

METODO COMPUTACIONAL SIMPLIFICADO PARA EL CALCULO DE
TENSIONES RESIDUALES EN SOLDADURA

Guillermo A. Lombera
Juan C. Belmonte
Miguel A. Benavente

I.N.T.E.M.A.(Instituto Nacional de Tecnología de Materiales)
Juan B. Justo 4302 - Mar del Plata - Argentina

Luis A. de Vedia
Fundación Latinoamericana de Soldadura
Calle 18 Nro 4113 - Villa Lynch - Argentina

RESUMEN

El presente trabajo tiene por objeto analizar la utilización de un método simplificado para la determinación de tensiones residuales de origen térmico en soldadura.

El método propuesto inicialmente por L. Tall, consiste en un modelo de discretización temporal y composiciones de tensiones longitudinales térmicas y de equilibrio sobre la sección transversal considerada, de manera de reproducir en forma natural la generación de tensiones residuales.

El método presenta la ventaja de una utilización limitada de recursos computacionales y de no requerir el conocimiento de la magnitud de las deformaciones plásticas.

Para el desarrollo del método simplificado se utilizan programas de elementos finitos, tanto para obtener la distribución de temperaturas, como para hallar las tensiones térmicas.

ABSTRACT

The objective of this work is to analyze the use of a simplified method that enable the determination of heat induced residual stresses in weldments.

This method is based on a numerical model, which considers the thermal stresses in different time increments. In this way, the resulting residual stress can be obtained.

The model has the advantage of a limited use of computational time. In addition, it does not require the knowledge of the plastic strains.

In this method, finite elements programs are used to obtain both temperature distributions and thermal stresses.

1- INTRODUCCION

La soldadura es uno de los métodos más utilizados para unir metales. Existen diversos procesos de soldadura, pero, en general, en todos ellos hay una fusión localizada que produce complejos ciclos termicos. La correcta determinación del mapa de temperaturas producido en una chapa soldada ha sido motivo de estudio de numerosos investigadores [1].

Este complejo mapa térmico produce cambios en la microestructura, distorsiones, y primordialmente, lo que es objeto de nuestro estudio, tensiones térmicas.

Como consecuencia del gran calor aportado localizado necesario para soldar, el material experimentará una distribución no homogénea de temperaturas, y existirán zonas cercanas al cordón de soldadura en las que el aumento de temperatura es tal, que producirá la plastificación del material. En este caso, el enfriamiento del material no relajará completamente las tensiones producidas, sino que quedará con tensiones remanentes, llamadas tensiones residuales.

El objetivo del presente trabajo es determinar los valores de tensiones residuales de origen térmico. Los mismos se asumen como valores límites de tensiones térmicas para un tiempo infinito. Es posible entonces, encontrar los valores de tensiones residuales como una suma discreta de incrementos de tensiones térmicas.

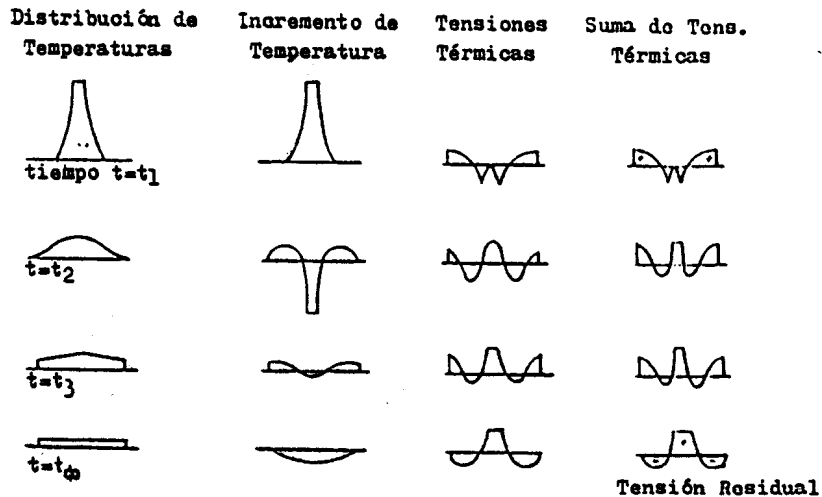


fig. 1
Tensiones Térmicas y Residuales

El modelo utilizado, propuesto inicialmente por L. Tall [2] consiste en hallar las tensiones residuales como una suma de tensiones térmicas incrementales de las siguiente forma:

Se calcula la distribución de temperaturas en una sección transversal cuando la fuente de calor se encuentra en dicha sección. Esta será nuestra sección de estudio y en la cual hallaremos las tensiones residuales. Se calculan los valores de tensiones térmicas y se recortan a fluencia en caso de haber sobrepasado dicho valor.

