

ANALISIS DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES POR EL METODO DEL AGUJERO Y LA ROSETA

Por Carlos H. Enriquez G.
Ing, Mecánico, profesor de la
Universidad Nacional sede Medellín,
Depto. de Tecnología Mecánica,
sección Diseño de Maquinaria

1 INTRODUCCION

Es un hecho bien conocido que las piezas troqueladas, trefiladas o laminadas en frío y forjadas a muy baja temperatura, están endurecidas y llenas de esfuerzos residuales. Estas piezas presentan una baja resistencia al choque y deben ser generalmente reconocidas antes de ser utilizadas.

Los esfuerzos residuales se originan también en las piezas fundidas y soldadas durante el proceso del enfriamiento, alcanzando valores, en ocasiones de tal magnitud que ponen en peligro la resistencia de la pieza, si se tiene en cuenta que a éstos, se sumarán los esfuerzos debidos a cargas externas de trabajo. Esto es sobre todo, crítico en estados de esfuerzos variables. Este tipo de esfuerzos se presentan también en el doblado de perfiles laminados o de láminas destinados a la construcción de calderas o recipientes a presión.

Existen varios métodos y técnicas experimentales para determinar los esfuerzos residuales (1).

En el presente artículo vamos a enfocar nuestra atención al estudio del principio de funcionamiento y las técnicas utilizadas en el método denominado del AGUJERO Y LA ROSETA. Este es uno de los métodos más utilizados por su simplicidad y bajo costo (2).

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL METODO EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS RESIDUALES POR MEDIO DEL AGUJERO Y LA ROSETA

Consideremos la placa de la figura 1 sometida a un campo uniforme de esfuerzos σ_1 y σ_2 , donde σ_1 y σ_2 son esfuerzos principales.

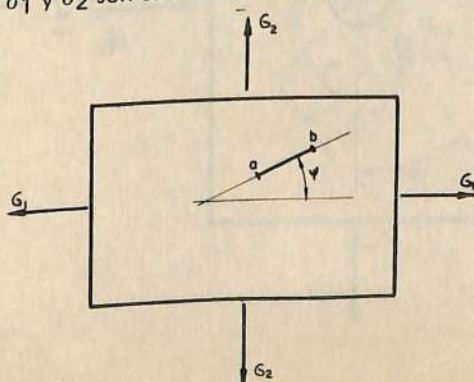


FIGURA 1

PLACA SOMETIDA A UN CAMPO UNIFORME DE ESFUERZOS σ_1 Y σ_2

En estas condiciones el elemento longitudinal ab se deformará una determinada cantidad que es función del campo de esfuerzos aplicado.

Si ahora efectuamos una perforación sobre la placa muy cercana al elemento considerado, Figura 2; el equilibrio inicial se rompe y el material de la pieza se deforma de tal manera que el equilibrio del sistema sea restablecido. Esto se manifiesta en una nueva formación del elemento ab que puede ser detectada por medio de una galga extensométrica, aplicada en el punto P. Ver figuras 2 y 3.

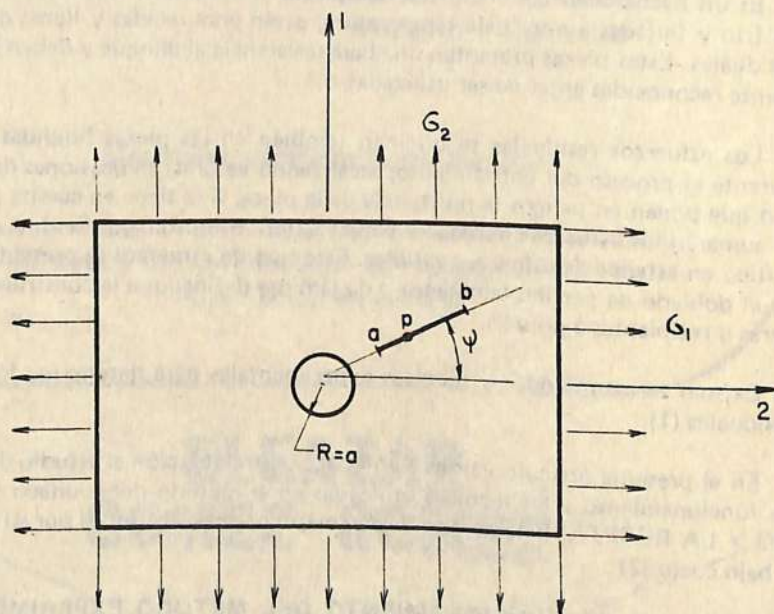
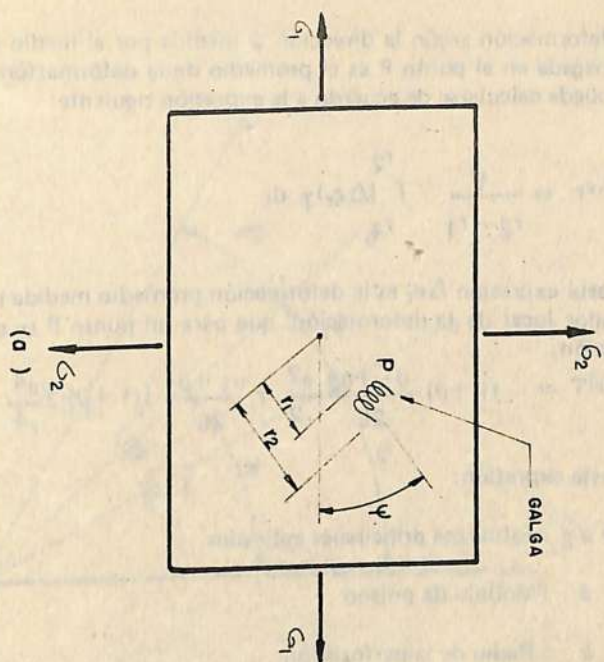


