

# Determinación de Tensiones Residuales en Tuberías Soldadas en Dirección Circunferencial Utilizando Simulación Numérica

Rosendo Franco<sup>1</sup>, Quino M. Valverde<sup>1</sup>, Herbert Yépez<sup>1</sup>, Osmar G. Curi<sup>1</sup>, Paul Lean<sup>1</sup>

(1) Grupo INACOM, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32 (Perú)

E-mail: rofranco@pucp.edu.pe

## Resumen

Se desarrolló un procedimiento para simular el proceso de soldadura por arco en cordones circulares, para ser utilizado en la simulación del proceso de soldadura en tuberías. El proceso de soldadura fue simulado en dos etapas, resolviendo primero el problema térmico y luego el problema estructural, siendo ambos problemas transitorios y no lineales. El problema térmico permite obtener la distribución de temperaturas en función del tiempo, posteriormente utilizada en el problema estructural para determinar las tensiones y deformaciones residuales debidas al proceso de soldadura. Para simular el problema térmico se utilizó el modelo de doble elipsoide presentado por Goldak para la fuente de calor, se definieron las propiedades físicas del material en función de la temperatura y se utilizó un coeficiente combinado de convección-radiación como condición de contorno. Para simular el problema estructural se utilizó un modelo de material termo-elasto-plástico, se definieron las propiedades mecánicas del material en función de la temperatura, se importaron las temperaturas del problema térmico y se utilizaron diferentes restricciones de desplazamientos como condición de contorno. En ambos problemas se utilizó la técnica "birth and death" para simular la deposición del material, la cual se encuentra implementada en el software ANSYS, utilizado en el presente estudio. El procedimiento desarrollado se validó comparando los resultados obtenidos con los resultados disponibles en publicaciones especializadas, avaladas por resultados experimentales, los cuales muestran una adecuada correspondencia.

## Determination of Residual Stresses in Welded Pipes in circumferential direction Using Numerical Simulation

### Abstract

A procedure was developed to simulate the arc welding process in circular beads, for use in simulating the welding process of pipelines. The welding process was simulated in two stages, solving the thermal problem first and then the structural problem, both transient and nonlinear problems. The thermal problem allows obtaining the temperature distribution versus time, subsequently used in structural problem to determine residual stresses and deformations due to the welding process. To simulate the thermal problem the double ellipsoid model presented by Goldak for heat source was used, the physical properties of material as a function of temperature were defined and combined radiation-convection coefficient as boundary condition was used. To simulate the structural problem a thermo-elasto-plastic material model was used, the mechanical properties of the material as a function of temperature were defined, the temperatures of the thermal problem were imported and different displacement constraints as boundary conditions were used. To simulate the material deposition the "birth and death" technique was used in both problems, which is implemented in the ANSYS software, used in this study. The developed method was validated by comparing the obtained results with the results available in recognized publications, supported by experimental results, which show an appropriate match.

*Keywords: finite elements, welding simulation, residual stresses, ANSYS*

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo es parte de la investigación de los autores, cuyos primeros avances se presentaron en el 11° Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos CAIP'2013, con el tema "Procedimiento para determinar los campos de temperaturas producidos por el proceso de soldadura en cordones rectilíneos mediante simulación numérica" (Franco et al., 2013). Aquí se presentan dos avances fundamentales respecto a esta primera publicación, en primer lugar el análisis no sólo aborda el campo térmico sino que alcanzan también el campo estructural, para obtener las tensiones y deformaciones residuales producidas por la soldadura; en segundo lugar la trayectoria del cordón de soldadura pasa de ser rectilínea a circular, lo que permite que el procedimiento se aplique a la soldadura de tuberías.

La mayoría de autores que publica sobre el tema de la simulación del proceso de soldadura, como los citados en la bibliografía de este trabajo, no detalla con profundidad los procedimientos seguidos y las consideraciones hechas para llegar a los resultados que obtiene. En tal sentido la presente contribución pretende clarificar las consideraciones necesarias para realizar una simulación adecuada del proceso de soldadura, a través de una metodología que permite identificar los parámetros y variables involucrados en el proceso y establece sus interrelaciones. Finalmente, la metodología es implementada en un procedimiento sistematizado en el entorno del software ANSYS Mechanical APDL, y posteriormente aplicada en un caso de estudio de soldadura de una tubería.

## METODOLOGÍA

La metodología utilizada para desarrollar el procedimiento de simulación del proceso de soldadura es la siguiente:

- 1- Selección del modelo de aporte (fuente) de calor para el problema térmico, en función del tiempo y del tipo de cordón (circular).
- 2- Identificación de las propiedades físicas del material que intervienen en el problema térmico y su dependencia de la temperatura.
- 3- Definición de las condiciones de contorno del problema térmico.
- 4- Selección del modelo de plasticidad del material para el problema estructural, que permita obtener las deformaciones y tensiones residuales.
- 5- Identificación de las propiedades mecánicas del material que intervienen en el problema estructural y su dependencia de la temperatura.
- 6- Importación de temperaturas del problema térmico, en función del tiempo.
- 7- Definición de las condiciones de contorno del problema estructural.
- 8- Consideraciones para simular la deposición del material en ambos problemas, mediante el uso de la técnica "birth and death".
- 9- Consideraciones para la creación del modelo geométrico, mallado y paso de tiempo del problema transitorio.

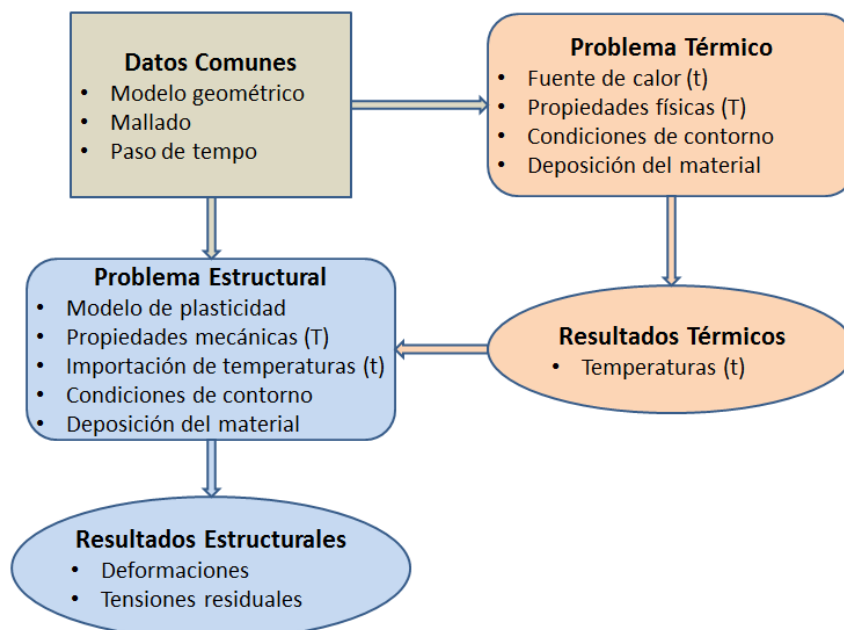


Fig. 1: Diagrama de flujo para la simulación del proceso de soldadura.

En el diagrama mostrado en la figura 1 se puede apreciar cómo se interrelacionan los diferentes aspectos involucrados en la simulación del proceso de soldadura, descritos en la metodología propuesta, cuyos puntos se detallan a continuación.

## SELECCIÓN DEL MODELO DE LA FUENTE DE CALOR

El aporte de calor durante el proceso de soldadura de una unión soldada es dependiente del tiempo, por lo que simular este proceso conduce a un problema térmico transitorio. El modelo de doble elipsoide mostrado en la figura 2, conocido como modelo de Goldak (Goldak y Akhlaghi, 2005), es el modelo más usado por los investigadores de esta temática y por tanto ha sido seleccionado también para este trabajo. En este caso el aporte de calor se define por separado en dos regiones, una región se encuentra en frente del centro del arco ( $x > 0$ ) y la otra región es definida detrás del centro del arco. El modelo se define para un tiempo de inicio de arco  $t$  igual a cero, con movimiento a lo largo del eje  $x$  positivo (Malik, 2007).

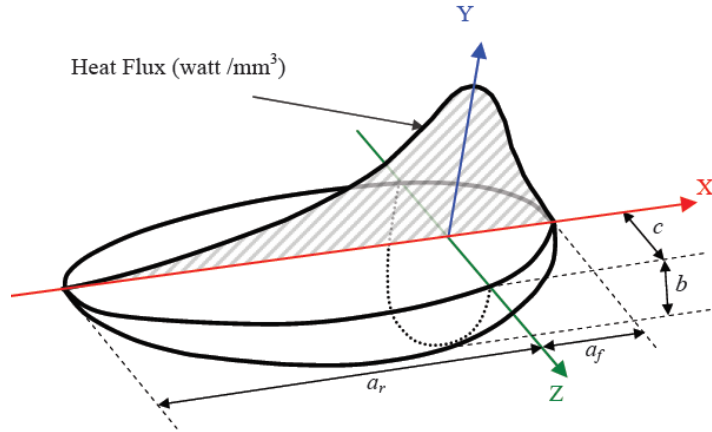


Fig. 2: Modelo de la fuente de calor de doble elipsoide (Fuente: Malik, 2007).

