

## **MODELIZACION DE DOBLADO DE CHAPAS DE ACERO POR CALENTAMIENTO Y POSTERIOR ENFRIAMIENTO SUPERFICIAL**

**J. Fernández Bugna y G. Sánchez Sarmiento**

Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Av. Paseo Colón 850.  
Buenos Aires, Argentina (sanchezsarmiento@arnet.com.ar)

### **RESUMEN**

Se ha analizado por elementos finitos una técnica comúnmente de doblamiento suave de chapas, que consiste en el calentamiento brusco de una delgada franja sobre una de las superficies, seguida por un enfriamiento al aire o por agua sobre una o ambas superficies. Inicialmente por efecto de la dilatación térmica se produce un doblado con la superficie convexa coincidente con la que se le ha aplicado el flujo calórico, pero al enfriarse la chapa, por efecto de la plasticidad alcanzada en el calentamiento la chapa finalmente queda doblada en el sentido contrario, es decir que la superficie inicialmente calentada queda cóncava, lo cual es el efecto deseado.

Mediante ABAQUS/Standard se ha estudiado paraméricamente este problema, en función de varias variables: espesor de la chapa, tensión de fluencia del material dependiente de la temperatura, flujo calórico aplicado, duración del mismo, coeficiente de transferencia térmica del enfriamiento, etc. Se han obtenido resultados generales en forma de gráficos adimensionales, de utilidad para la comprensión y la aplicación práctica de esta técnica.

## 1. INTRODUCCIÓN

Para el doblado suave en varias etapas de chapas de acero, por ejemplo en la construcción de cascos de acero de embarcaciones, una técnica comúnmente empleada consiste en el calentamiento brusco de una delgada franja sobre una de las superficies, seguida por un enfriamiento al aire o por agua sobre una o ambas superficies.

Inicialmente por efecto de la dilatación térmica se produce un doblado con la superficie convexa coincidente con la que se le ha aplicado el flujo calórico, pero al enfriarse la chapa, por efecto de la plasticidad alcanzada en el calentamiento la chapa finalmente queda doblada en el sentido contrario, es decir que la superficie inicialmente calentada queda cóncava, lo cual es el efecto deseado.

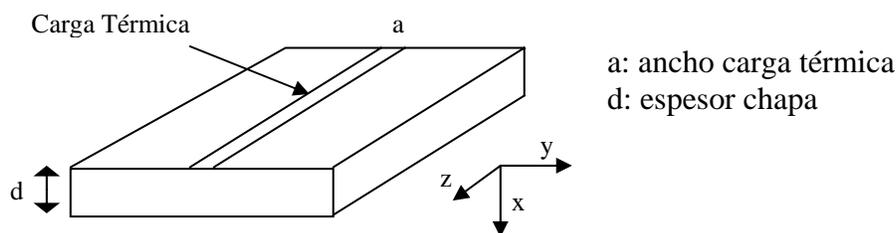
Para poder comprender y cuantificar el fenómeno se requiere estudiar la evolución de deformaciones plásticas. La magnitud y distribución de estas dependen de un gran número de variables como el espesor de la chapa, la temperatura y duración del flujo calórico, los coeficientes de transferencia térmica en las distintas caras de la chapa, etc. Además hay que considerar que estas variables dependen de la temperatura por lo tanto para poder abordar el problema es necesario realizar un estudio con elementos finitos teniendo en cuenta deformaciones elasto-plásticas acopladas a la temperatura.

Mediante ABAQUS/Standar 6.5.3 se ha estudiado paramétricamente el problema. Como resultado se generaron gráficos adimensionales generales, de utilidad para la comprensión y la aplicación práctica de esta técnica.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

### 2.1 Características del Modelo

El proceso de doblado lo podemos dividir en dos etapas. La primera consiste en la aplicación de la carga térmica donde los parámetros que se utilizaron fueron la temperatura y la duración de la misma. En la segunda etapa se toma como variable paramétrica la velocidad de enfriado a través de los coeficientes de transferencia térmica que actúan sobre las distintas superficies de la chapa. Como parámetros geométricos se consideraron el espesor de la chapa y el ancho de la franja térmica aplicada.