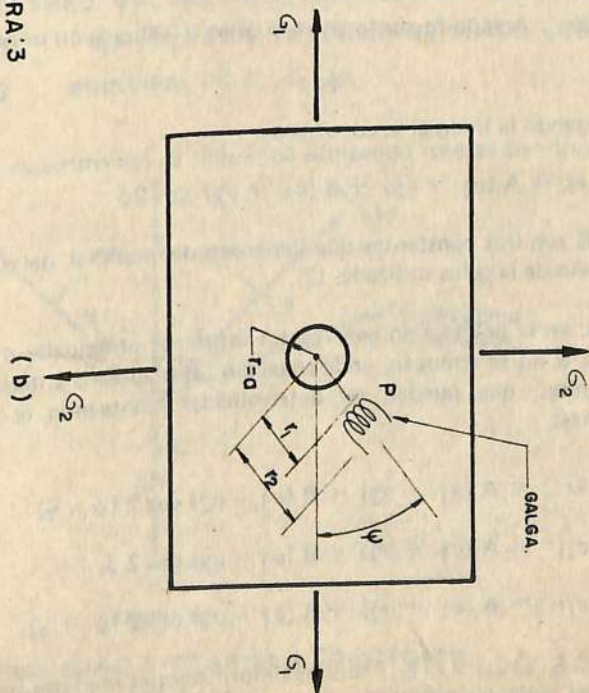
FIGURA:2

PLACA SOMETIDA A UN CAMPO UNIFORME DE ESFUERZOS SOBRE LA CUAL SE HA EFECTUADO UNA PERFORACION DE RADIO a



MEDICION DE LA DEFORMACION
ANTES DE LA PERFORACION

FIGURA:3



MEDICION DE LA DEFORMACION
DESPUES DE LA PERFORACION

La deformación según la dirección ψ medida por el medio de la galga unidireccional pegada en el punto P es el promedio de la deformación entre los puntos r_1 y r_2 y puede calcularse de acuerdo a la expresión siguiente:

$$\Delta \epsilon_r = \frac{1}{r_2 - r_1} \int_{r_1}^{r_2} (\Delta \epsilon_r)_T dr \quad (1)$$

En esta expresión $\Delta \epsilon_r$ es la deformación promedio medida por la galga y $(\Delta \epsilon_r)_T$ es el valor local de la deformación, que para un punto P se calcula por medio de la ecuación:

$$(\Delta \epsilon_r)_T = - (1 + \nu) \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E} \frac{a^2}{r^2} + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2E} \left[(1 + \nu) 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right] \cos 2\psi \quad (2)$$

En esta expresión:

σ_1 y σ_2 : Esfuerzos principales aplicados

ν : Módulo de poisson

a : Radio de la perforación

r : Distancia del centro de la perforación al punto P

ψ : Angulo formado entre la galga y la dirección principal máxima

Realizando la integral se encuentra:

$$\Delta \epsilon_r = A (\sigma_1 + \sigma_2) + B (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\psi \quad (3)$$

A y B son dos constantes que dependen del material, del diámetro del agujero y del tamaño de la galga utilizada. (2).

