.

Las *deformaciones transversales*; son muy importantes porque el efecto individual de cada soldadura puede ser acumulativo. Existen gráficas que demuestran un comportamiento de las deformaciones en función del tipo de junta, pero estas no son muy usadas porque dan valores demasiado inexactos, es preferible calcular la posible deformación que puede tener la placa soldada, y esto se realiza con la siguiente ecuación:

$$\Delta_{trans} = 0.10 \left( \frac{A_{weld}}{t} \right) \quad 4.9$$

Donde:

$\Delta_{trans}$  : Deformación transversal

$A_{weld}$  : Área transversal de la soldadura (placas)

$t$ : espesor de la placa.

Las deformaciones angulares también influyen en el material a soldar, se produce por el des balanceo de la cantidad de material de aporte que se encuentra depositado a ambos lados del eje neutro de la pieza, cuanto más asimétrica sea la

preparación de junta con respecto al eje neutro de la sección, mayor será la distorsión angular<sup>4</sup>, y se calculan una aproximación con la formula:

$$\Delta = 0.02 \left( \frac{W \omega^{1.3}}{t^2} \right) \quad 4.10$$

Es más notorio el efecto de estas deformaciones, en la juntas en T, por el proceso de soldadura de estas, y por la función que estas cumplen. En la práctica no calculan esta deformación sino que se observan a simple vista las deformaciones que tienen mayor influencia en el conjunto. En este caso no se tomará en cuenta estas deformaciones porque no son notorias en las placas realizadas.

Las distorsiones longitudinales, se presentan en sentido del eje longitudinal de la unión soldada, generalmente esta distorsión es pequeña en las placas soldadas a tope, y no presenta grandes problema en su funcionamiento<sup>5</sup>; para su cálculo se usa la siguiente ecuación:

$$\Delta = 0.005 \left( \frac{A_w d L^2}{I} \right) \quad 4.11$$

Donde:

$A_w$ : Área del cordón de soldadura (pulg<sup>2</sup>)

d: distancia entre el centro de gravedad del conjunto de soldaduras y el eje neutro del elemento (pulg)

L: longitud del elemento, asumiendo soldadura en toda la longitud (pulg)

I: momento de inercia del elemento (pulg<sup>4</sup>)

#### **4.4.2. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DEL MÉTODO DEL AGUJERO PERFORADO**

##### **4.4.2.1 Descripción de las probetas utilizadas en el método del agujero perforado**

---

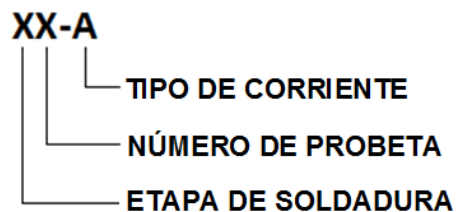
<sup>4</sup> TENSIONES RESIDUALES Y DISTORSION EN LA SOLDADURA, pág. 9.

<sup>5</sup> AJILA, C.F. Estudio y Control de Distorsión en Estructuras de Acero Soldadas. Tesis Ing. Mec. Guayaquil, Escuela Politécnica del Litoral. 2008. p 88

Para cumplir con el objetivo de este proyecto se decide realizar 24 probetas, las que se sueldan con diferentes parámetros del proceso de soldadura. Por lo que se utiliza una hoja de control en la que la primera parte se describe el material que se usa, las dimensiones de la placa antes de soldar, la posición de soldeo, que para todas las probetas es en el Plano Horizontal 1G, el tipo de junta que se usa, en este caso se soldará las juntas a tope cuadradas, con una separación del diámetro del electrodo que se usará.

En el anexo A se muestran los dos grupos de probetas, las cuales muestran los parámetros seleccionados para la soldadura: amperaje cuyos valores son de 90, 100 y 110 A, velocidades de soldeo que son baja y normal. Ambos parámetros se seleccionan tanto para corriente continua y alterna, dando un total de 12 probetas. Para poder realizar una comparación de resultados y verificar que los datos obtenidos son confiables se realizará dos probetas para cada variación dando un total de 24 probetas.

En el anexo A se muestra esta hoja de registro, en la que cada casilla está un código con el cual se identifican a las probetas y por medio del cual se las reconocerá en todo este proyecto, este código se detalla a continuación en la figura 4.16.