El calor de aporte  $q$ , en frente del centro del arco, se define como:

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi a_f b c}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a_f^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)} \quad (1)$$

Y detrás del centro del arco, como:

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi a_r b c}} e^{-3\left(\frac{x^2}{a_r^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}\right)} \quad (2)$$

Donde:  $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$ , y  $c$  son los semiejes del elipsoide, asociados con las regiones sobre las que ocurre el aporte de calor;  $f_f$  distribuye el calor delante del centro del arco;  $f_r$  distribuye el calor detrás del centro del arco;  $Q$  calor total generado por el arco ( $Q = \text{Voltaje} \times \text{Intensidad de la corriente}$ );  $\eta$  es la eficiencia de la fuente de calor.

Las ecuaciones (1) y (2) expresan el calor de aporte con respecto a un sistema de coordenadas local que se mueve con la fuente. Para expresar el movimiento de la fuente en función del tiempo  $t$ , con respecto a un sistema global, es necesario sustituir la coordenada global  $x$  de las ecuaciones anteriores por la coordenada local  $\xi$  (Kamal, 2012; Pozo, 2011; Anca, 2008):

$$\xi = x + v \cdot (\tau - t) \quad (3)$$

Donde:  $v$  es la velocidad de soldadura;  $\tau$  es el factor de retardo.

La mayoría de autores recomiendan que las dimensiones del elipsoide ( $a_f$ ,  $a_r$ ,  $b$ , y  $c$ ) sean calibrados de manera experimental, al igual que los parámetros  $f_f$  y  $f_r$ . Para éstos últimos se debe cumplir la condición  $f_f + f_r = 2$  (Kamal, 2012; Pozo, 2011).

Las ecuaciones (1) y (2) son válidas para un cordón lineal. Para el caso de un cordón circular, es necesario escribir estas ecuaciones en un sistema de coordenadas cilíndricas (Farfán, 2010):

$$q_f = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_f}{\pi\sqrt{\pi a_f b c}} e^{\{-3(\frac{(r-\theta-r\cdot\omega\cdot t)^2}{a_f^2} + \frac{(r-Ro)^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2})\}} \quad (4)$$

$$q_r = \frac{6\sqrt{3}\eta Q f_r}{\pi\sqrt{\pi a_r b c}} e^{\{-3(\frac{(r-\theta-r\cdot\omega\cdot t)^2}{a_r^2} + \frac{(r-Ro)^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2})\}} \quad (5)$$

Donde:  $r$ ,  $\theta$  y  $z$  son las coordenadas cilíndricas;  $Ro$  es el radio máximo (superficie del cordón);  $\omega$  es la velocidad angular de la soldadura ( $\omega = v / Ro$ ).

Las ecuaciones (4) y (5) ya están expresadas en función del tiempo  $t$ , considerando un factor de retardo  $\tau$  igual a cero, que opcionalmente se podría incluir como  $(\tau - t)$  en lugar de  $t$ .

### PROPIEDADES FÍSICAS DEL MATERIAL PARA EL PROBLEMA TÉRMICO

El problema térmico consiste en resolver la ecuación de conservación de energía, expresada en su forma diferencial en la ecuación (6) (Farfán, 2010).

$$\rho(T)c(T)\frac{\partial T}{\partial t} = q + \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_x(T)\frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ K_y(T)\frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_z(T)\frac{\partial T}{\partial z} \right] \quad (6)$$

Donde:  $\rho(T)$  es la densidad del material,  $c(T)$  el calor específico,  $q$  el calor generado por unidad de volumen,  $K_x(T)$ ;  $K_y(T)$ ;  $K_z(T)$  los coeficientes de conductividad térmica en las tres direcciones (iguales en materiales isotrópico),  $T$  es la temperatura y  $t$  es el tiempo.

Como se puede apreciar, las propiedades físicas requeridas para resolver el problema térmico son: la densidad del material, el calor específico y la conductividad térmica, todas las cuales son termo-dependientes, por lo que para un análisis exhaustivo sería necesario conocer sus valores en función de la temperatura. Debido a que las propiedades físicas son dependientes de la temperatura la ecuación diferencial (6), que gobierna el problema térmico, es no lineal.

Algunos autores en lugar de trabajar con el calor específico y la densidad definen la entalpía como propiedad del material (Kamal, 2012; Pozo, 2011; Mahapatra, 2006). Otros autores toman constante la densidad del material, específicamente cuando se trata de aceros (Malik, 2007; Qureshi, 2009). Con vistas a elevar la precisión de los resultados también podría considerarse que el material base es diferente al material de aporte y en general no presentan las mismas propiedades físicas.

### DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DEL PROBLEMA TÉRMICO

Las condiciones de contorno en el problema térmico están referidas a los mecanismos mediante los cuales se disipa el calor generado durante la soldadura, éstos son la convección y la radiación (Awang, 2002; Malik, 2007 y 2008). Algunos autores prefieren usar el coeficiente de transferencia de calor combinado, expresado en función de la temperatura. A continuación se muestran algunas de las expresiones utilizadas con este fin.

$$\text{(Awang, 2002)} \quad \rightarrow \quad h_{total} = 24.1 \times 10^{-4} \times \varepsilon \times T^{1.61} \quad (7)$$

$$\text{(Malik, 2007 y 2008; Kamal, 2012)} \quad \rightarrow \quad h_{total} = h + \varepsilon \times \sigma \times (T^2 + T_{amb}^2) \times (T + T_{amb}) \quad (8)$$

Donde:  $h_{total}$  es el coeficiente combinado;  $h$  es el coeficiente por convección;  $\varepsilon$  es la emisividad del material;  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ J m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{K}^{-4}$ );  $T$  es la temperatura del material (variable) y  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente (constante).

Otros autores aplican solamente la condición de convección y plantean que es posible considerar las pérdidas de calor por radiación ajustando los valores de eficiencia de la fuente de calor  $\eta$  (Pozo, 2011).

La tendencia actual es usar el coeficiente de transferencia de calor combinado, aplicado a todas las superficies expuestas, incluyendo la superficie del cordón de soldadura. Este coeficiente determinado por la ecuación (8) ofrece mejores resultados que los obtenidos por la ecuación (7), por lo que en el presente estudio se utilizará la ecuación (8).

## SELECCIÓN DEL MODELO DE PLASTICIDAD DEL MATERIAL

El término inelasticidad se usa para describir cualquier comportamiento constitutivo diferente al comportamiento elástico. En general el comportamiento inelástico incluye a los comportamientos visco-elástico, visco-plástico y elasto-plástico. La teoría de la plasticidad se encarga de estudiar los sólidos que, al ser sometidos a un sistema de cargas, pueden mantener deformaciones permanentes cuando son completamente descargados. La suposición de que estas deformaciones permanentes (plásticas) no dependen de la tasa de aplicación de las cargas, conduce a la teoría de plasticidad independiente de la tasa (rate-independent plasticity). Los materiales que pueden ser descritos adecuadamente por esta teoría se denominan plásticos o plásticos independientes de la tasa (Manitaras, 2012).

El comportamiento de los metales dúctiles, como los aceros, puede ser descrito adecuadamente por la teoría de los materiales plásticos indicada en el párrafo anterior. Al aplicar cargas sobre estos materiales se comienzan a deformar elásticamente, hasta que las tensiones alcanzan el valor de la tensión de fluencia, entonces también se deforman plásticamente (ver figura 3). El hecho de que la deformación puede tener una componente elástica (recuperable) y otra componente plástica (permanente) hace que a estos materiales se les denomine materiales elasto-plásticos (Lubliner, 2005; Kelly, 2012).

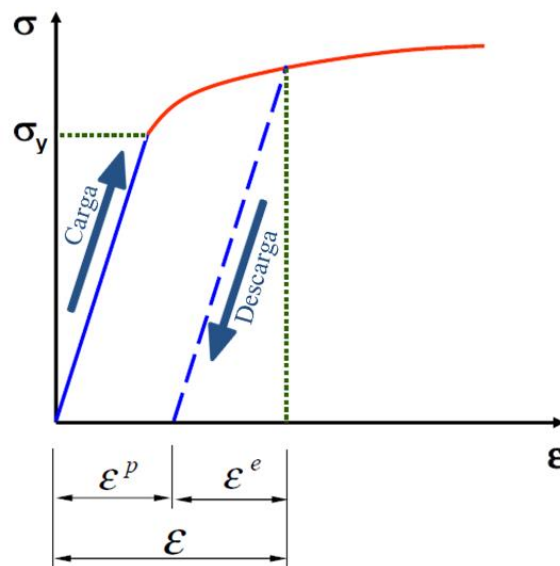


Fig. 3: Componentes de deformación: elástica y plástica en un ciclo de carga y descarga (Fuente: Qi, 2006).

Los modelos constitutivos para los materiales elasto-plásticos plantean una descomposición de la deformación en una parte elástica y otra parte plástica (Qi, 2006; Manitaras, 2012; Kelly, 2012). Para el caso uniaxial el modelo constitutivo quedaría dado por la ecuación (9) y el gráfico de la figura 3.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon^p \quad (9)$$

Donde:  $\varepsilon$  es la deformación total;  $\varepsilon^e$  es la deformación elástica;  $\varepsilon^p$  es la deformación plástica;  $\sigma$  es la tensión axial;  $E$  es el módulo de elasticidad del material.