Como en la práctica en general, los esfuerzos principales σ_1 y σ_2 y la dirección principal ψ no se conocen, en la ecuación (3) planteada anteriormente se presentan 3 incógnitas, que pueden ser determinadas planteando el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_I &= A (\sigma_1 + \sigma_2) + B (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\psi - \gamma) \\ \Delta \epsilon_{II} &= A (\sigma_1 + \sigma_2) + B (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\psi \\ \Delta \epsilon_{III} &= A (\sigma_1 + \sigma_2) + B (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2(\psi + \gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

donde: $\Delta \epsilon_I$, $\Delta \epsilon_{II}$ y $\Delta \epsilon_{III}$ son las deformaciones medidas por las galgas I, II y III orientadas según las direcciones h , α y β . Figura 4.

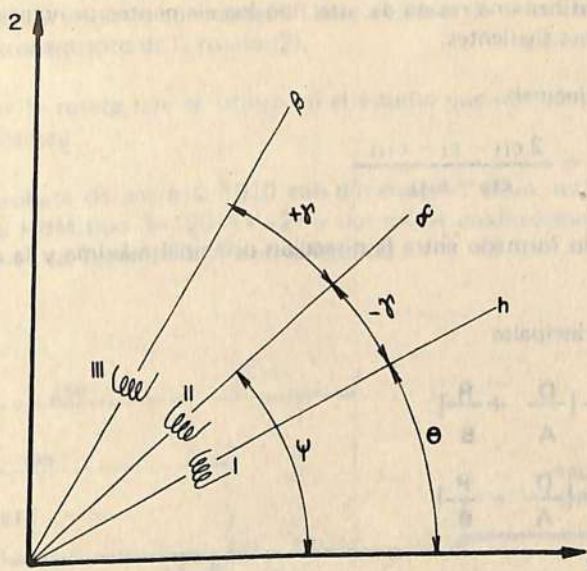


FIGURA:4

SISTEMA DE TRES GALGAS I, II, III, ORIENTADAS SEGUN LAS DIRECCIONES h, α, β , PARA DETERMINACION DE LOS ELEMENTOS PRINCIPALES σ_1, σ_2, ψ .

El procedimiento experimental se simplifica utilizando rosetas con tres galgas a 45° . Figura 5.

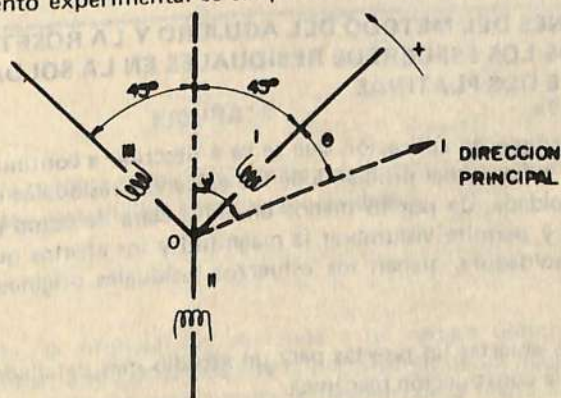


FIGURA:5

ROSETA CON TRES GALGAS A 45° ENTRE SI UTILIZADA EN ANALISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES
LAS TRES GALGAS ESTAN A IGUAL DISTANCIA DEL CENTRO O

Cuando se utiliza una roseta de este tipo los elementos principales están dados por las ecuaciones siguientes:

a) Dirección principal:

$$\tan 2\theta = \frac{2\epsilon_{II} - \epsilon_I - \epsilon_{III}}{\epsilon_{II} - \epsilon_{III}} \quad (5)$$

θ = ángulo formado entre la dirección principal máxima y la dirección de la galga I.

b) Esfuerzos principales

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{1}{2} \left| \frac{D}{A} + \frac{R}{B} \right| \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2} \left| \frac{D}{A} - \frac{R}{B} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

$$D = \frac{\epsilon_I + \epsilon_{III}}{2} \quad \text{abscisa del centro del círculo de Mohr}$$

$$R = \frac{\sqrt{2}}{2} \left| (\epsilon_{II} - \epsilon_I)^2 + (\epsilon_{II} - \epsilon_{III})^2 \right|^{1/2} \quad (7)$$

R = Radio del círculo de Mohr.

3. APLICACIONES DEL METODO DEL AGUJERO Y LA ROSETA AL ANALISIS DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN LA SOLDADURA A TOPE ENTRE DOS PLATINAS

Aunque el ejemplo de aplicación que se va a describir a continuación no constituye un estudio a fondo del problema de los esfuerzos residuales que se presentan en una unión soldada, da por lo menos una idea clara de como proceder en este tipo de análisis y permite vislumbrar la magnitud y los efectos que sobre la resistencia de una soldadura, tienen los esfuerzos residuales originados durante este proceso.