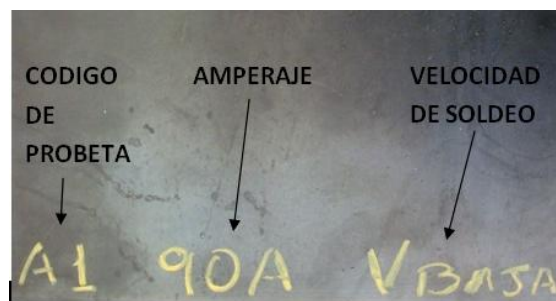
**Figura 4.16 Código utilizado para la identificación de las probetas.**

El primer término describe la etapa en que fue realizada la probeta que es A para la primera etapa y B para la segunda. El tercer término indica el tipo de corriente que se usó para la soldadura, si está la letra A significa que fue soldada con corriente alterna y si no está presente, significa que fue soldada con corriente continua. El segundo término indica el número de probeta, los números van del 1

al 6, e indican si fue soldada con velocidad baja o normal y que amperaje se utilizó, para tener un registro de todas las probetas.

A continuación se presenta la imagen de una probeta en la Figura. 4.17, con este código, es la probeta A1, indica que es soldada en la primera etapa de soldeo, con corriente DC, y por la tabla de parámetros de soldadura para esta probeta, indica que el amperaje utilizado es de 90 A y la velocidad de soldeo es baja.

En la probeta que se muestra tiene toda la información, ya que se precisa los datos de los parámetros de soldadura para las piezas en el momento de soldar. Este formato tienen todas las probetas para un mejor control.



**Figura. 4.17 Ejemplo de código en probeta**

Además se tiene una hoja de registro que es firmada por los responsables de esta actividad: encargado del laboratorio, y supervisor, para que quede constancia de la realización.

#### **4.4.2.2 Procedimiento de colocación de las galgas extensiométricas**

La colocación de las galgas es proceso que deber ser muy preciso y ordenado, el mal posicionamiento de estos elementos provoca errores en la medición de las deformaciones unitarias y por ende en el cálculo de los esfuerzos residuales. El correcto proceso de colocación se explica detalladamente en el Anexo D.

#### **4.4.2.3 Proceso de taladrado**

Para el proceso de taladrado es necesario cubrir las galgas, ya que cualquier contacto con la viruta de la placa afectará la medición, por lo que se las cubrirá con silicona.

Se debe tener mucho cuidado al centrar el punto en donde se va a taladrar con respecto a la broca ya que deben coincidir perfectamente y cualquier desviación puede ocasionar errores en las lecturas de las deformaciones unitarias. El procedimiento de taladrado se detalla en el Anexo D

#### **4.4.2.4 Toma de datos**

Para la toma de datos también se precisa una hoja de registro, que para este caso la llamaremos hoja de mediciones de deformaciones unitarias (ANEXO B).

Se toman medidas de las tres galgas de cada probeta, cada 30 segundos durante el proceso de taladrado, y después de este, máximo cada minuto hasta que las dimensiones de las galgas se estabilicen, se calcula la aliviación de esfuerzos residuales con las últimas medidas tomadas. Pero se registra todos los valores para conocer el comportamiento de las deformaciones unitarias durante este proceso.

### **4.4.3 APLICACIÓN DE MÉTODO Y CÁLCULOS**

#### **4.4.3.1 Determinación de la ubicación de las galgas**

Como se muestra en la figura 4.15, las medidas establecidas para este proyecto son: el diámetro del agujero de 10mm y la separación para la colocación de las galgas es de 5mm, para estas medidas se realizará la verificación de las especificaciones.

#### **Radio óptimo de colocación de galgas**

Para determinar el radio óptimo se debe relacionar el radio del agujero con respecto a radio del centro de las galgas y su rango debe estar entre  $0.3 < r' < 0.45$

$$r' = \frac{R_0}{R} \quad 4.12$$

$$r' = \frac{5}{12.5}$$

$$r' = 0.4$$

#### 4.4.3.2 Especificación para aplicar el método

Para cumplir con esta condición la relación entre altura de la profundidad del agujero con respecto al diámetro entre centro de galgas debe ser menor a 0.4

$$r1 = \frac{h}{D} \quad 4.13$$

$$r1 = \frac{5}{23}$$

$$r1 = 0.22$$

#### 4.4.3.3 Cálculo de los esfuerzos residuales

Una vez comprobado las especificaciones se procede a aplicar el método del agujero perforado y obtener las deformaciones que serán utilizadas para el cálculo de los esfuerzos residuales principales y su orientación angular.

En las fórmulas de los coeficientes A y B están presentes varias propiedades mecánicas del material, para nuestro caso se calcularán con las propiedades del Acero.

Para el siguiente ejemplo de cálculo se tomará las mediciones de la Placa B4.