Como se puede apreciar la componente elástica de la deformación está definida por la ley de Hook, mientras que la componente plástica está caracterizada por tres aspectos (Kelly, 2012; Manitaras, 2012):

- 1- El **criterio de fluencia** (yield criterion): determina el nivel de tensiones necesario para que se produzca la deformación plástica, dando lugar en el espacio tridimensional a la superficie de fluencia.
- 2- La **regla de flujo** (flow rule): determina la dirección en que ocurre la deformación plástica.
- 3- La **regla de endurecimiento** (hardening rule): describe la evolución del criterio de fluencia, es decir, describe el cambio de la superficie de fluencia tras la ocurrencia de la deformación plástica.

### Criterio de fluencia

El criterio de fluencia se define a partir de la función de fluencia, que depende de las tensiones actuantes y se puede interpretar como una tensión equivalente. La fluencia del material ocurre cuando la función de fluencia, evaluada en un punto, alcanza el valor del tensión de fluencia del material, lo que se puede expresar mediante la ecuación (10).

$$f(\{\sigma\}) = \sigma_y \quad (10)$$

Donde:  $\{\sigma\}$  es el vector de tensiones actuantes (principales);  $\sigma_y$  es la tensión de fluencia.

Los dos criterios de fluencia más usados en los metales dúctiles son el criterio de von Mises, expresado en la ecuación (11), y el criterio de Tresca, expresado en la ecuación (12). Las superficies de fluencia a que dan lugar estos dos criterios se aprecian en la figura 4, las cuales se pueden interpretar de la siguiente forma: cuando las tensiones actuantes sobre un punto del material lo ubican dentro de la superficie, se dice que tiene un comportamiento elástico, si se ubica sobre la superficie entonces tiene comportamiento plástico.

$$\sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} = \sigma_y \quad (11)$$

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \sigma_y \quad (12)$$

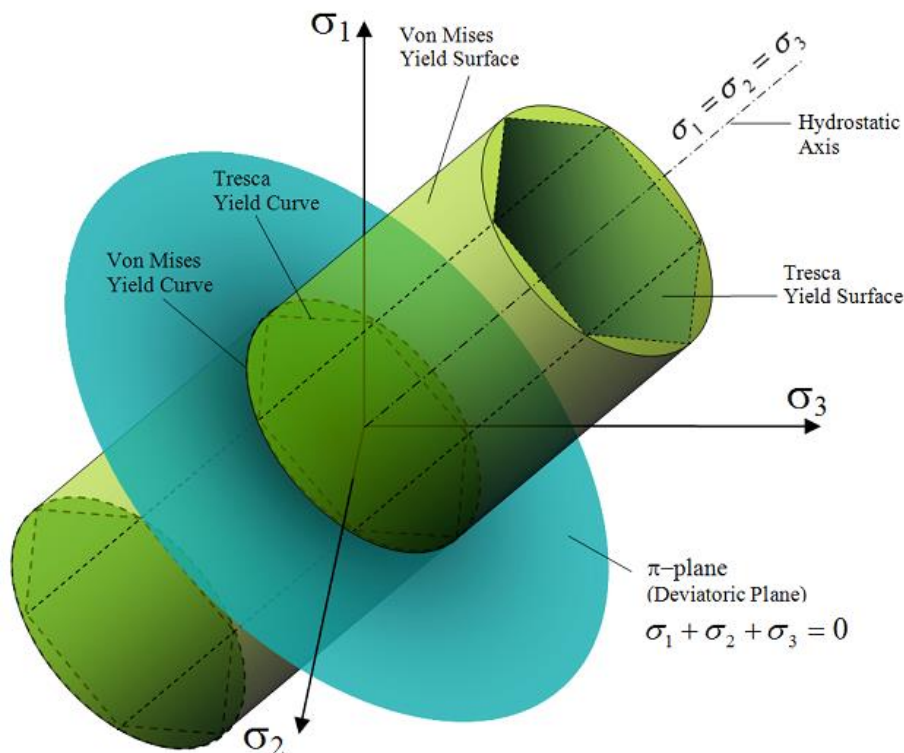


Fig. 4: Superficies de fluencia de von Mises y Tresca (Fuente: [http://es.wikipedia.org/wiki/Teorías\\_de\\_fallo](http://es.wikipedia.org/wiki/Teorías_de_fallo)).

## Regla de flujo

La dirección del flujo plástico se determina como el gradiente de una función denominada potencial plástico. La regla de flujo puede ser asociada o no asociada, se considera asociada cuando la función de potencial plástico coincide con la función de fluencia, lo cual es aceptable para los metales y otros materiales isotrópicos. La regla de flujo asociada se define por la expresión (13).

$$\{d\varepsilon^p\} = \lambda \left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\} \quad (13)$$

Donde:  $\varepsilon^p$  es el vector de deformación plástica;  $\sigma$  es la componente del vector tensiones;  $\lambda$  es el multiplicador plástico.

## Regla de endurecimiento

Como se puede apreciar en la figura 3, luego de un ciclo de trabajo (carga y descarga) el tensión de fluencia ha variado (en este caso ha aumentado), es decir ha ocurrido un endurecimiento. La regla de endurecimiento se puede expresar por la ecuación (14).

$$F(\{\sigma\}, \kappa, \{\alpha\}) = 0 \quad (14)$$

Donde:  $\{\sigma\}$  es el vector de tensiones;  $\kappa$  es el trabajo plástico;  $\{\alpha\}$  es el corrimiento o traslación de la superficie de fluencia.

Existen dos reglas de endurecimiento principales: el endurecimiento isotrópico y el endurecimiento cinemático. Durante el endurecimiento isotrópico el centro de la superficie de fluencia se mantiene estacionario y la superficie crece mientras ocurre la deformación plástica (ver figura 5). Mientras que durante el endurecimiento cinemático el tamaño de la superficie de fluencia se mantiene constante y el centro de la superficie se desplaza mientras ocurre la deformación plástica (ver figura 6).

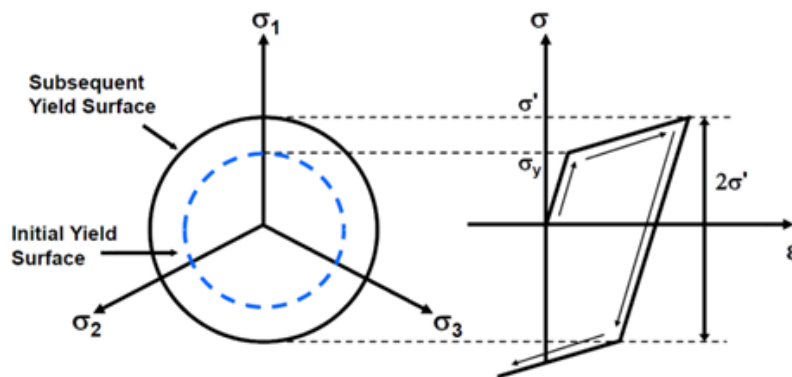


Fig. 5: Endurecimiento isotrópico (Fuente: ANSYS, Inc., 2010).

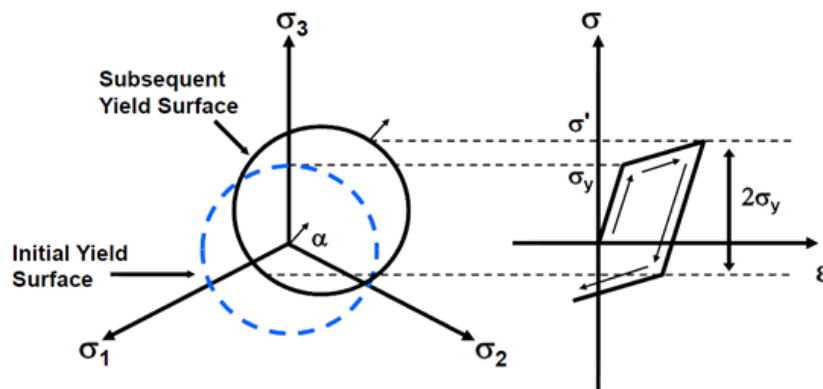


Fig. 6: Endurecimiento cinemático (Fuente: ANSYS, Inc., 2010).

El modelo de endurecimiento cinemático es más apropiado para metales, cuando en el material se producen tensiones de tracción y compresión que cambian con el tiempo, ya que permite captar mejor el efecto Bauschinger, que demuestra una asimetría en la evolución de las tensiones de fluencia a tracción y compresión (Lubliner, 2005; Kelly, 2012). Asimismo, el modelo de endurecimiento se expresa a través de las curvas tensión-deformación, que pueden ser bilineales o multilineales (ver figura 7).

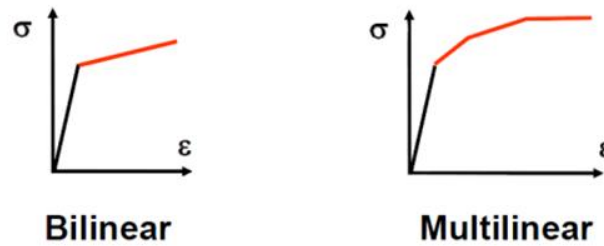


Fig. 7: Curvas tensión-deformación (Fuente: ANSYS, Inc., 2010).