Posteriormente se calcula la diferencia de temperaturas que experimenta la sección en cuestión cuando la fuente ha avanzado un determinado tiempo. A esta diferencia de temperaturas le corresponde una diferencia de tensiones térmicas que recortadas a fluencia según el mismo criterio anterior producirá un valor de tensión térmica resultante en la sección igual a la suma de los valores incrementales hallados.

El procedimiento se repite para distintos tiempos, cuyo criterio de elección se explicará más adelante, obteniéndose en la suma total el valor de tensión residual correspondiente a la sección de estudio. (ver fig. 1)

Analicemos un elemento de superficie (S1), como indica la fig. 2, que experimente un calentamiento homogéneo, circundado por otro elemento de superficie (S2), que se encuentra a una temperatura constante; tendremos un modelo simplificado de lo que realmente ocurre en una chapa soldada válido para entender el procedimiento realizado en este trabajo con el fin de obtener los valores de tensiones residuales.

Mientras la sección S1 va experimentando un calentamiento, se van generando tensiones térmicas, producto de la restricción de contorno que produce su borde a una temperatura distinta. El continuo calentamiento irá produciendo un aumento de la tensión térmica según: [7],[8]

$$\Delta \sigma = \alpha \cdot \Delta T \cdot E$$

siendo:

- E - Módulo de Young
- α - Coeficiente de dilatación
- ΔT - Variación de temperatura
- $\Delta \sigma$ - Variación de tensión

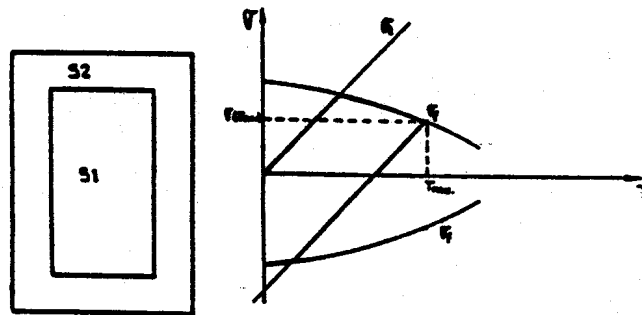


Fig. 2: Análisis de tensiones simplificado del modelo

El comportamiento lineal creciente será interrumpido cuando el valor de tensión obtenido iguale al valor de tensión de fluencia correspondiente a esa temperatura (que no necesariamente será la temperatura máxima que alcance S1

El aumento de la temperatura hasta su valor máximo irá produciendo disminución en los valores de tensiones, ya que la tensión de fluencia disminuye con el aumento de la temperatura (fig 3). Una vez alcanzada la temperatura máxima, ésta comienza a disminuir produciendo una descarga que posee un comportamiento elástico. Analizar lo anterior por partes, es decir en distintos estadios temporales, producirá un resultado final distinto de cero debido al comportamiento no lineal que se produce cuando llegamos a fluencia, resultado que no tendríamos si no hubiésemos superado dicho valor. En este último caso el valor de las tensiones residuales sería, por supuesto, nulo.(*)

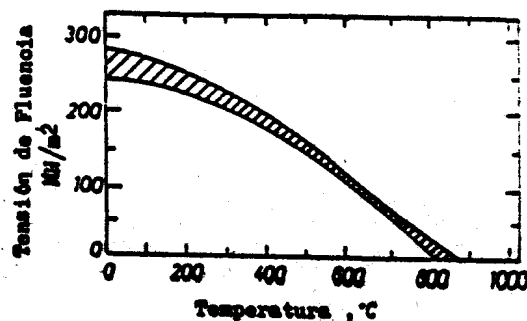


Fig. 3: Tensión de fluencia en función de la temperatura

La elección de los tiempos en los cuales debemos encontrar las diferencias de temperatura para posteriormente hallar las tensiones térmicas requieren de un análisis previo. Si observamos el comportamiento que experimenta el material durante el calentamiento, vemos que responde a una ley lineal hasta el primer punto donde debemos recortar por fluencia. Por encima de esta temperatura y hasta llegar a temperatura máxima la tensión disminuye. El enfriamiento responde a un comportamiento lineal cuya única posibilidad de experimentar algún recorte por fluencia será cuando supere el valor de tensión de fluencia de signo contrario.(fig.2).