#### Ejemplo de Cálculo

Placa: B4

**Cuadro 4.2 Parámetros de soldadura de la Placa B4**

Diámetro del electrodo (d)	1/8
Voltaje (V)	30
Amperaje (A)	90
Polaridad	DC
Velocidad	Baja

**Coefficiente de Poisson**  $\nu = 0.29$

**Modulo de Young**  $E = 200 \text{ GPa}$



## Relación de Radios

$$r = \frac{R}{R_0}$$
$$r = \frac{11.5}{5}$$
$$r = 2.3$$

## Coefficientes A y B

$$A = -\frac{(1 + \nu)}{2 \cdot E} \cdot \left(\frac{1}{r^2}\right)$$
$$A = -6.096 \times 10^{-13}$$
$$B = \frac{-(1 + \nu)}{2 \cdot E} \cdot \left[\left(\frac{4}{1 + \nu}\right) \frac{1}{r^2} - \left(\frac{3}{r^4}\right)\right]$$
$$B = -1.54 \times 10^{-12}$$

## Deformaciones unitarias

Deformación medida de la galga número 1

$$\epsilon_1 = -188 \times 10^{-6}$$

Deformación medida de la galga número 2

$$\epsilon_2 = 213 \times 10^{-6}$$

Deformación medida de la galga número 3

$$\epsilon_3 = 193 \times 10^{-6}$$

## Esfuerzos Residuales

$$\sigma_{max} = \frac{\epsilon_2 + \epsilon_1}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2\epsilon_3)^2} \quad 4.14$$
$$\sigma_{max} = 77.08 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = \frac{\epsilon_2 + \epsilon_1}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_1 + \epsilon_2 - 2\epsilon_3)^2} \quad 4.15$$
$$\sigma_{min} = -97.58 \text{ MPa}$$

Para calcular los coeficientes A y B según la norma ASTM E837, se debe seleccionar de la tabla 1 los valores de a y b, de la siguiente manera: se debe

obtener el valor de  $D_o/D$  ubicarlo en la columna de el coeficiente respectivo y interceptarlo con la fila del agujero pasante.

$$\frac{D_o}{D} = 0.4347$$

**Tabla 4.1 Valores de los coeficientes  $\bar{a}$  y  $\bar{b}$**

Rosette A	$\bar{a}$					$\bar{b}$				
Blind hole	Hole Diameter, $D_y/D$					Hole Diameter, $D_y/D$				
Depth/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0.00	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000	.000
0.05	.027	.037	.049	.063	.080	.051	.069	.090	.113	.140
0.10	.059	.081	.108	.138	.176	.118	.159	.206	.255	.317
0.15	.085	.115	.151	.192	.238	.180	.239	.305	.375	.453
0.20	.101	.137	.177	.223	.273	.227	.299	.377	.459	.545
0.25	.110	.147	.190	.238	.288	.259	.339	.425	.513	.603
0.30	.113	.151	.195	.243	.293	.279	.364	.454	.546	.638
0.35	.113	.151	.195	.242	.292	.292	.379	.472	.566	.657
0.40	.111	.149	.192	.239	.289	.297	.387	.482	.576	.668
Through Hole	.090	.122	.160	.203	.249	.288	.377	.470	.562	.651

Como el valor no es exacto se interpola para tener una buena aproximación, de la siguiente forma:

$$\frac{a - 0.160}{0.203 - 0.16} = \frac{0.4347 - 0.40}{0.45 - 0.40}$$

$$\frac{b - 0.47}{0.56 - 0.47} = \frac{0.4347 - 0.40}{0.45 - 0.40}$$

Y se obtiene los siguientes valores:

$$\bar{a} = 0.19$$

$$\bar{b} = 0.530$$

$$A = \frac{-\bar{a}(1 + \nu)}{2 \cdot E}$$

$$A = -6.12 \times 10^{-13}$$

$$B = \frac{-\bar{b}}{2 \cdot E}$$

$$B = 1.34 \times 10^{-12}$$

### Ángulo de la dirección del esfuerzo residual

$$\tan(2\alpha) = \left( \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right)$$