Además, deja abiertas las puertas para un estudio más detallado de este importante campo de la construcción mecánica.

3.1. PATRONAMIENTO DE LA ROSETA

El análisis de los esfuerzos residuales por el método del agujero y la roseta requiere conocer el valor de las constantes A y B. Ecuaciones (4).

La determinación de estas constantes en base a valores de deformación medidos, se denomina patronamiento de la roseta (2).

Para patronar la roseta que se utilizó en el estudio que nos ocupa se procedió de la siguiente manera:

Sobre una probeta de acero C 1010 con dimensiones según normas ASTM, se pegó una roseta HBM tipo 3-120 RY-21 y dos galgas unidireccionales KYOWA, tipo KP-6-AI-11 tal como se ilustra en la figura 6.

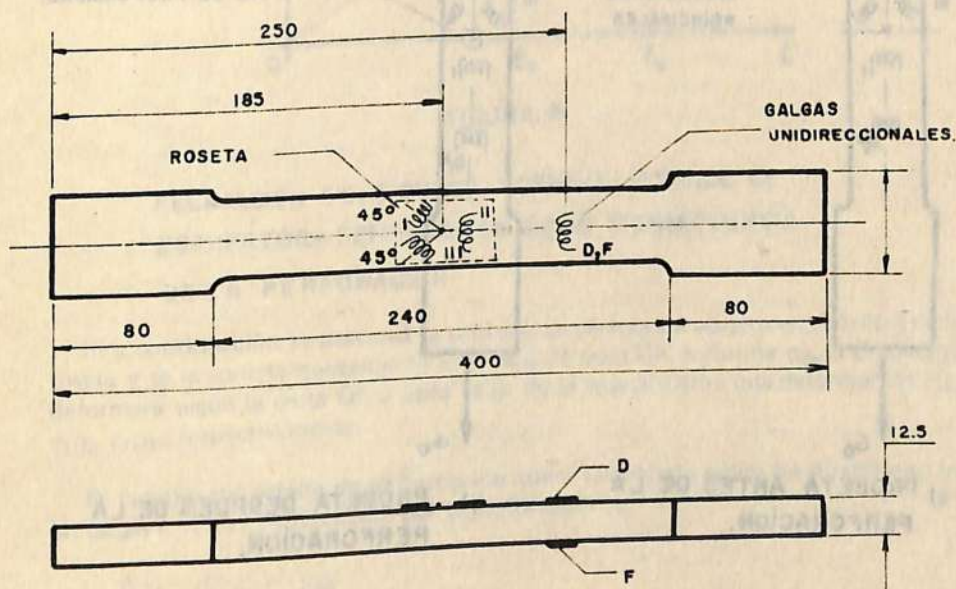
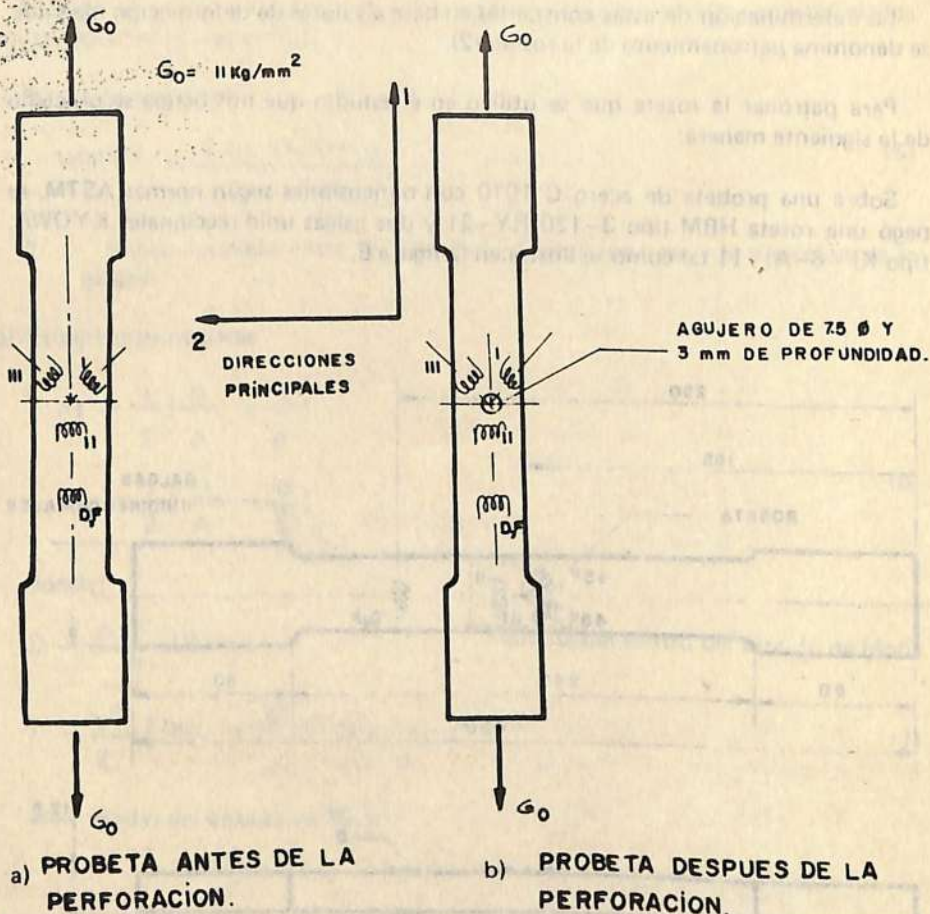