Por lo dicho anteriormente, es preciso calcular adecuadamente el valor de tensión a temperatura máxima. Esto dará como resultado final valores de tensiones residuales correctos.

Para calcular la distribución de temperaturas se utilizó un programa desarrollado para tal fin, que resuelve la ecuación de conducción de calor bidimensional con coeficientes variables en la que se consideran los calores de transformación en estado sólido. El mismo utiliza el método de elementos finitos con una formulación del tipo Galerkin, y resuelve el sistema de ecuaciones utilizando técnicas de matrices raras [4].

Las tensiones son halladas por un programa de elementos finitos que resuelve únicamente chapas finas (estado bidimensional) sometidas a una distribución de temperaturas no homogéneas.

Hasta el presente no se cuenta con resultados que den una contrastación experimental; se está encarando la utilización del método del agujero ciego como técnica de verificación. Solamente se han comparado los resultados obtenidos con los que existen en la literatura.

La Div. Soldadura del INTEMA pretende con este primer ensayo sobre tensiones residuales en soldadura dar pie al comienzo del desarrollo de un modelo que permita predecir de una forma simple los valores de dichas tensiones. Este tema es de sumo interés industrial, y posibilita una contrapartida interesante, y poco explorado en el país.

2. FORMULACION DEL MODELO

En la ejecución del trabajo se utilizaron programas de elementos finitos tanto para el cálculo de la distribución de temperaturas como para la obtención de las tensiones térmicas. Se utilizó un modelo bidimensional, y para la discretización del problema se utilizó un generador de redes triangulares trinodales (Programa TRIS).

La distribución de temperatura se calculó con el programa TERTSOL, en el párrafo 2.1 se detallan las ecuaciones a resolver y algunos detalles en cuanto a su resolución. Una información completa se encuentra en [3] y [4]. Se calcularon las temperaturas incrementales para los distintos intervalos de tiempo según lo explicado en la introducción y posteriormente se calculó las tensiones térmicas correspondiente. En el párrafo 2.2 se explica la metodología utilizada.

Se usó una malla de 400 nodos y 505 elementos. La fig.4 esquematiza el problema a resolver y la fig.5 muestra una discretización típica con algunas isoterma.

Las tensiones térmicas fueron recortadas según la curva mostrada en la fig.3 que representa la variación de la tensión de fluencia con la temperatura.

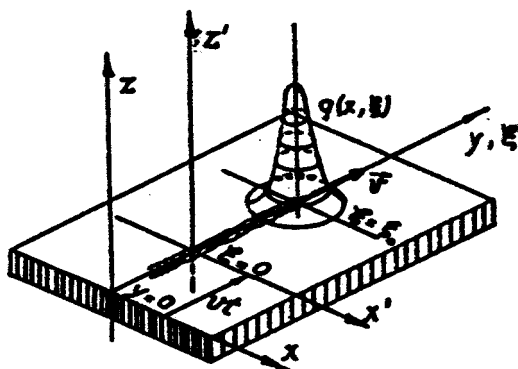


fig. 4
esquema del problema

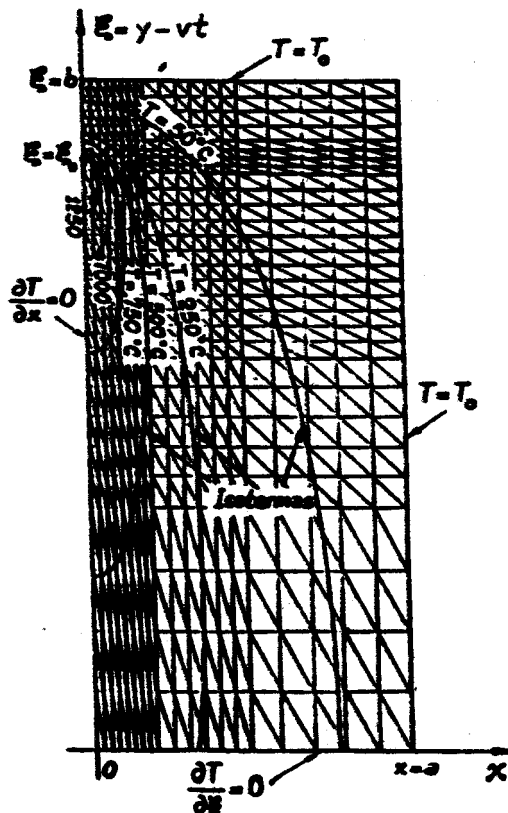


fig. 5
isoterma típicas en
en una chapa soldada.