$$\alpha = \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}\right)}{2}$$

$$\alpha = -0.36 \text{ rad}$$

$$\alpha = -20.99^\circ$$

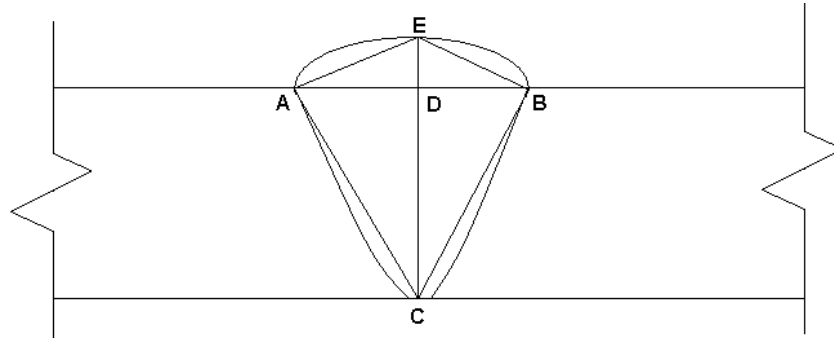
Los resultados de los esfuerzos residuales y los ángulos calculados de todas las probetas, se muestran en el capítulo 5, sección 5.2.

#### 4.4.3.4 Medición y cálculo de las deformaciones longitudinales y transversales

Para el cálculo de distorsiones longitudinales se necesita conocer el área del cordón de soldadura, por lo que es necesario utilizar algún tipo de ensayo que nos permita visualizar el cordón, ya que no se tiene valores exactos ni cordones uniformes en las probetas.

Se aplica un ensayo no destructivo el cual consiste en colocar un ácido que permita observar claramente los extremos del cordón, para conocer la forma exacta de estos y así poder tomar sus medidas para tener valores de deformaciones aproximados a la realidad, el procedimiento de este ensayo se explica en el Anexo D.

Debido a la geometría del cordón, el área se aproxima a un triángulo isósceles y se realiza el análisis con el esquema siguiente:



**Figura 4.18 Esquema del área del cordón de soldadura**

Con ayuda del programa Autocad se obtiene el área y el centro de gravedad de cada cordón.

### EJEMPLO DE CÁLCULOS

**Placa: B2**

**Cuadro 4.3 Parámetros de Soldadura de la Placa B2**

Diámetro del electrodo (d)	1/8
Voltaje (V)	33
Amperaje (A)	100
Polaridad	DC
Velocidad	Normal

#### Cálculo de la deformación transversal (cm) (x aportación de calor)

- **Velocidad de soldeo ( $V_w$ )**

**Longitud de la placa (cm)  $L_p = 30$**

**Tiempo de soldeo (s)  $t_w = 74$**

$$V_w = \frac{L_p}{t_w}$$

$$V_w = \frac{30}{74}$$

$$V_w = 0,4054 \text{ (cm/s)}$$

- **Calor aportado (Q)**

**Espesor de la placa (cm )**  $t = 0,5$

**Voltaje de soldadura (V)**  $U_w = 33$

**Corriente de soldadura(A)**  $I_w = 100$

$$Q = \frac{0,8 \cdot U_w \cdot I_w}{V_w \cdot t}$$

$$Q = \frac{0,8 \cdot (33)(100)}{0,4054(0,5)}$$

$$Q = 13024,00 \left( \frac{J}{cm^2} \right)$$

- **Deformación transversal (cm) (x aportación de calor)**

**Coefficiente de expansión térmica del acero (1/°C)**  $\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$

**Calor específico del acero (J/gr °C)**  $c = 0,46$

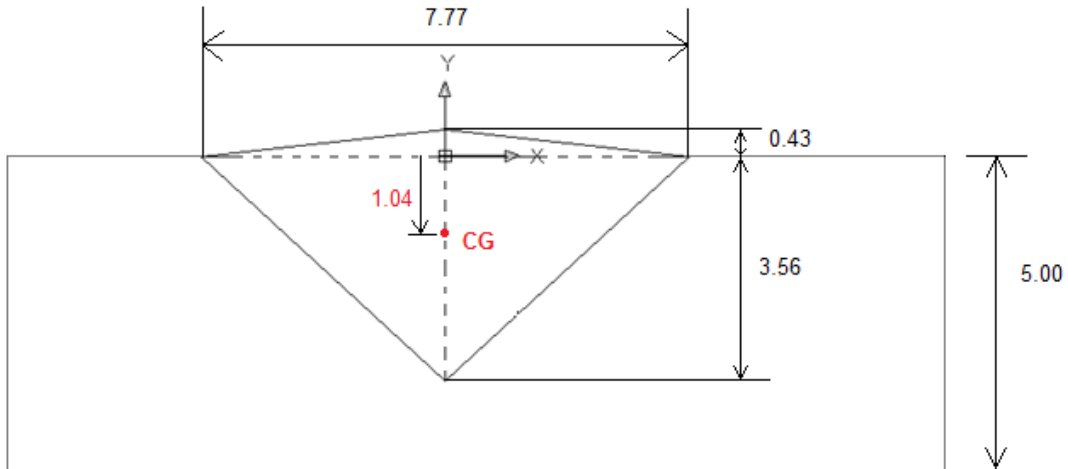
**Densidad del acero (gr/cm<sup>3</sup>)**  $\rho = 7,85$