FIGURA: 6

MEDIDAS EN mms.

Dimensiones de la probeta y ubicación de las galgas utilizadas para el ensayo de calibración de la roseta para análisis de esfuerzos residuales.

Posteriormente, la probeta fue sometida a un campo uniforme de tracción $\sigma_0 = 11 \text{ Kg/mm}^2$, antes y después de la perforación de un agujero de 7,5 mm. de diámetro y en la dirección que muestra el diagrama de la figura 7.



Procedimiento de calibración de la roseta. La probeta es sometida antes y después de realizarse una perforación en el centro de la roseta, a la acción de una carga de tracción uniforme σ_0 .

La figura 8 ilustra la deformación indicada sobre la probeta cuando se aplica la carga de tracción antes de efectuar la perforación y la relajación ocasionada al perforar el agujero en el centro de la roseta.

Al someter la probeta a la acción del campo de esfuerzos uniformes de tracción σ_0 , ésta se deforma según la recta Oa y cada galga de la roseta experimenta una deformación ϵ_{Ia} , ϵ_{IIa} y ϵ_{IIIa} .

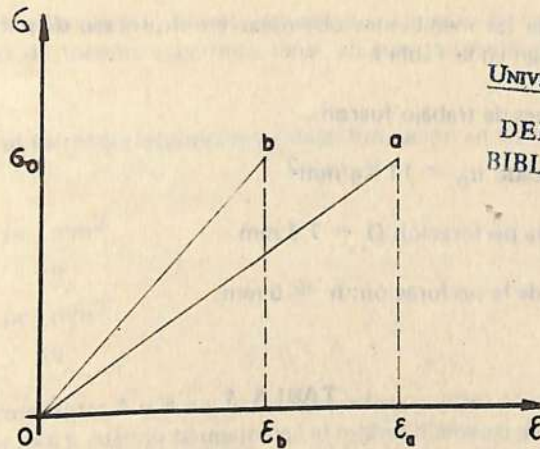


FIGURA: 8

RELAJACION OCASIONADA SOBRE EL ESTADO DE ESFUERZOS- DEFORMACION COMO CONSECUENCIA DE LA PERFORACION

Si a continuación se descarga la probeta, se perfora un agujero en el centro de la roseta y se la somete nuevamente al campo de tracción uniforme σ_0 , la probeta se deformará según la recta Ob y cada galga de la roseta sufrirá una deformación ϵ_{ib} , ϵ_{iib} , ϵ_{iiib} , respectivamente.

El cambio del estado de deformación sobre la probeta según las direcciones de las galgas I, II y III, ocasionado por la perforación es:

$$\Delta \epsilon_I = \epsilon_{ib} - \epsilon_{ia}$$

$$\Delta \epsilon_{II} = \epsilon_{iib} - \epsilon_{iia}$$

$$\Delta \epsilon_{III} = \epsilon_{iiib} - \epsilon_{iiia}$$

(8)

Considerando las ecuaciones (4) y teniendo en cuenta que en este caso particular $\gamma = 45^\circ$, $\psi = 0$, $\sigma_1 = 0$ y $\sigma_2 = 0$. Figura 7, se tiene:

$$\Delta \epsilon_I = \Delta \epsilon_{III} = A \sigma_0$$

$$\Delta \epsilon_{II} = (A + B) \sigma_0$$

(10)

De estas relaciones se puede despejar el valor de A y B.

El método descrito puede utilizarse en cualquier caso de patronamiento de rosetas destinadas a la medición de esfuerzos residuales (5).