En el presente estudio se utilizará el criterio de fluencia de von Mises, la regla de flujo asociada y la regla de endurecimiento cinemático bilineal.

### Efecto térmico

Adicionalmente, el estudio del proceso de soldadura involucra un problema térmico que repercute en las deformaciones que ocurren en el material, modificando el modelo constitutivo descrito anteriormente (Mahapatra, 2006; Farfán, 2010; Asserin, 2011). En el caso uniaxial la ecuación (9) se verá afectada como se muestra en la ecuación (15), convirtiéndose en lo que sería un modelo termo-elasto-plástico.

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p + \varepsilon^t \quad (15)$$

Donde:  $\varepsilon$  es la deformación total;  $\varepsilon^e$  es la deformación elástica;  $\varepsilon^p$  es la deformación plástica;  $\varepsilon^t$  es la deformación por carga térmica, que se determina según la ecuación (16).

$$\varepsilon^t = \alpha(T - T_{ref}) \quad (16)$$

Donde:  $\alpha$  es el coeficiente de expansión térmica;  $T$  es la temperatura instantánea del material;  $T_{ref}$  es la temperatura de referencia, para la cual las deformaciones térmicas son nulas.

### PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL PARA EL PROBLEMA ESTRUCTURAL

Las propiedades mecánicas del material que deben conocerse para simular el problema mecánico están relacionadas con el modelo de comportamiento del material que se utilice, que para este estudio es un modelo termo-elasto-plástico, con criterio de fluencia de von Mises y endurecimiento cinemático bilineal. En este caso se requiere el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson, la tensión de fluencia, el módulo tangente y el coeficiente de expansión térmica (Asserin, 2011). Todas estas propiedades, al igual que las propiedades térmicas, varían con la temperatura, por lo que se deben tener en cuenta las mismas consideraciones indicadas para el problema térmico si se desea realizar un análisis exhaustivo.

### IMPORTACIÓN DE TEMPERATURAS DEL PROBLEMA TÉRMICO

Como se ha indicado antes el campo de temperaturas es el resultado del problema térmico, el cual se guarda en un archivo para cada paso de tiempo. Luego estos resultados son leídos e importados como carga térmica en el problema estructural transitorio. Si bien es cierto que los resultados de temperatura podrían interpolarse en función del tiempo y de la geometría, lo más recomendado es utilizar los mismos pasos de tiempo en el problema térmico y en el problema mecánico, al igual que la misma malla de elementos finitos.

### DEFINICIÓN DE LAS CONDICIONES DE CONTORNO DEL PROBLEMA ESTRUCTURAL

Las condiciones de contorno en el problema estructural básicamente están referidas a las restricciones en los desplazamientos de las piezas o estructura que se va a soldar, aspecto que es particular para cada caso. Adicionalmente se pueden considerar cargas externas, como puede ser el peso propio de la estructura para obtener resultados más precisos en las deformaciones y tensiones residuales.



## **CONSIDERACIONES PARA SIMULAR LA DEPOSICIÓN DEL MATERIAL**

La simulación de la deposición del material de aporte se implementa mediante el uso de la técnica "birth and death". Esta técnica consiste en generar toda la geometría, y malla correspondiente, desde el inicio, incluyendo la porción del cordón de soldadura. Antes del primer paso de tiempo, se desactivan todos los elementos finitos correspondientes al cordón de soldadura y luego se van reactivando a medida que son alcanzados por la fuente de calor. Para la desactivación de los elementos se utiliza un multiplicador con un valor muy pequeño (por defecto es  $10^{-9}$ , pero para este estudio se tomó  $10^{-18}$ ) por el que se multiplican todas las propiedades del material, de manera que su efecto en el sistema es insignificante. Luego, la reactivación consiste en asignar los valores reales de sus propiedades, en función de la temperatura, cuando pasa la fuente de calor.

En el caso del problema térmico debe considerarse que se tiene un grado de libertad por nodo, que es la temperatura, la cual no se afecta por el multiplicador mencionado. Por este motivo es recomendable que a los nodos libres del cordón (nodos que no están en la interfaz dada entre el material del cordón y el material base) se les imponga, antes del primer paso de tiempo, la temperatura ambiente. Por defecto estos nodos tendrían temperatura cero y podrían distorsionar ligeramente los resultados. Es importante tener en cuenta que, al momento de reactivar los elementos, se debe eliminar esta temperatura impuesta y aplicar la carga térmica correspondiente, según el modelo de fuente calor seleccionado.

En el caso del problema estructural debe tenerse en cuenta que éste es subsecuente al problema térmico y, por tanto, todos los elementos estarán reactivados, con lo cual se requiere desactivar nuevamente todos los elementos pertenecientes al cordón de soldadura antes del primer paso de tiempo. Por otro lado, en el problema estructural, utilizando elementos tridimensionales, se tienen tres grados de libertad por nodo, que son los desplazamientos (x, y, z). Al reactivar los elementos del cordón algunos nodos, compartidos con el material base, podrían haberse desplazado y generar deformaciones en los elementos del cordón, lo cual no se corresponde con la realidad, ya que en ese momento el material está fundido y no genera deformaciones ni tensiones. Por este motivo se recomienda imponer deformación cero a los elementos del cordón en el instante que son reactivados. Adicionalmente, algunos autores recomiendan reactivar los elementos cuando alcanzan la temperatura de solidificación y no exactamente en el instante que pasa la fuente de calor sobre ellos, pues es a partir de este momento que generan deformaciones y tensiones. La alternativa que se ha usado en el presente estudio es reactivar los elementos justo después de pasar toda la fuente de calor, con lo cual se garantiza, al menos, que hayan pasado su pico de temperatura y estén más próximos a la temperatura de solidificación.

## **CONSIDERACIONES PARA CREAR EL MODELO GEOMÉTRICO, MALLADO Y PASO DE TIEMPO**

En el modelo geométrico, y el correspondiente mallado, se debe considerar desde el inicio tanto el material base como el material de aporte del cordón de soldadura. Es conveniente, siempre que sea posible, partir el material base en la zona aledaña al cordón de soldadura (zona fundida), de manera que la iteración para la reactivación de los elementos, imposición del potencial calórico y demás acciones que se realizan sobre estos elementos, genere un mínimo costo computacional.

El paso de tiempo durante la soldadura se determina como el tiempo total de soldadura entre el número de elementos a lo largo del cordón, de manera que el aporte de calor de cada elemento sea gradual y uniforme. Luego de terminada la soldadura viene la etapa de enfriamiento, en la cual se pueden utilizar pasos de tiempo mayores. En todo caso se recomienda que el incremento del paso de tiempo en la etapa de enfriamiento sea gradual para evitar comportamientos incorrectos o falta de convergencia en los parámetros calculados. Como ya se indicó en el acápite de importación de temperaturas, es conveniente que la malla utilizada para el problema estructural y los pasos de tiempo sean los mismos que para el problema térmico, para minimizar igualmente el costo computacional y evitar errores de interpolación.

## **PROCEDIMIENTO PARA SIMULAR EL PROCESO DE SOLDADURA**

La metodología descrita anteriormente fue implementada en un procedimiento sistematizado, a través de macros desarrolladas por los autores, en el entorno del software ANSYS Mechanical APDL. El procedimiento es general para simular la soldadura de una tubería, requiriéndose solamente los datos que definen la geometría de la tubería y de la junta soldada, las propiedades físicas y mecánicas de los materiales definidas en la metodología, así como las condiciones de contorno térmicas y estructurales. El alcance del procedimiento corresponde a soldadura de una sola pasada.

## CASO DE ESTUDIO: SOLDADURA DE UNA TUBERÍA

Para probar y validar el procedimiento se tomó como caso de estudio la tubería presentada por Malik (2008) en su publicación "*Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields*", cuyo trabajo cuenta con los datos necesarios para desarrollar la simulación y está respaldado por resultados experimentales.

### Geometría y mallado

La geometría consiste en dos tubos de 300 mm de diámetro exterior, 3 mm de espesor y una longitud de 150 mm cada uno, tal como se indica en la figura 8.

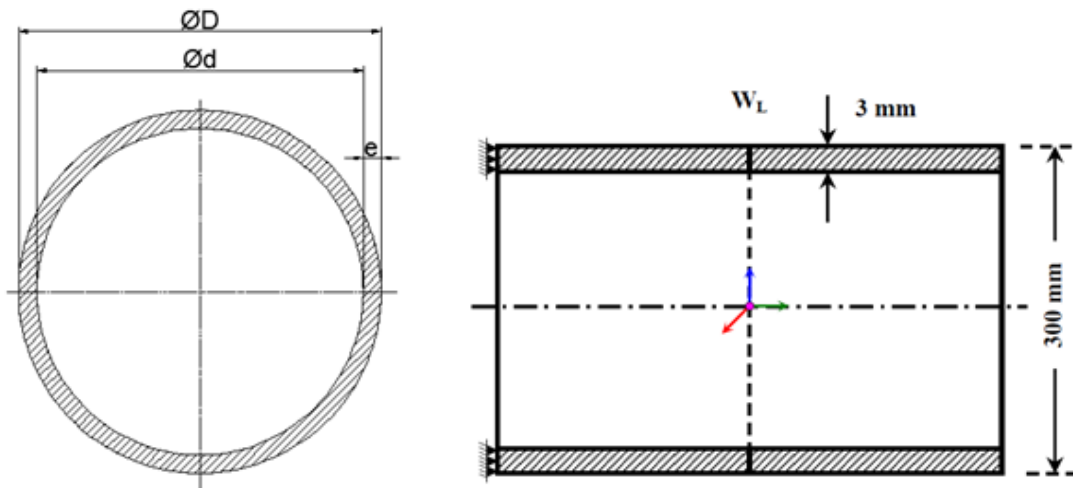


Fig. 8: Geometría de la tubería caso de estudio (Fuente: Malik, 2008).