$$\Delta_{trans} = \frac{\alpha}{c \cdot \rho} q_o$$

$$\Delta_{trans} = \frac{11,7 \times 10^{-6}}{0,46(7,85)} 13024,00$$

$$\Delta_{trans} = 0,0423 \text{ (cm)}$$

**Cálculo de la deformación transversal (cm) (x geometría)**



**Figura 4.19 Cordón de soldadura Probeta B2**

```

Command: massprop
Select objects: 1 found
Select objects:
----- REGIONS -----
Area:                15.5012
Perimeter:           18.3563
Bounding box:        X: -3.8850 -- 3.8850
                    Y: -3.5600 -- 0.4300
Centroid:            X: 0.0000
                    Y: -1.0433
Moments of inertia:  X: 29.2654
                    Y: 38.9937
Product of inertia:  XY: 0.0000
Radii of gyration:   X: 1.3740
                    Y: 1.5860
Principal moments and X-Y directions about centroid:
                    I: 12.3917 along [1.0000 0.0000]
                    J: 38.9937 along [0.0000 1.0000]

```

**Figura 4.20 Propiedades Geométricas de la Probeta B2**

- **Área de soldadura**

$$A_w = 15,5012 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$A_w = 0,024 \text{ (plg}^2\text{)}$$

- **Longitud del cordón**

$$L_c = 3,56 + 0,43$$

$$L_c = 3,99 \text{ (mm)}$$

$$L_c = \frac{3,99}{25,4}$$

$$L_c = 0,1570 \text{ (plg)}$$

- **Deformación transversal (cm) (x geometría)**

$$\Delta_{trans} = \frac{0,1 A_w}{L_c}$$

$$\Delta_{trans} = \frac{0,1 (0,024)}{0,1570}$$

$$\Delta_{trans} = 0,153 \text{ (plg)}$$

$$\Delta_{trans} = (0,153) 2,54$$

$$\Delta_{trans} = (0,0389) \text{ (cm)}$$

### **Cálculo de la deformación longitudinal**

- **Distancia entre el centro de gravedad del conjunto de soldaduras y el eje neutral del elemento (plg)**

**Centro de gravedad de la placa (cm)  $CG_p = 0,25$**

**Centro de gravedad del cordón de soldadura (mm)  $CG_c = 1,04$**

**Centro de gravedad del cordón de soldadura con respecto a la placa**

$$CG_{cp} = 5 - 1,04$$

$$CG_{cp} = 3,9567 \text{ (mm)}$$

$$CG_{cp} = 0,39567 \text{ (cm)}$$

$$d = CG_{cp} - CG_p$$

$$d = 0,39567 - 0,25$$

$$d = 0,14567 \text{ (cm)}$$

$$d = 0,0573 \text{ (plg)}$$

- **Longitud del elemento, asumiendo soldadura en toda la longitud (plg)**

$$Lp = 30 \text{ (cm)}$$

$$Lp = \frac{30}{2,54}$$

$$Lp = 11,81 \text{ (plg)}$$

- **Momento de inercia del elemento (plg<sup>4</sup>)**

**Ancho de la placa (cm)  $b = 40$**

$$Ip = \frac{b \cdot t^3}{12}$$

$$Ip = \frac{40 \cdot (0,5^3)}{12}$$

$$Ip = 0,4166 \text{ cm}^4$$

$$I = \frac{0,4166}{2,54^4}$$

$$I = 0,01001 \text{ plg}^4$$

- **Deformación longitudinal**

$$\Delta_{lon} = 0,005 \left( \frac{A_w d Lp^2}{Ip} \right)$$

$$\Delta_{lon} = 0,005 \left( \frac{((0,024)(0,0573)11,81^2)}{0,01001} \right)$$

$$\Delta_{lon} = 0,096 \text{ (plg)}$$

$$\Delta_{lon} = 0,096(2,54)$$

$$\Delta_{lon} = 0,24 \text{ (cm)}$$



Los resultados de las deformaciones transversales y longitudinales calculadas de todas las probetas, se muestran en el capítulo 5, sección 5.2.3.1.