*Figura 1. Esquema del modelo*

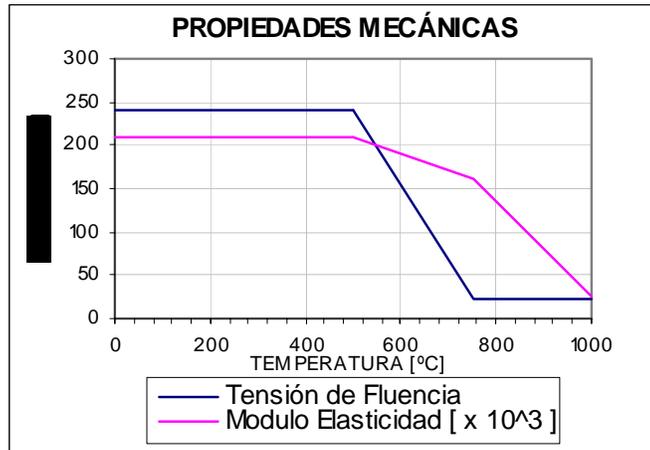


Figura 2. Propiedades mecánicas dependientes de la temperatura

Para el análisis se considera un acero con las propiedades mecánicas dependientes de la temperatura (Figura 2). En el caso de la tensión de fluencia se toma como parámetro la tensión nominal a temperatura ambiente ( $F_y$ ), considerada constante hasta los 500°C y con una disminución en forma lineal hasta llegar al 10% de su valor nominal a 750°C

## 2.2 Descripción del Fenómeno

En la primera etapa, cuando la carga térmica se aplica sobre una delgada franja en la cara superior se produce una dilatación en las fibras superiores que curva la chapa en forma convexa a la misma. Pero al tener una distribución no uniforme de la temperatura (ver Figura 3.a) – 3.f) ) producto de la carga lineal la dilatación de estas fibras se encuentra restringida, por lo que aparecen fuerzas de compresión que originan deformaciones plásticas de contracción.