El detalle de la junta soldada se presenta en la figura 9, en la que puede apreciarse un punto de soldadura que sobrepasa ligeramente la cara de raíz (con rayado contrario). En realidad de estos puntos se consideraron dos, ubicados a  $180^\circ$  entre sí, para el apuntalamiento inicial entre los dos tubos.

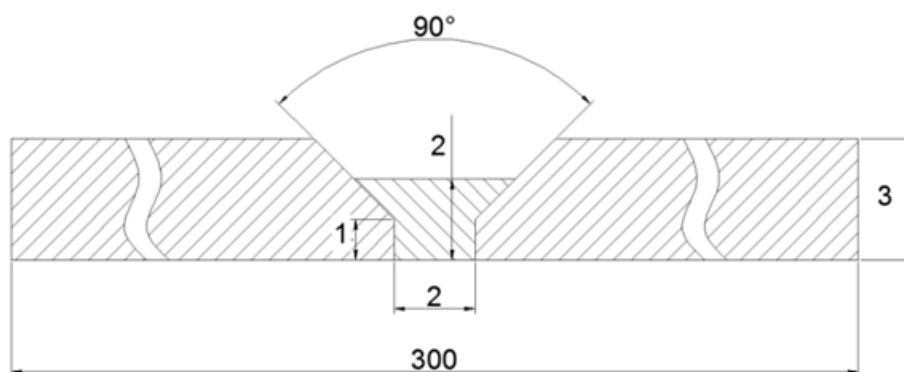


Fig. 9: Detalle de la junta.

El mallado se realizó con elementos hexaédricos de 8 nodos, compatibles con el elemento térmico SOLID70 y con el elemento estructural SOLID45, ambos disponibles en la librería de ANSYS. De esta manera se puede utilizar la misma malla para el problema térmico y para el problema estructural. La malla se hizo más fina en la zona aledaña al cordón, para alcanzar mejores resultados, como se aprecia en la figura 10.

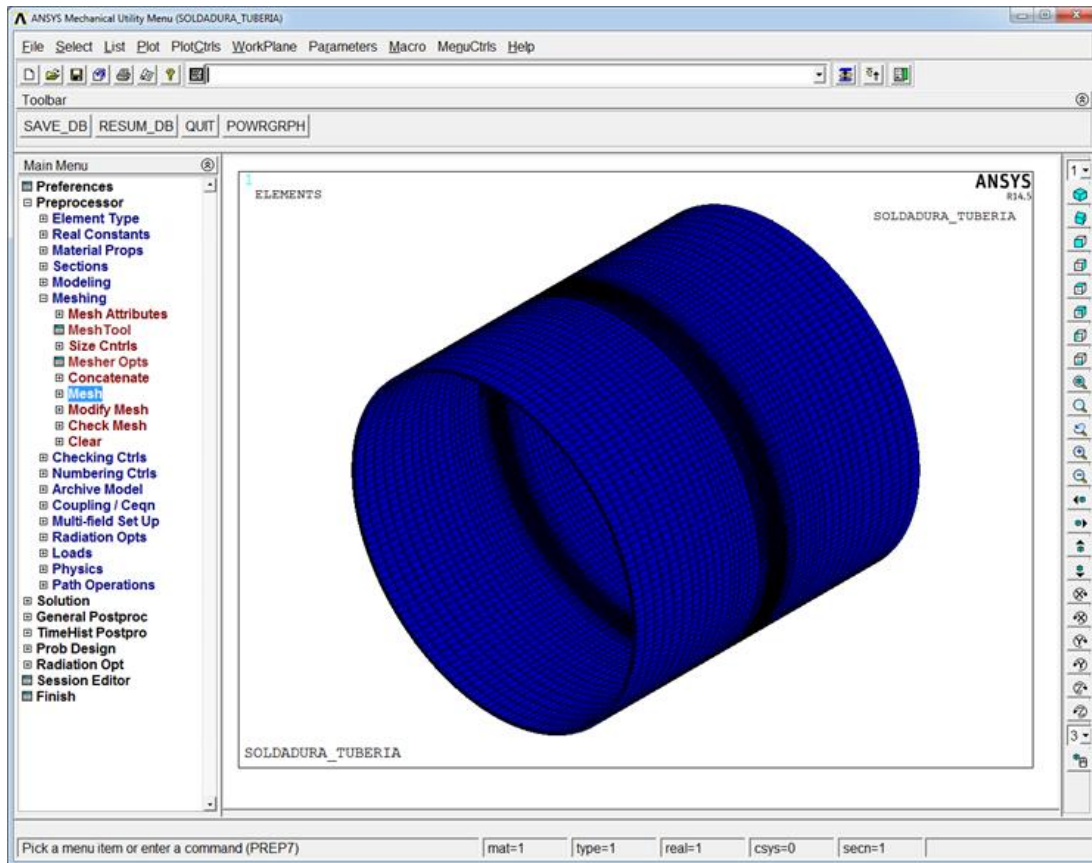


Fig. 10: Malla.

### Propiedades del material

El material de la tubería del caso de estudio corresponde al acero ASTM A36, y los datos fueron obtenidos del trabajo de Malik (2008). Se considera la densidad constante e igual a  $7850 \text{ Kg/m}^3$ . En las figuras 11 a la 17 se detallan las propiedades que se ingresarán, utilizando las mismas para el material de aporte.

Como se ha indicado en puntos anteriores en este procedimiento se implementa un modelo de comportamiento del material termo-elasto-plástico, con criterio de fluencia de von Mises y endurecimiento cinemático bilineal. En el caso de estudio se considera un comportamiento perfectamente plástico, por lo que el módulo tangente tomará valor cero.

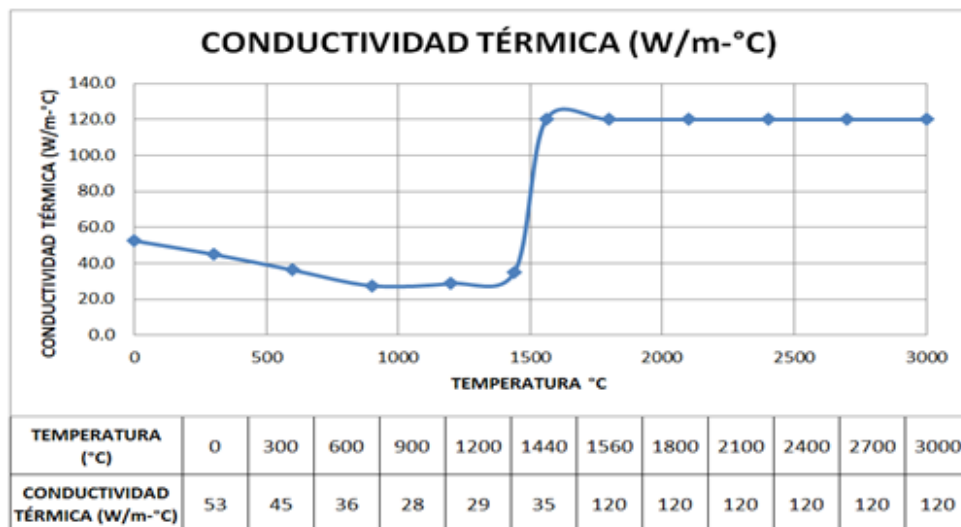


Fig. 11: Conductividad térmica.

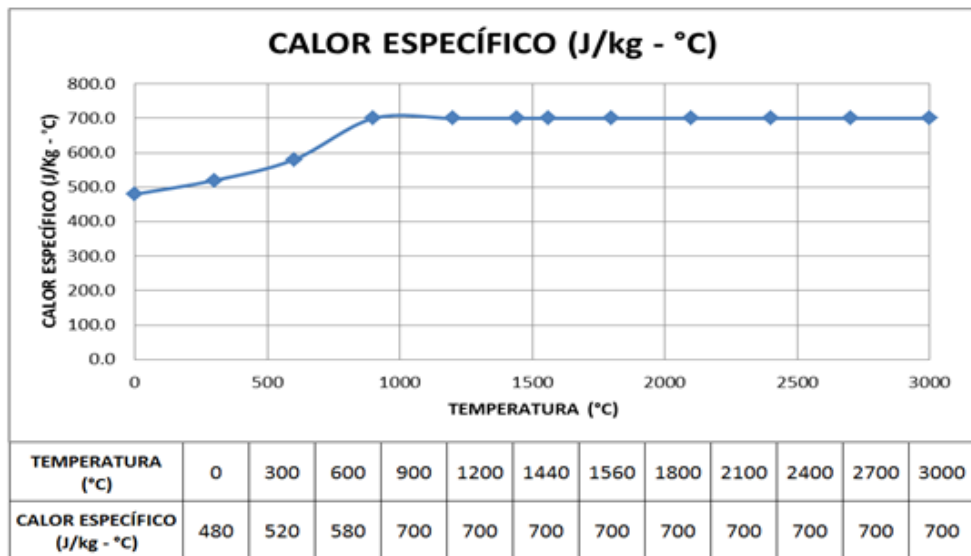


Fig. 12: Calor específico.