#### **4.4.3.5 Cálculo de la zona plástica y temperaturas en función de las distancias**

El cálculo de la zona plástica la cual es parte de la zona de afectación térmica es muy útil para analizar la distribución de esfuerzos residuales de compresión y tracción en las placas, ya que este permite conocer cuál fue el área afectada por el calor de la soldadura.

Con el cálculo de las temperaturas a distancias definidas desde el centro de la placa, se desea saber con certeza como varían estas, al momento de realizar el proceso de soldadura, (con una fuente de calor definida).

#### **Ejemplo de cálculo**

##### **Placa B2**

#### **Cálculo de la zona plástica**

##### **- Potencia Efectiva**

**Coeficiente de eficiencia del arco**  $n = 0.8$

$$Q_{ef} = n(Uw)(Iw)$$

$$Q_{ef} = 0.8(33)(100)$$

$$Q_{ef} = 2640 \left( \frac{J}{s} \right)$$

##### **- Energía específica de soldadura**

**Velocidad de soldadura (cm/s)**  $V_w = 0,4054$

**Espesor de la placa (cm)**  $t = 0,5$

**Espesor de cálculo**  $\delta_0 = (2*t)$

$$q_0 = \frac{Q_{ef}}{V_w(\delta_0)}$$

$$q_0 = \frac{2640}{0,4054(1)}$$

$$q_0 = 6512 \left( \frac{J}{cm^2} \right)$$

- **Capacidad calorífica volumétrica**

**Calor específico del acero (J/gr °C)**  $c = 0,46$

**Densidad del acero (gr/cm<sup>3</sup>)**  $\rho = 7,85$

- **Capacidad calorífica volumétrica**

$$C\rho = 4,5 \left( \frac{J}{cm^3} \right)$$

- **Ancho de zona plástica**

**Temperatura de recristalización (°C)**  $*T = 723$

$$b_1 = \frac{0,484(q_0)}{C\rho(*T)}$$

$$b_1 = \frac{0,484(6512)}{4,5(723)}$$

$$b_1 = 0,97 \text{ (cm)}$$

**Cálculo de temperatura a una cierta distancia con una fuente de calor constante**

- **Coordenadas para el cálculo de temperatura**

**Tiempo en el que se calcula la temperatura (s)**  $t' = 3$

$$\xi = x - V_w \cdot t'$$

$$\xi = 0 - 0,004054 \cdot (3)$$

$$\xi = -0,01216216$$

$$y = 0,25$$

$$z = 0$$

$$R = \sqrt{\xi^2 + y^2 + z^2}$$

$$R = \sqrt{-0,01216^2 + 0,25^2 + 0,0^2}$$

$$R = 0,02780141$$

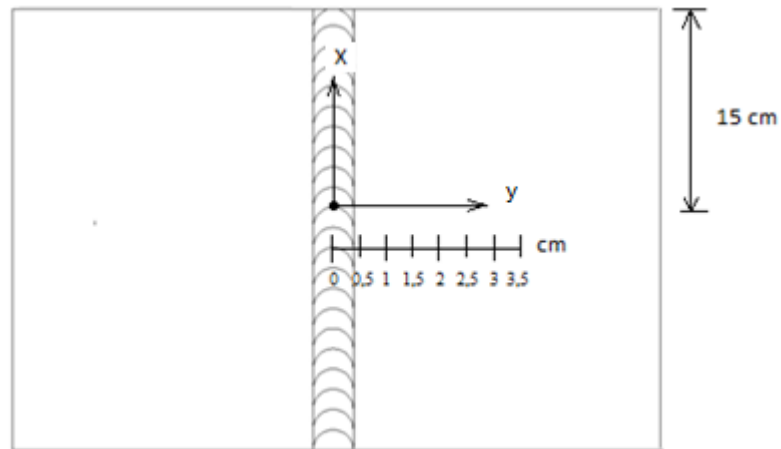


Figura. 4.21 Ubicación del eje de coordenadas y Distancias  $\xi$

- Velocidad de soldadura (m/s)  $V_w = 0,004054$
- Espesor de la placa (m)  $t = 0,005$
- Conductividad térmica (W/m<sup>°K</sup>)  $\lambda = 41$
- Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)  $\alpha = 9,1 \times 10^{-6}$

$$T = \left[ \frac{Q_{ef}}{2\pi\lambda t} \cdot e^{\left[\frac{-V_w(\xi)}{2\alpha}\right]} \cdot K_0 \left[ \frac{V_w(R)}{2\alpha} \right] \right] + 294$$

$$T = \left[ \frac{2640}{2\pi(41)(0,005)} \cdot e^{\left[ \frac{-0,0041(-0,01216216)}{2(9,1 \times 10^{-6})} \right]} \cdot (3,80) \left[ \frac{0,0041(0,027801)}{2(9,1 \times 10^{-6})} \right] \right] + 294$$