2.1 Cálculo de Temperaturas

La ecuación de conducción de calor bidimensional dependiente del tiempo es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{2h}{s} (T - T_0) + q = c \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

donde:

k - conductividad térmica
 ρ - densidad
 c - calor específico
 T - temperatura

El programa TEMSOL resuelve el estado cuasiestacionario para el cual es necesario realizar cambios de coordenadas en función de la velocidad de soldadura.

La ecuación se puede reescribir en función de las coordenadas X y mostradas a continuación y que se aclaran en la fig.4 .

$$\begin{aligned} X &= x \\ \xi &= y - vt \end{aligned}$$

la ecuación resultante es la siguiente:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + c \rho v \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{2h}{s} (T - T_0) + q = 0 \quad (2)$$

La (2) se resuelve por el método de elementos finitos utilizando una aproximación variacional del tipo Galerkin, y el sistema de ecuaciones se resuelve utilizando técnicas de matrices ralas (4) (5) (6)

La fig. 6 muestra una distribución típica de temperaturas halladas.

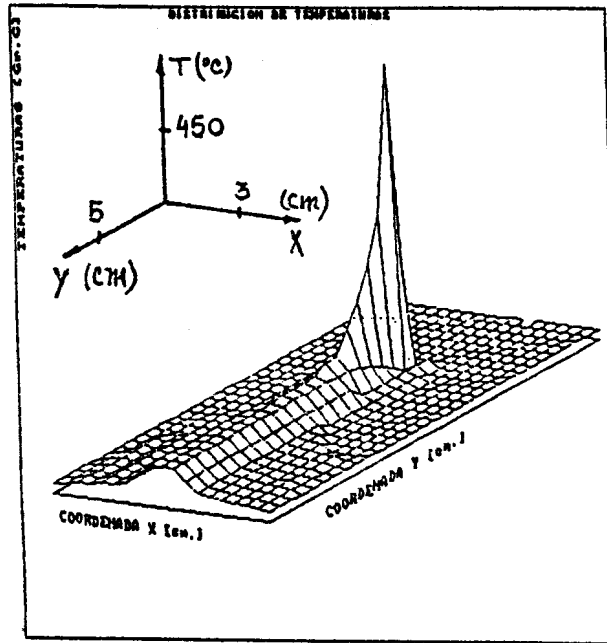


Fig. 6: Distribución típica de temperaturas

El programa analiza la variación con la temperatura de los coeficientes de la ecuación diferencial como así también el calor de fusión y los calores de transformación en estado sólido, aunque la influencia de estos últimos no es de consideración. Debido al gran gradiente térmico producido, es necesario una discretización muy fina cercana al cordón. Esto es salvable con utilización de algunas técnicas como por ejemplo "up wind" pero que no han sido implementadas aun.

2.2 Cálculo de Tensiones Térmicas

Las tensiones térmicas correspondientes a los incrementos de temperaturas de cada etapa temporal, son halladas por medio del programa MC-ELASTEF 801, que resuelve el problema de elasticidad y termo-elasticidad lineales en sistemas bidimensionales.

Paralelamente se está desarrollando el programa TENSITER que resuelve específicamente el problema de termo-elasticidad bidimensional por método de elementos finitos, con la utilización de técnicas de matrices ralas para la resolución del sistema de ecuaciones. Para la utilización de estas técnicas se generaron rutinas que operan en formato ralo para nodos con dos grados de libertad, logrando mayor eficiencia en memoria y tiempo de cálculo.

3. RESULTADOS

La fig.4 esquematiza la chapa estudiada. En la fig.1 se muestra la sección analizada y las sucesivas posiciones del electrodo en las cuales se consideraron las variaciones de temperatura.

La fig. 7 muestra distribuciones transversales de temperaturas. En la fig.6 se observan distribuciones longitudinales de temperaturas en las cuales se pueden apreciar los tiempos correspondientes a temperatura máxima.

Estos son los tiempos óptimos para calcular los incrementos de tensiones térmicas con el fin de hallar la tensión residual.

La fig. 9 representa las tensiones térmicas incrementales con el corte a fluencia correspondiente. En la fig. 10 se pueden observar los valores de tensiones residuales hallados para la sección en estudio.

4. COMENTARIOS

Si bien no poseemos por el momento de una verificación experimental es de preveer que los valores encontrados sean correctos, debido a su correspondencia con los valores hallados por otros investigadores en situaciones comparables. Por ejemplo L.Tall .