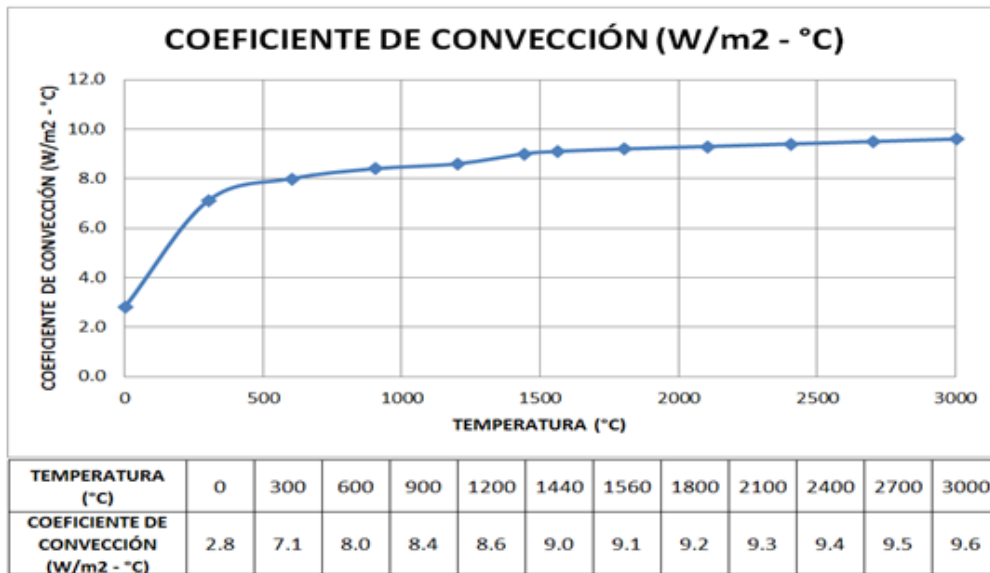


Fig. 13: Coeficiente de convección.

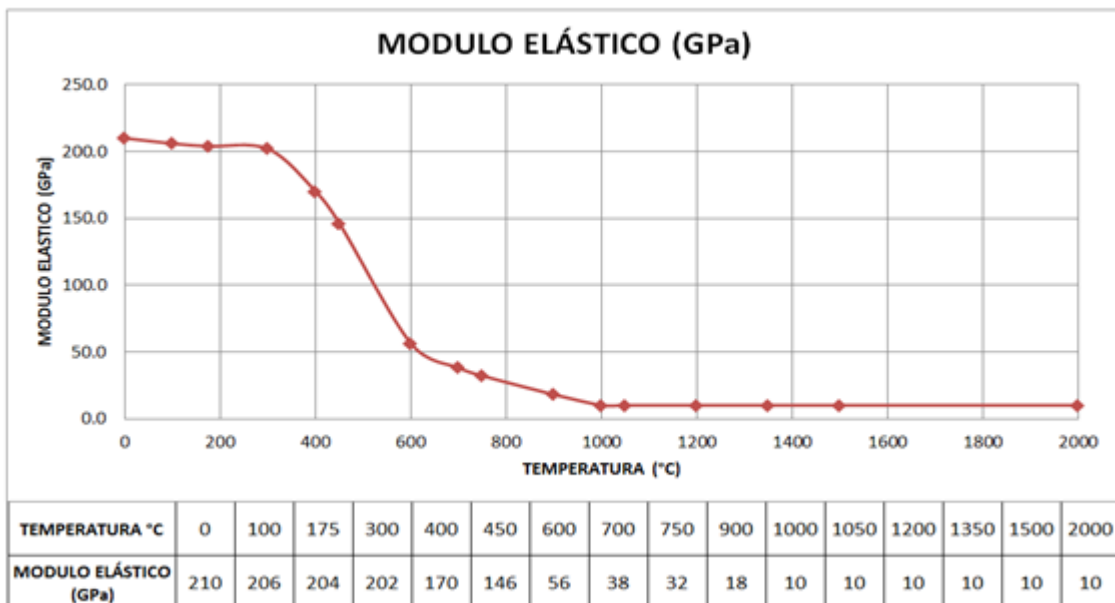


Fig. 14: Módulo de elasticidad.

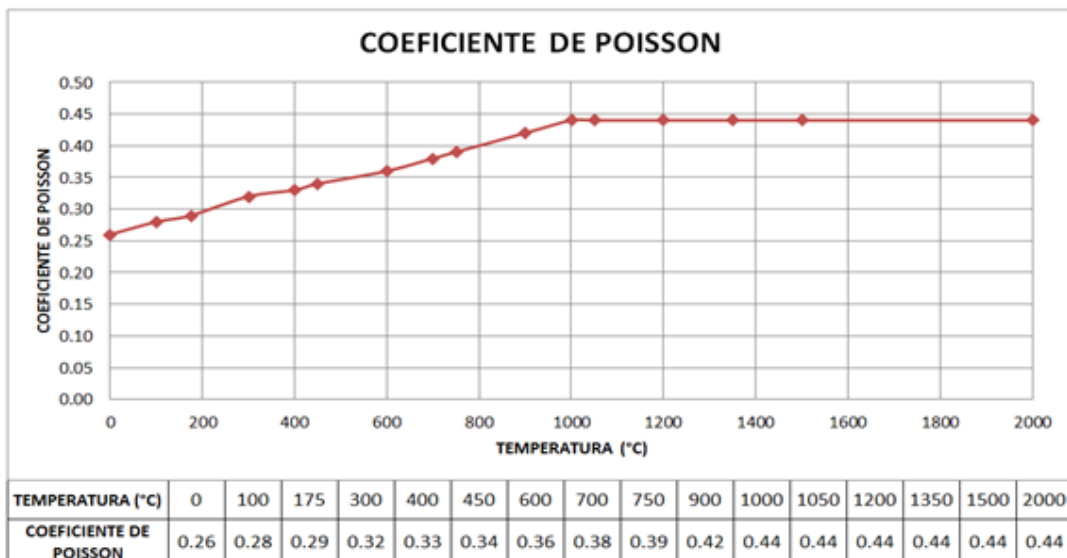


Fig. 15: Coeficiente de Poisson.

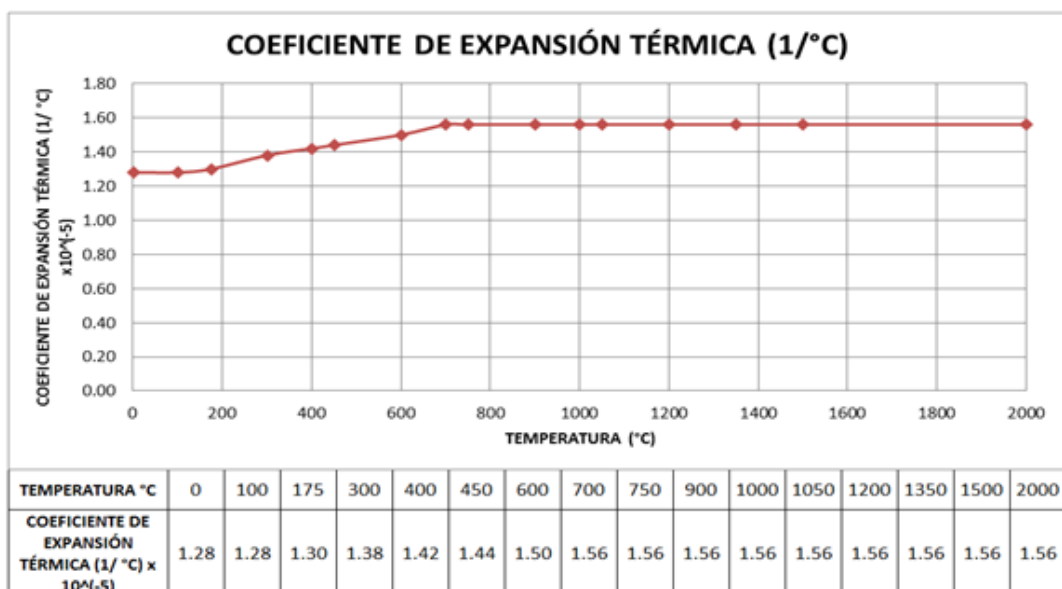


Fig. 16: Coeficiente de expansión térmica.