Donde:

$$A = \frac{Q_{ef}}{2\pi\lambda t}$$

$$A = \frac{2640}{2\pi(41)(0,005)}$$

$$A = 2049,61$$

$$B = e^{\left[ \frac{-V_w(\xi)}{2\alpha} \right]}$$

$$B = e^{\left[ \frac{-0,0041(-0,01216216)}{2(9,1 \times 10^{-6})} \right]}$$

$$B = 15,01$$

$$C = K_o \left[ \frac{V_w(R)}{2\alpha} \right]$$

$$C = K_o \left[ \frac{0,0040(0,02780141)}{2(9,1 \times 10^{-6})} \right]$$

$$C = 0,0010$$

$$T = [A \cdot B \cdot C] + 294$$

$$T = 325,10 \text{ } ^\circ\text{K}$$

Los resultados de la zona plástica y las temperaturas calculadas de todas las probetas, se muestran en el capítulo 5, en las secciones 5.2.4.1 y 5.2.4.2.

## 4.5 DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DEL EQUIPO

### 4.5.1 SOLDADORA LINCOLN ELECTRIC INVERTIC V350 – PRO

Este tipo de soldadora es muy versátil, ya que se puede realizar distintos procesos de soldadura como: proceso de corriente constante CC, electrodo revestido / Stick, TIG DC, y proceso de voltaje constante CV, como MIG, MIG Pulsado, y Alambre Tubular FCAW.

#### 4.5.1.1 Especificaciones técnicas

**Cuadro 4.4. Especificaciones Técnicas del equipo V350 Pro**

Nombre del Producto	Voltaje Standard	Voltaje de Entrada	Potencia de entrada	Peso	Dimensiones H x W x D
V350 PRO	200-220V 380-400V 415-440V	48A 28A 26A	20KVA	38 Kg.	400x320x700

#### 4.5.1.2 Operación de la soldadura v350 Pro

1. Seleccionar el proceso de soldadura que para nuestro caso será CC.
2. Conectar los cables a la máquina, el cable del porta electrodo en el terminal positivo y el cable conductor de corriente (la masa) en el terminal de negativo.
3. Conectar la masa en el sitio donde se va a soldar.
4. Seleccionar el amperaje deseado y colocar el electrodo en el porta electrodo.
5. Realizar la soldadura de las probetas.



**Figura 4.22 Soldadora Lincoln Electric Invertic V350-Pro**

#### **4.5.2 SOLDADORA MILLER SYNCROWAVE 250**

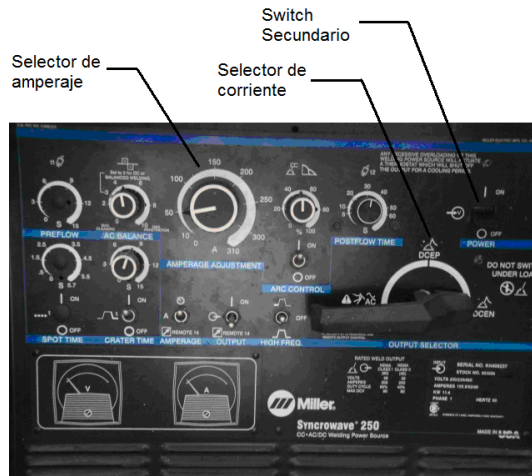
##### **4.5.2.1 Especificaciones técnicas**

**Cuadro 4.5 Especificaciones Técnicas de la Soldadora Miller Syncrowave 250**

<b>Modelo</b>	<b>Potencia de Entrada</b>	<b>Rango de amperaje</b>	<b>VCA máx.</b>	<b>Salida Nominal</b>	<b>Peso</b>
Syncrowave 250	60 Hz,	3 –310 A	80 V	250 A a 30 V	120 Kg.

##### **4.5.2.2 Operación del equipo**

1. Verificar que el equipo se encuentre conectado y que el cable del porta electrodo y el cable conductor de corriente (la masa) se encuentren conectados correctamente.
2. Encender el equipo por medio del switch secundario.
3. Seleccionar el tipo de corriente que se utilizará en el proceso de soldadura, que para nuestro caso es corriente alterna (AC).
4. Seleccionar el amperaje con el cual se realizará el proceso de soldadura.