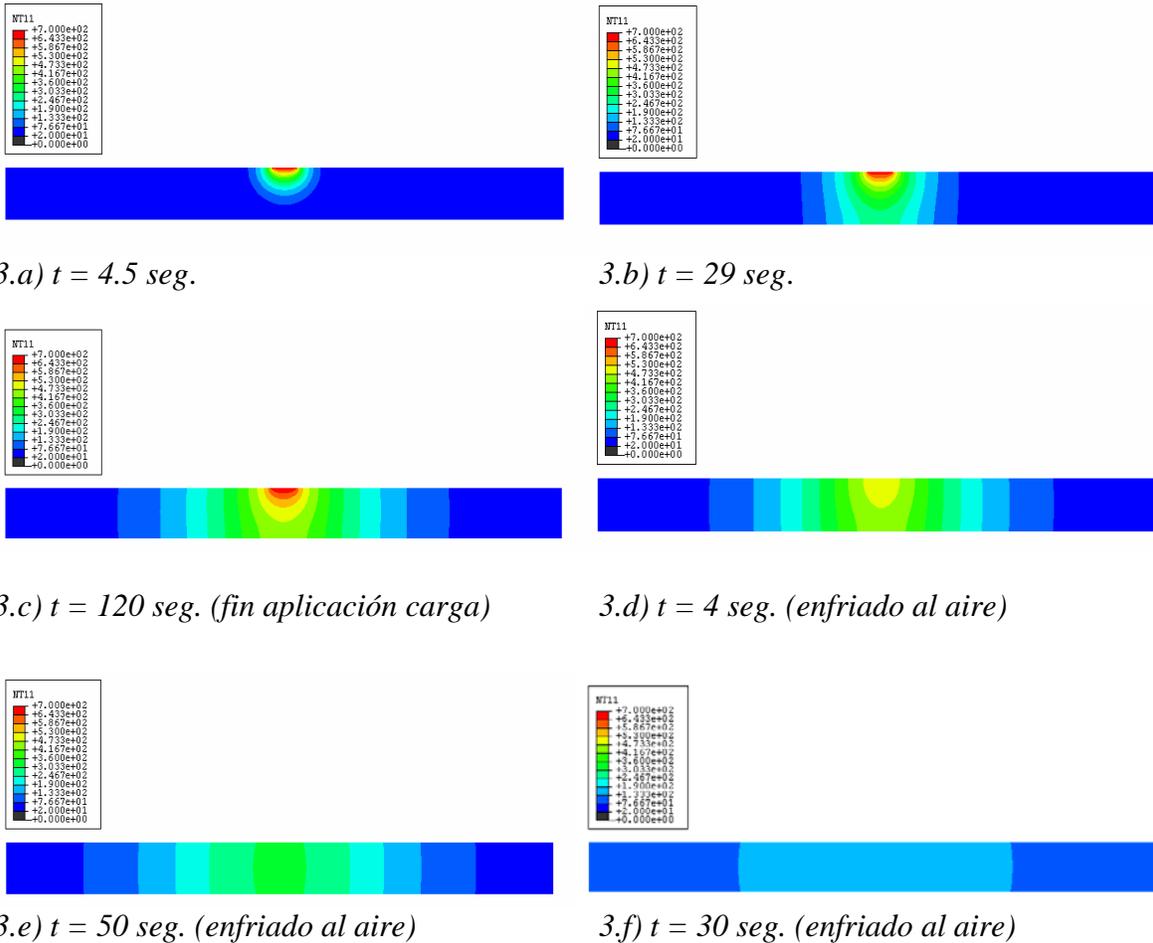


Figura 3. Diagrama de Temperatura

A su vez la dilatación de estas fibras produce tensiones de tracción en las zonas cercanas más frías generándose deformaciones plásticas de tracción

De este modo se obtienen un núcleo de deformaciones plásticas de contracción próximo a la aplicación de la carga térmica y una zona de deformaciones plásticas de tracción periférica al núcleo comprimido pero de mayor magnitud en la zona inferior debido a que el gradiente térmico es predominantemente vertical como se puede ver en la figura 4.

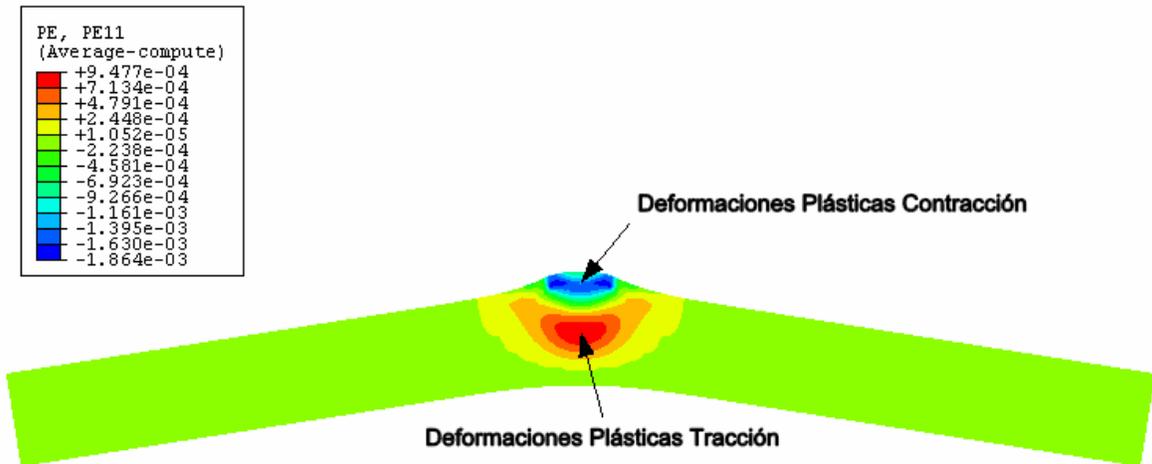


Figura 4. Diagrama de Deformaciones Plásticas Perpendicular a la dirección de la placa a los 5 seg. Factor de amplificación de deformaciones 50

A medida que la temperatura va avanzando a través del espesor las deformaciones plásticas de tracción van bajando hasta alcanzar el borde inferior cuando la distribución de temperatura se asemeja a la del régimen estacionario.