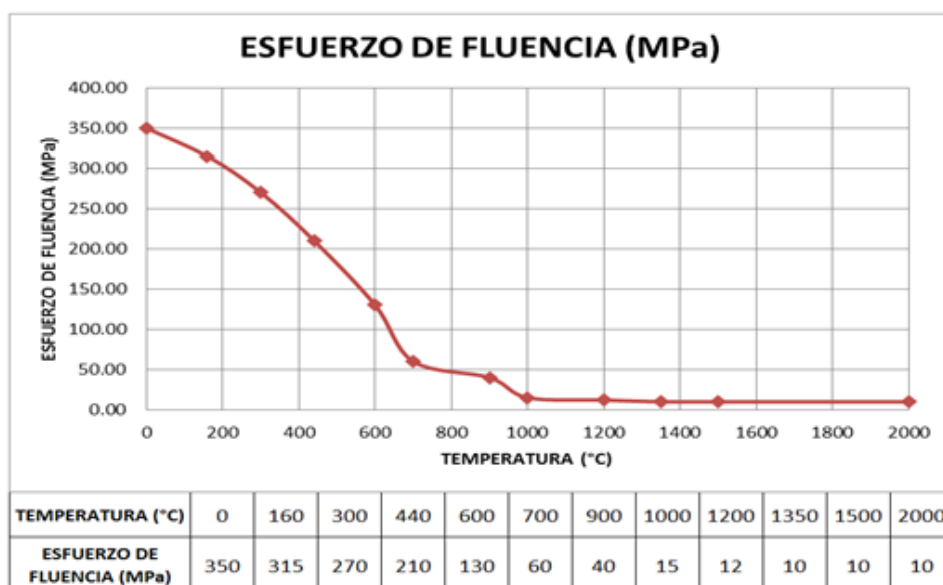


Fig. 17: Tensión de fluencia.

## Parámetros del proceso de soldadura y de la fuente de calor

Los parámetros del proceso de soldadura se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros del proceso de soldadura.

Parámetro	Valor	Unidad
Voltaje	12.5	Voltios
Corriente	200	Amperios
Velocidad	3	mm/s
eficiencia	75	%

Los parámetros de la fuente de calor de Goldak se presentan en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros del modelo de la fuente de calor de Goldak.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud del frente elipsoidal	5	mm
Longitud posterior elipsoidal	15	mm
Ancho de la fuente de calor	10	mm
Profundidad de la fuente de calor	3	mm
Fracción de calor en el frente elipsoidal	1.25	
Fracción de calor el posterior elipsoidal	0.75	

El tiempo total de soldadura es de 314.16 s y se consideró un enfriamiento de 1500 s.

## Condiciones de contorno térmicas y estructurales

El coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) varía en función de la temperatura, los valores de este coeficiente se muestran en la figura 18.

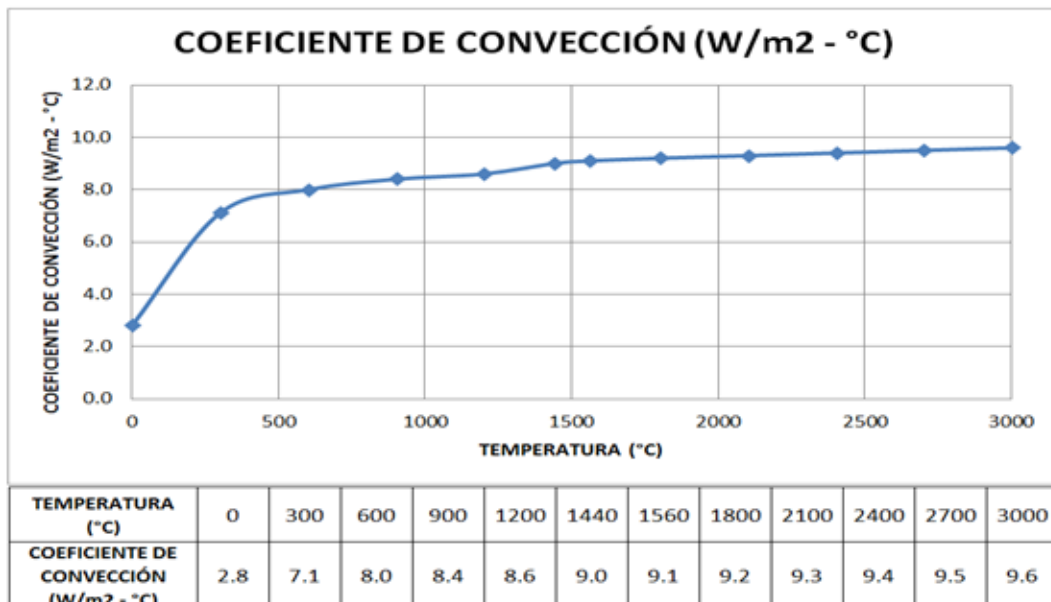


Fig. 18: Coeficiente de convección.

En el presente análisis se utilizará el coeficiente de transferencia de calor combinado, dado por la expresión (8). Los valores se detallan en la figura 19. Desde el punto de estructural se restringen axialmente las caras planas en los extremos de los tubos.

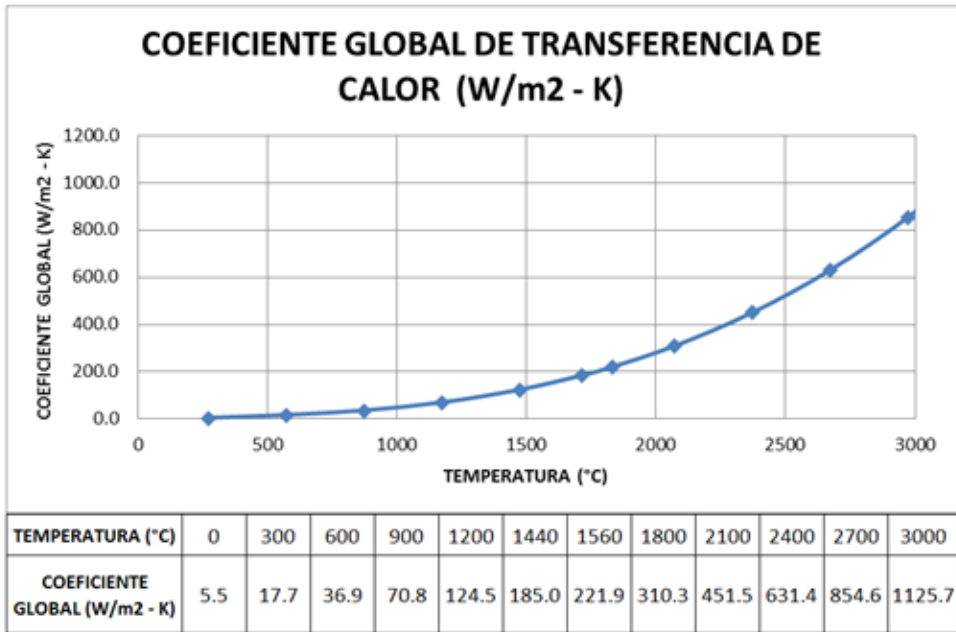


Fig. 19: Coeficiente de transferencia de calor combinado.

### Resultados térmicos

En la figura 20 se puede apreciar la distribución de temperaturas, al finalizar el tiempo de soldadura, utilizando el procedimiento implementado, y en la figura 21 se aprecia un resultado similar obtenido por Malik (2008).

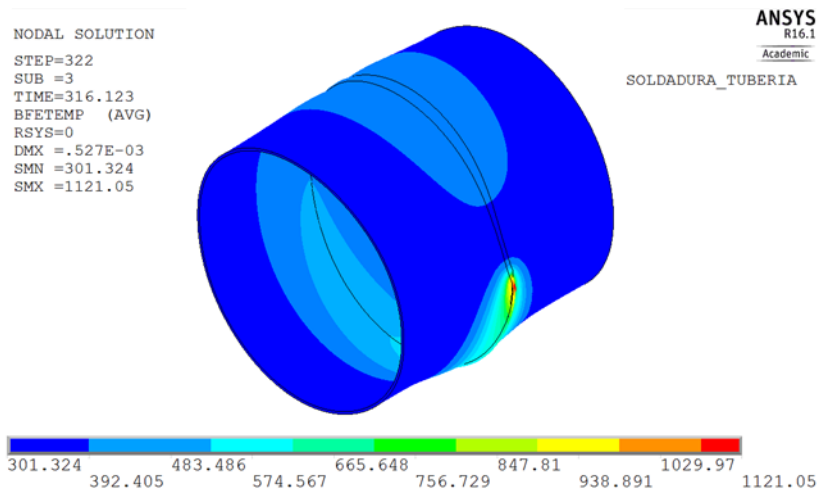


Fig. 20: Distribución de temperaturas (Procedimiento desarrollado).

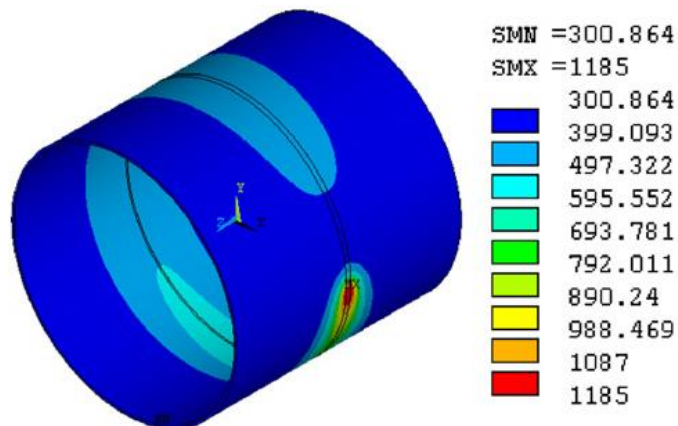


Fig. 21: Distribución de temperaturas (Malik, 2008).

## Resultados estructurales

En la figura 22 se pueden apreciar las tensiones residuales axiales, utilizando el procedimiento implementado, y en la figura 23 se aprecian resultados similares obtenidos por Malik (2008).