El método es de una gran simplicidad, lo cual lo hace de gran aplicabilidad a problemas de soldadura, en los cuales lograr predecir el comportamiento de una estructura antes de realizar una soldadura redundante en un ahorro económico difícil de realizar hasta ahora.

Los programas realizados (todavía en una etapa incipiente) constituyen un paquete sumamente interesante para la industria de la soldadura debido a su simplicidad, y fundamentalmente a que son aplicables a una computadora personal tipo XT.

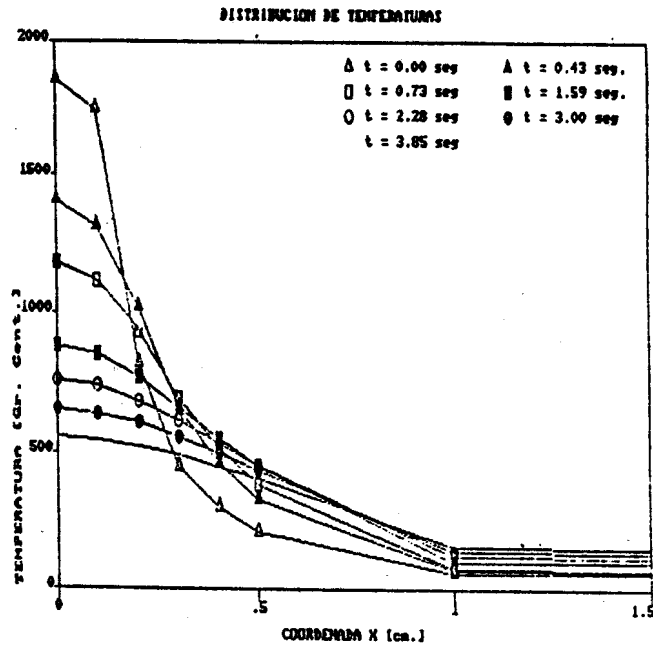


Fig.7: Distribución transversal de temperaturas

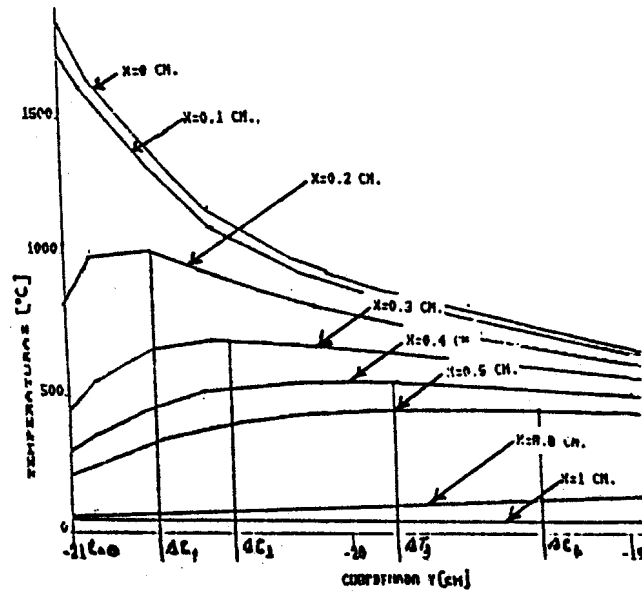


Fig.8: Distribución longitudinal de temperaturas

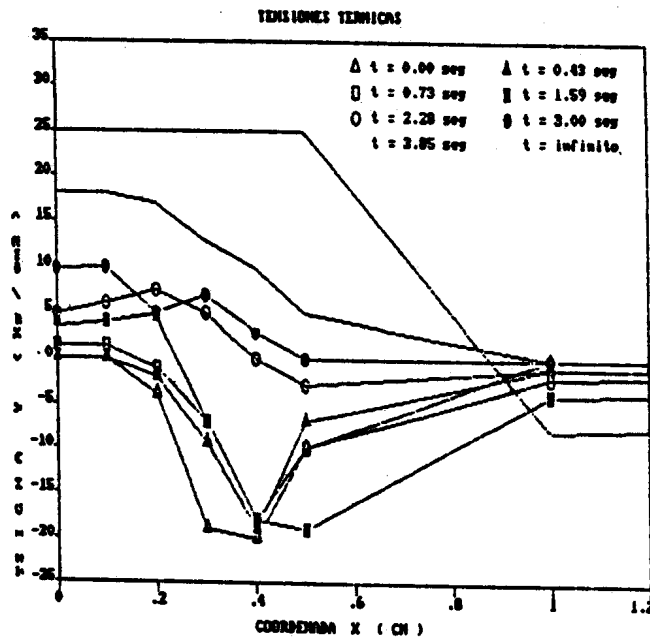


Fig.9: Tensiones térmicas

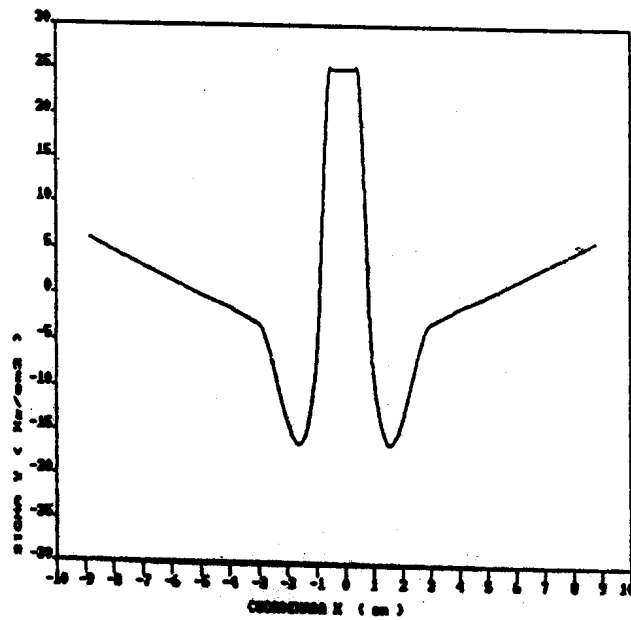


Fig. 10: Tensiones residuales

AGRADECIMIENTOS

Es de hacer notar que la realización del presente trabajo no hubiera sido posible sin el apoyo del Lic. Gustavo Sanchez Sarmiento (MECACOMP) quien se ha prestado desinteresadamente para asistir en el desarrollo del trabajo.

Destacamos el aporte del estudiante Sr. Alberto Sedrani en la puesta en operación del método de "Agujero ciego" para la determinación experimental de las tensiones residuales.

Por último agradecemos a la Fundación Latinoamericana de Soldadura y a la empresa CONARCO SA por el constante apoyo, tanto en nuestro trabajo como en todo lo que hace al desarrollo de la soldadura.

Agradecemos al CONICET y al INTEMA la ayuda financiera que hizo posible encarar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Pardo, E. "Aplicación de métodos numéricos al problema de flujo térmico en uniones soldadas" Trabajo de Tesis Doctoral - INTEMA - Universidad Nacional de Mar del Plata, Junio de 1987.