**Figura. 4.23 Panel de control de la soldadora Miller Syncrowave 250**

5. Colocar el electrodo en el porta electrodo y realizar la soldadura
6. Una vez finalizado el proceso de soldadura se debe apagar el equipo y ordenar el sitio utilizado para el proceso



**Figura. 4.24 Soldadora Miller Syncrowave 250**

### 4.5.3 SOLDADORA BOC TRANSARC AC 330

#### 4.5.3.1 Especificaciones técnicas

**Cuadro 4.6 Especificaciones Técnicas de la Soldadora BOC Transar AC 330**

Marca	Modelo	Serie	Capacidad	Fluido de trabajo	Peso	Potencia / Voltaje
Transarc AC 330	330A	1198036	330A	8 a 10 Horas	80 KG	220V

### 4.5.3.2 OPERACIÓN DEL EQUIPO

1. Verificar que el equipo se encuentre conectado.
2. Verificar que el cable del porta electrodo y el cable conductor de corriente (la masa) se encuentren conectados correctamente.
3. Encender el equipo por medio de la perilla ubicada en la parte superior izquierda.
4. Seleccionar el amperaje con el cual se realizará el proceso de soldadura por medio de la manivela ubicada en la parte superior del equipo.
5. Colocar el electrodo en el porta electrodo y realizar la soldadura.
6. Una vez finalizado el proceso de soldadura se debe apagar el equipo y ordenar el sitio utilizado para el proceso.



Figura 4.25 Soldadora BOC Transarc AC 330

### 4.5.4 TALADRO

#### 4.5.4.1 Especificaciones técnicas



**Cuadro 4.7 Especificaciones Técnicas del Taladro**

<b>Modelo</b>	ZJ4116
<b>Frecuencia</b>	60 Hz
<b>Voltaje</b>	110V
<b>Motor</b>	550 W
<b>RPM</b>	200
<b>Año de Fabricación</b>	2000

#### **4.5.4.2 Operación del equipo**

1. Colocar la broca a utilizar en el taladro y ajustarlo correctamente.
2. Conectar el equipo.
3. Colocar las probetas sobre el pedestal.
4. Centrar la probeta con respecto a la broca.
5. Encender el equipo, pulsando el botón verde que se encuentra en la parte superior izquierda del mismo.
6. Una vez finalizado el taladrado se debe apagar el equipo y ordenar el sitio utilizado para el proceso.



**Figura 4.26 Taladro de pedestal**

## 4.5.5 EQUIPO DE MEDICIÓN DE DEFORMACIONES UNITARIAS DMD- 22

### 4.5.5.1 Especificaciones técnicas

**Cuadro 4.8 Especificaciones Técnicas del Equipo de medición de deformaciones unitarias**

<b>Canales</b>	10
<b>Rango</b>	+ - 19999 microesfuerzo
<b>Resistencia de las galgas</b>	¼ puente: 120 o 350 ohms ½ puente: menos de 80 ohms Puente completo: menos de 120mohms
<b>Rango del factor de la galga</b>	De 1.00 a 2.99 con un paso de 0.01
<b>Voltaje de puente</b>	2 VDC, 5 VDC o 10 VDC
<b>Tipos de puente</b>	¼, ½ o puente completo
<b>Impedancia de entrada</b>	1000 Megohm
<b>Conexión para las galgas</b>	Bornes de tornillo ubicados en la parte trasera del equipo y proporcionan conexiones de ¼, ½ o puente completo
<b>Salida análoga</b>	+ - 2 VDC, equivalente a + - 20000 microesfuerzo
<b>Frecuencia de respuesta</b>	DC a 20 k Hz
<b>Peso</b>	15.4 libras
<b>Dimensiones</b>	150mm de alto, 420 mm de ancho y 350 mm de profundidad

### 14.5.5.2 Operación del equipo

1. Conectar los alambres de las galgas a los borners de tornillos ubicados en la parte posterior del equipo, conservando el orden establecido para la ubicación de las galgas.
2. Verificar que la medición de deformaciones se realice con los siguientes parámetros.  
Tipo de puente:  $\frac{1}{2}$  puente  
Voltaje del puente: 2 voltios  
Factor de la galga: 2.04
3. Conectar el equipo.
4. Encerar las lecturas de las galgas mediante las perillas ubicadas en la parte inferior.
5. Realizar las lecturas de las deformaciones cambiando la perilla selectora de canales.
6. Apagar el equipo.



Figura 4.27 Equipo de medición de deformaciones unitarias