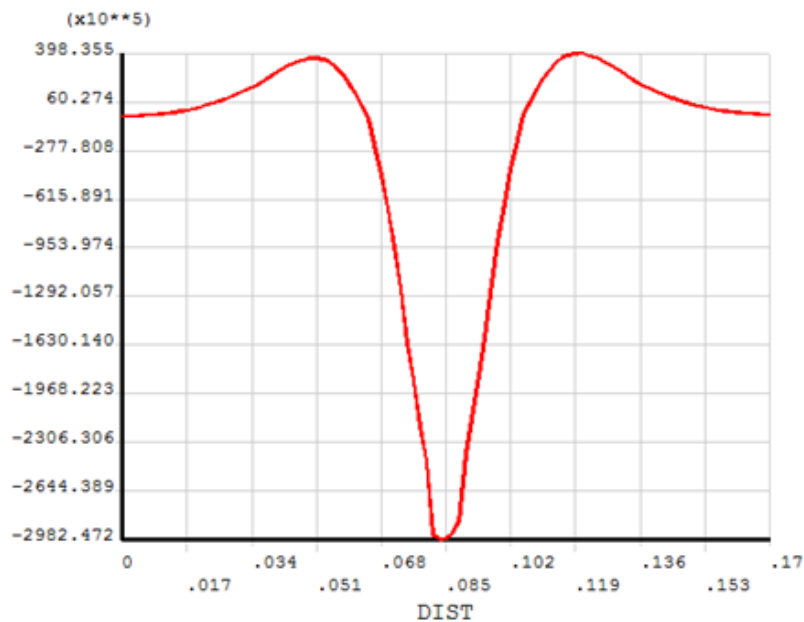


Fig. 22: Tensiones residuales axiales (Procedimiento desarrollado).

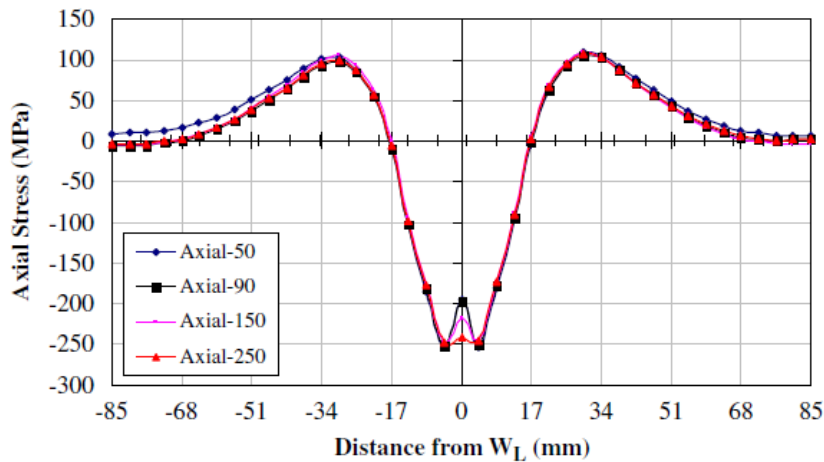


Fig. 23: Tensiones residuales axiales (Malik, 2008).

## CONCLUSIONES

El procedimiento desarrollado en el software ANSYS Mechanical APDL para simular el proceso de soldadura por arco en tuberías, contempla el modelo de doble elipsoide de Goldak para el aporte de calor en el problema térmico, la termo-dependencia de las propiedades físico-mecánicas del material y un modelo termo-elasto-plástico para resolver el problema estructural. Este procedimiento permite obtener los campos de temperatura, las deformaciones y las tensiones residuales en la tubería producto del proceso de soldadura.

La simulación del proceso de soldadura es dividida en dos problemas semi-acoplados, primero se simula el problema térmico para obtener los campos de temperatura y luego el problema estructural para obtener las deformaciones y tensiones residuales, siendo el problema estructural dependiente del problema térmico. Para ambos casos se definieron con claridad los aspectos fundamentales que deben considerarse en la simulación. En general, para simular todo el proceso, debe definirse la fuente de calor en función del tiempo, las propiedades físico-mecánicas del material en función de la temperatura, el coeficiente de transferencia



de calor combinado en función de la temperatura, el modelo termo-elasto-plástico del material y las restricciones de desplazamiento del problema estructural.

Para simular el aporte del material de soldadura en función del tiempo se implementó la técnica “birth and death”, es decir, la desactivación de todos los elementos del cordón al inicio de cada problema (térmico y estructural) y su posterior reactivación con el paso de la fuente de calor. Todos los elementos están creados desde el inicio, pero los elementos del cordón son desactivados multiplicando sus propiedades por un factor muy pequeño, por defecto  $10^{-9}$  ( $10^{-18}$  en el presente estudio), de manera que su influencia es despreciable. Luego, la reactivación consiste en asignar los valores reales de sus propiedades cuando pasa la fuente de calor. Esta técnica tiene algunos inconvenientes en el problema estructural, generándose grandes deformaciones en el material del cordón, para lo cual algunos autores recomiendan reactivar los elementos cuando alcanzan la temperatura de solidificación y no exactamente cuando pasa la fuente, aspecto en el que se debe continuar investigando. La alternativa que se ha usado en el presente estudio es reactivar los elementos justo después de pasar toda la fuente de calor, con lo cual se garantiza, al menos, que hayan pasado su pico de temperatura y estén más próximos a la temperatura de solidificación.

El ejemplo desarrollado demuestra la factibilidad del procedimiento implementado. Los resultados obtenidos se han podido comparar con resultados disponibles en una publicación especializada, respaldada por resultados experimentales, observándose una adecuada correspondencia en el caso estudiado. Sin embargo, es conveniente que el equipo investigador del presente trabajo realice sus propios experimentos, para tener acceso directo a dichos resultados, probar otras alternativas y calibrar mejor el modelo.

## REFERENCIAS

Anca, A. et al. “*Finite element modeling of welded joints*”. Mecánica Computacional Vol XXVII, pp. 1445-1470. Argentina 2008.

ANSYS, Inc. “*Customer Training Material. Lecture 5-Rate Independent Plasticity*”. ANSYS Mechanical Structural Nonlinearities. 2010.

Asserin, O. et al. “*Global sensitivity analysis in welding simulations - What are the material data you really need?*” Finite Elements in Analysis and Design 47, pp. 1004-1016. 2011.

Awang, M. “*The Effects of Process Parameters on Steel Welding Response in Curved Plates*”. Thesis Submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science in Mechanical Engineering. Morgantown, West Virginia 2002.

Farfán, N. A. “*Modelación del proceso de soldadura por medio del método de elementos finitos*”. Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico. Universidad de Chile. Santiago de Chile 2010.

Franco, R. et al. “*Procedimiento para Determinar los Campos de Temperaturas Producidos por el Proceso de Soldadura en Cordones Rectilíneos Mediante Simulación Numérica*”. Memoria Congreso CAIP'2013, Lima 2013.

Goldak, J. A., Akhlaghi, M. “*Computational Welding Mechanics*”. Springer Science+Business Media, Inc. New York, 2005.

Kamal, R. et al. “*Experimental and Finite Element Analysis of a T-Joint Welding*”. Journal of Mechanics Engineering and Automation 2, pp. 411-421. 2012.

Kelly, P. A. “*Solid Mechanics Part II: Engineering Solid Mechanics - small strain. Chap. 8 – Plasticity*”. Department of Engineering Science. University of Auckland. Last updated 2012. Resource: [http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/Part\\_II/](http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/Part_II/).

Lubliner, J. “*Plasticity Theory*”. Revised Edition (PDF). University of California at Berkeley. 2005.

Mahapatra, M. M. et al. “*Three-dimensional finite element analysis to predict the effects of SAW process parameters on temperature distribution and angular distortions in single-pass butt joints with top and bottom reinforcements*”. International Journal of Pressure Vessels and Piping 83, pp. 721–729. 2006.

Malik, A. M. et al. “*Analysis of circumferentially arc welded thin-walled cylinders to investigate the residual stress fields*”. Thin-Walled Structures, ELSEVIER, 2008.

Malik, A. M. et al. “*Numerical Simulation of Arc Welding Investigation of various Process and Heat Source Parameters*”. Failure of Engineering Materials & Structures, Code 30, 2007.

Manitaras, T. I. "*Elastoplastic Constitutive Models in Finite Element Analysis*". Master Thesis. National Technical University Athens. School of Civil Engineering. Institute of Structural Analysis & Seismic Research. Athens 2012.

Pozo, J. A. et al. "*Análisis térmico de soldadura GTAW sobre placa de acero AISI 316L empleando el método de elementos finitos*". Soldagem & Inspeção. São Paulo 2011.

Qi, H. J., "*Solid Mechanics I. Chap. 9 - Constitutive Equations - Plasticity*". Department of Mechanical Engineering. Univ. of Colorado. Resource: [http://www.colorado.edu/MCEN/MCEN5023/chap\\_01.pdf](http://www.colorado.edu/MCEN/MCEN5023/chap_01.pdf).

Qureshi, E. M. et al. "*Residual Stress Fields due to Varying Tack Welds Orientation in Circumferentially Welded Thin-Walled Cylinders*". Advances in Mechanical Engineering, 2009.