Los valores de las mediciones obtenidas en el proceso de patronamiento de la roseta se consignan en la Tabla I.

Las condiciones de trabajo fueron:

Esfuerzo aplicado $\sigma_0 = 11 \text{ Kg/mm}^2$

Diámetro de la perforación $O = 7.5 \text{ mm}$.

Profundidad de la perforación: $h = 5 \text{ mm}$.

TABLA 1

Valores de deformación dados por las galgas de la roseta, antes y después de la perforación.

Deformación	Antes de la perforación ($\mu\epsilon$)	Después de la perforación ($\mu\epsilon$)	$\Delta\epsilon^*$ $\mu\epsilon$
ϵ_I	190	68	-122
ϵ_{II}	498	197	-301
ϵ_{III}	170	65	-105
ϵ_D	516	524	8
ϵ_F	96	25	-71

* $1 \mu\epsilon$ (microdeformación) = 10^{-6} mm/mm

De la tabla 1, se tiene:

$$\Delta\epsilon_I = -122 \mu\epsilon$$

$$\Delta\epsilon_{II} = -311 \mu\epsilon$$

$$\Delta\epsilon_{III} = -105 \mu\epsilon$$

El promedio entre las galgas I y III da:

$$\frac{\Delta\epsilon_I + \Delta\epsilon_{III}}{2} = -109 \mu\epsilon$$

Al tomar el promedio de los valores obtenidos por medio de las galgas I y III se elimina el efecto de torsión y permite tener en cuenta solamente el efecto de tracción.

Reemplazando los valres correspondientes de deformación en las ecuaciones (10) se encuentra:

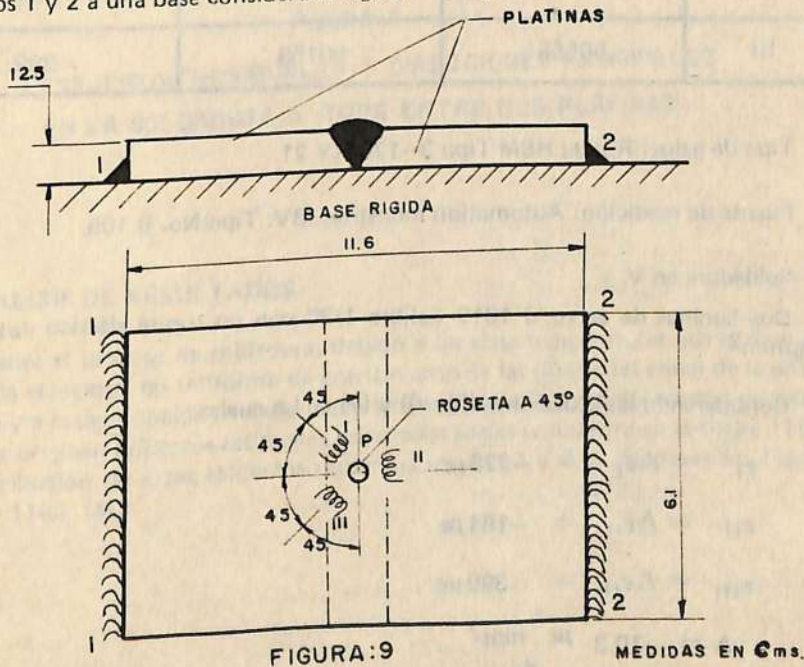
$$A = -10.3 \frac{\mu\epsilon \cdot \text{mm}^2}{\text{kg}}$$

$$B = -17.1 \frac{\mu\epsilon \cdot \text{mm}^2}{\text{kg}}$$

El valor de las constantes A y B no varía si se perfora la placa completamente en todo su espesor, siempre y cuando se mantenga el mismo diámetro de perforación.

3.2. DETERMINACION DE LOS ESFUERZOS RESIDUALES EN LA SOLDADURA A TOPE ENTRE DOS PLATINAS

El objetivo que se plantea en esta experiencia es determinar, utilizando el método del agujero y la roseta, la magnitud y dirección de los esfuerzos residuales en el centro del cordón de soldadura entre dos placas, fijas inicialmente por sus extremos 1 y 2 a una base considerada rígida. Ver figura 9.



ANÁLISIS DE ESFUERZOS RESIDUALES EN UNA SOLDADURA A TOPE ENTRE DOS PLATINAS.

Una vez efectuada la soldadura entre las dos placas, se pegó una roseta compuesta de tres galgas a 45° en la zona media del cordón (punto P), tal como se ilustra en la figura 9.