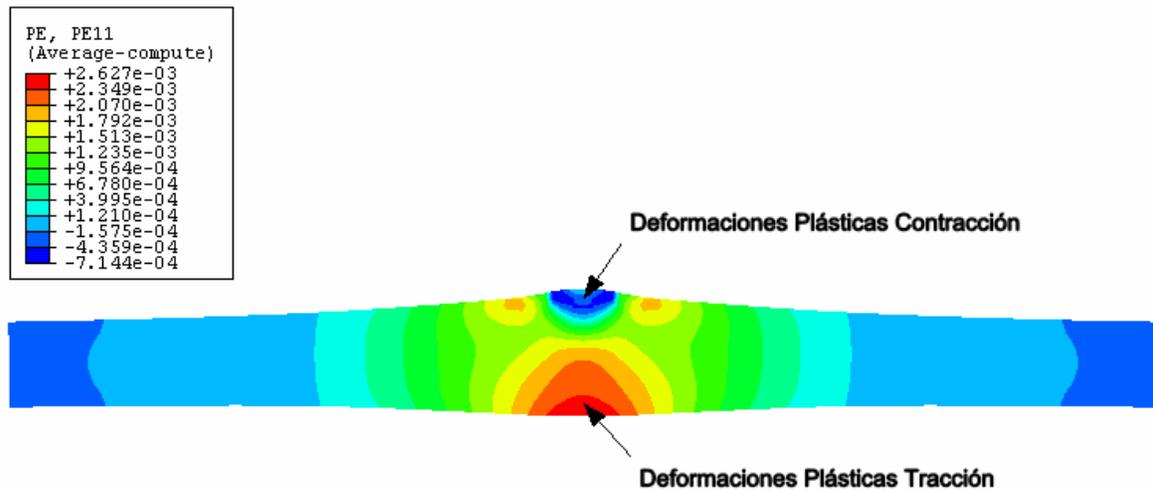


Figura 5. Diagrama de Deformaciones Plásticas Perpendicular a la dirección de la placa para  $t_c$ . Factor de amplificación de deformaciones 50.

Una vez transcurrido el tiempo de calentado  $t_c$  la chapa se deja enfriar por lo que desaparecen las dilataciones térmicas quedando solamente las deformaciones residuales de contracción en la zona superior y de tracción en la inferior quedando como resultado una curvatura cóncava de la chapa.

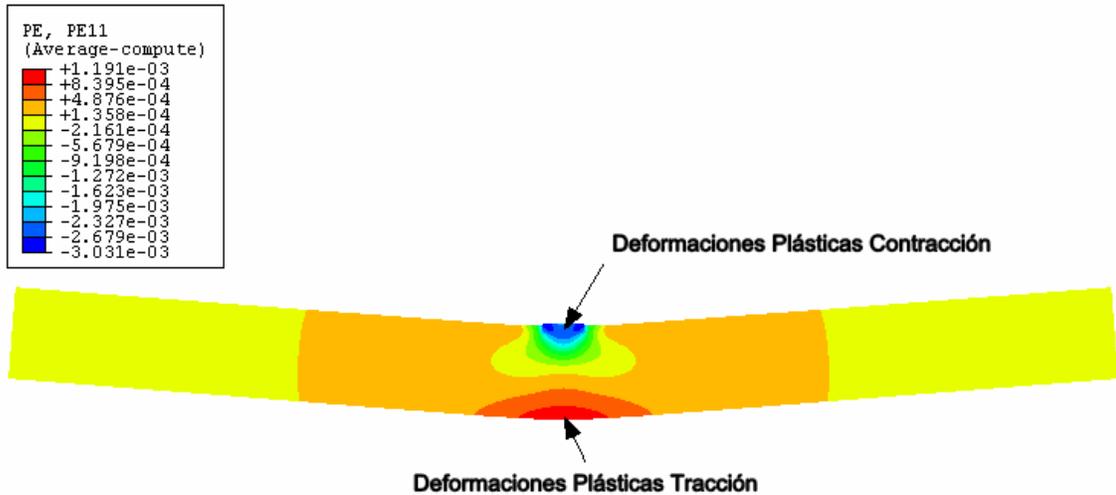


Figura 6. Diagrama de Deformaciones Plásticas Perpendicular a la dirección de la placa al final del proceso. Factor de amplificación de deformaciones 50

Si el enfriado de la chapa se produce en forma homogénea sobre la superficie inferior y superior dentro de un medio como puede ser el aire se observa que la distribución de deformaciones plásticas a lo largo del espesor para el instante  $t_c$  es similar a la distribución para distintos instantes del enfriado salvo una constante.