- [2] Tall, L. "Residual stresses in welded plates - a theoretical study" Welding J., 43 (1), 1964, 10s-23s.
- [3] Pardo, E., Sanchez Sarmiento, G., Solari, M.: "Modelo en elementos finitos para el análisis térmico de soldaduras a tope de chapas delgadas". VI Congreso Argentino de Soldadura, Buenos Aires, 23-26 de Octubre de 1986.
- [4] Pardo, E., Lombera, G., Benavente, M., Hack, H., Sanchez Sarmiento, G.: "Distribución de temperaturas en uniones soldadas mediante el empleo de técnicas de elementos finitos" IX Conferencia Interamericana de Materiales - Santiago de Chile 6-9 de Octubre de 1987.
- [5] Benavente, M.: "Técnicas operativas para matrices ralas con estructura simétrica Informe interno de INTEMA 1987
- [6] Pissanetzky, S. "Código de computación para la resolución directa de sistemas de ecuaciones algebraicas lineales con matriz esparcida, simétrica y definida positiva: código SPFACT" Nota Técnica CNEA-NT 15/78, Comisión Nacional de Energía Atómica - Argentina - 1978
- [7] Masubuchi, K.: "Residual stresses and distortion in weldments" A review of the present states-of-the-art. En Residual Stresses and Stress relaxation, E. Kula y V. Weiss Eds, Plenum Publishing Corp, pp 49-59 (1982)

[8] Welding Handbook, volume one, Seventh Edition, American Welding Society
Miami, Florida 1976

[9] Timoshenko,S.y Goodier,J "Theory of Elasticity". Mc Graw - Hill. (1951).

[10] MC-ELASTEF- Manual de usuario - MECACOMP Buenos Aires - Argentina- 1967