Posteriormente se determinó la deformación sufrida por cada galga de la roseta inducida en las direcciones I, II y III, al efectuar una perforación en el punto P, de diámetro $O = 7.5 \text{ mm}$. y profundidad $h = 5 \text{ mm}$.

Los resultados de este procedimiento y las características técnicas de la roseta y equipo utilizado se dan en la Tabla 2.

TABLA 2

Valores de deformación obtenidos sobre el cordón de soldadura después de efectuar la perforación

Galga	Lectura antes de la perforación	Lectura después de la perforación	Deformación inducida $\Delta\epsilon \mu\epsilon$
I	50698	50470	- 228
II	41167	50983	- 184
III	50558	50159	- 399

Tipo de galga: Roseta HBM Tipo 3-120 RY 21

Puente de medición: Automation industries. BV. Tipo No. B 105.

Soldadura en V.

Dos láminas de acero C 1010 Calibre $1/2''$ con un límite elástico $\sigma_{e1} = 32 \text{ Kg/mm}^2$.

Considerando las ecuaciones (5), (6) y (7) en las cuales:

$$\epsilon_I = \Delta\epsilon_I = -228 \mu\epsilon$$

$$\epsilon_{II} = \Delta\epsilon_{II} = -184 \mu\epsilon$$

$$\epsilon_{III} = \Delta\epsilon_{III} = -399 \mu\epsilon$$

$$A = -10.3 \frac{\mu\epsilon \cdot \text{mm}^2}{\text{Kg}}$$

$$B = -17.1 \frac{\mu\epsilon \cdot \text{mm}^2}{\text{Kg}}$$

Se obtiene los siguientes valores de los esfuerzos residuales principales y su correspondiente dirección.

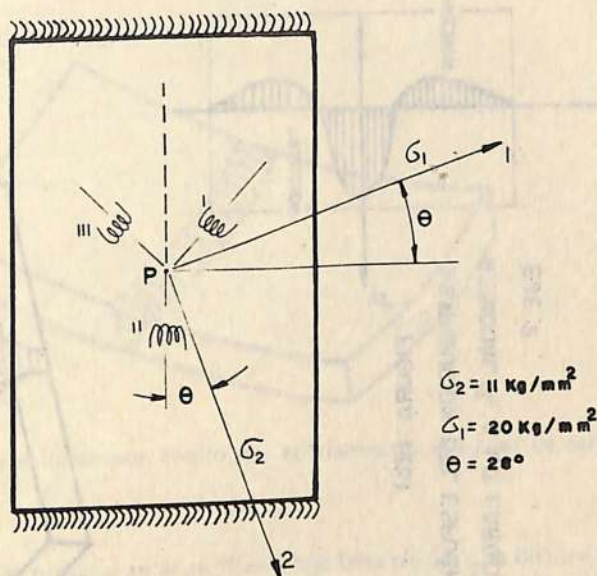


FIGURA 10

ESFUERZOS RESIDUALES Y DIRECCIONES PRINCIPALES
EN LA SOLDADURA A TOPE ENTRE DOS PLATINAS.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Durante el proceso de soldadura, debido a las altas temperaturas que se desarrollan, a la velocidad no uniforme de enfriamiento de las diferentes zonas de la unión soldada y a la distribución irregular de la temperatura a lo largo del cordón de soldadura, se originan esfuerzos residuales orientados según se muestra en la figura 11(a). La distribución de estos esfuerzos respecto a los ejes 1 y 2 se ilustra en las figuras 11(b) y 11(c) (4).

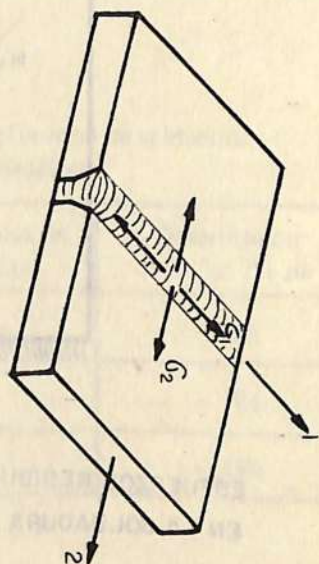


FIGURA: II(a)
ORIENTACION DE LOS ESFUERZOS
RESIDUALES EN LA SOLDADURA
A TOPE

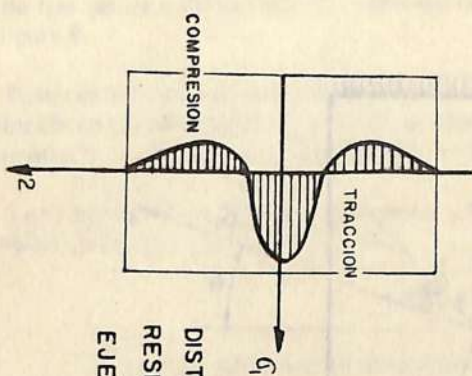


FIGURA: II(b)
DISTRIBUCION DEL ESFUERZO
RESIDUAL σ_1 A LO LARGO DEL
EJE 2

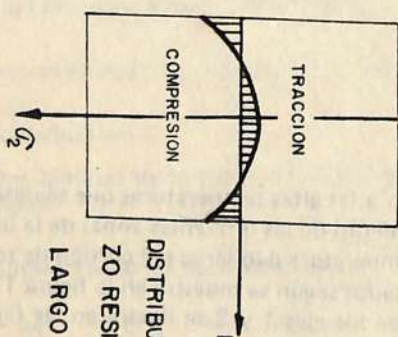
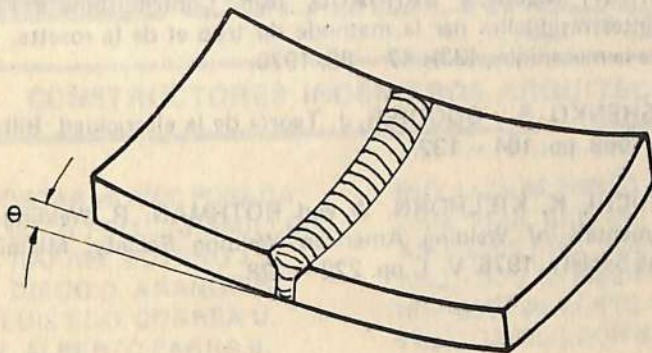


FIGURA: II(c)
DISTRIBUCION DEL ESFUER-
ZO RESIDUAL σ_2 A LO
LARGO DEL EJE 1

Un fenómeno adicional de distorsión (flexión) aparece sobre las platinas soldadas. Figura 12.



Distorsión de la junta soldada por efecto del enfriamiento irregular después del trabajo de soldadura.

Si los extremos de las placas a solar se fijan a una base rígida, esta distorsión no puede realizarse libremente, lo que induce esfuerzos residuales adicionales.

De los resultados obtenidos en el caso que nos ocupa y de acuerdo a la figura 10, se observa que los esfuerzos residuales σ_1 y σ_2 están orientados en direcciones diferentes a los ejes de simetría de las placas. Sin embargo, deberían coincidir.

Esta discordancia tiene como causas, la distribución no uniforme de los esfuerzos a lo largo del cordón de soldadura, lo que hace que existan valores diferentes de deformación y esfuerzo para cada punto del material en la zona soldada y el hecho que las galgas de la roseta miden el promedio de la deformación en zonas diferentes entre sí y del punto real en el cual se desea encontrar la magnitud de la deformación.

Por otra parte la roseta fue calibrada y debe ser utilizada en un campo uniforme de esfuerzos, lo cual no sucede en este caso.

Esto constituye ciertamente una limitación del método del agujero y la roseta para determinar los esfuerzos residuales.

Se puede lograr reducir la limitación planteada utilizando rosetas pequeñas.

Otro aspecto importante a destacar es la magnitud de los esfuerzos residuales encontrados.

En nuestro caso el límite elástico del material de base es de 32 Kg/mm^2 y el esfuerzo residual máximo fue de 20 Kg/mm^2 ; o sea un 63% de dicho valor.

BIBLIOGRAFIA

- (1) Les memories techniques du Cetim: Analyse des contraintes residuelles. No. 24, 31—, irreg. París, Cetim.
- (2) RUMELHART, Caude y BAHUAUD, Jean. Contributions à l'analyse des contraintes résiduelles par la methode du truo et de la rosette. Revue française de la mecanique, (33): 47 — 68, 1970.
- (3) THIMOSHENKO, S y GOODIER, J. Teoría de la elasticidad. Bilbao, España, Urmo, 1968. pp. 104 — 132.
- (4) MASUBUCHI, K, KIELHORN, W and ROTHMAN, R. Welding Handbook; Fundamentals of Welding American Welding Society. Miami, American Welding Society, 1976. V. 1, pp. 222 — 278.

pérez y duque ltda.

i n g e n i e r o s c i v i l e s

I.C. Ramiro Pérez González

I.C. Gilberto Duque Pérez

teléfonos: 41 86 95 y 41 43 70

apartado aéreo 4707 - medellín