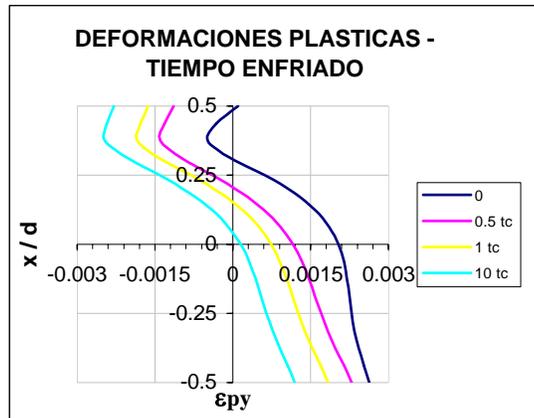


Figura 7. Diagrama de Deformaciones Plásticas ( $\epsilon_y$ ) en el centro de la placa a lo largo del espesor para distintos tiempos de enfriado.

Por lo tanto se puede admitir estudiar las deformaciones residuales a partir de las deformaciones plásticas alcanzadas durante la etapa de calentado.

2.3. Adimensionalización del problema de transferencia de calor

La ecuación de conducción de calor en medios homogéneos e isotrópicos la podemos escribir como:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = k\nabla^2 T \quad (1.1)$$

donde:

- $k$  es la conductividad térmica;
- $c$  es el calor específico; y
- $\rho$  es la densidad del material.

Las condiciones de contorno que rigen el proceso son:

- En la zona de la franja térmica:  $T = T_c$  para  $0 < t < t_c, x = -d/2$
- En el resto de la chapa:  $T = T_0$  para  $t = 0$  (1.2)
- En las superficies superior e inferior:  $\frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_0), 0 < t, x = -d/2, x = d/2$

donde:

- $T_0$  es la temperatura de la chapa en el instante inicial.
- $T_c$  es la temperatura de la carga.
- $d$  es el espesor de la chapa.
- $t_c$  es la duración de la carga.
- $h$  es el coeficiente transferencia térmica.

Utilizando las siguientes variables adimensionales:

Temperatura:  $\theta = \frac{T - T_0}{T_c - T_0}$  (a)

Tiempo:  $\tau = t \frac{k}{c\rho d^2}$  (b)

Coordenadas espaciales:  $\xi = \frac{x}{d}, \eta = \frac{y}{a}$  (c)

Coefficiente de transferencia térmica:  $Bi = \frac{hd}{k}$  (d)

podemos re-escribir la ecuación de transferencia de calor de la siguiente manera:

$$\boxed{\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \nabla^2 \theta} \quad (2.1)$$

y las condiciones de contorno como:

- En la zona de la franja térmica tenemos:  $\Theta = 1$  para  $0 < \tau < \tau_c$ ,  $\xi = -1/2$
- En el resto de la chapa:  $\Theta = 0$  para  $\tau = 0$  (2.2)
- En las superficies superior e inferior:  $\frac{\partial \theta}{\partial \xi} = Bi\theta(T_c - T_0)$  para  $0 < \tau$ ,  $\xi = -1/2$  y  $\xi = 1/2$

#### 2.4 Relaciones Temperatura – Deformaciones

Cuando se introduce un campo térmico dentro de la chapa se producen deformaciones térmicas dadas por:

$$\varepsilon^T = \lambda \Delta T \quad (3.1)$$

Estas deformaciones se pueden anular imponiendo en cada punto una tensión equivalente a:

$$\sigma_1 = -\lambda E \Delta T \quad (3.2)$$

pero estas tensiones originan como resultado fuerzas en los bordes libres por lo tanto para reestablecer el equilibrio debemos colocar una fuerza y un momento equivalente que actúen sobre los bordes y generan una tensión  $\sigma_2$  en el resto de la chapa

$$\sigma_2 = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \lambda \Delta T dx + \frac{12x}{d^3} \int_{-d/2}^{d/2} x \lambda \Delta T dx \quad (3.3)$$

Por lo tanto la deformación elástica en la dirección y en cada punto de la chapa la podemos expresar como:

$$\varepsilon_y = -\lambda \Delta T + \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \lambda \Delta T dx + \frac{12x}{d^3} \int_{-d/2}^{d/2} x \lambda \Delta T dx \quad (4)$$

Según la ecuación (2.1) y el término (a) podemos expresar la temperatura para un determinado punto e instante como:

$$\Delta T = T - T_0 = \theta (T_c - T_0) = \theta \Delta T_c \quad (5)$$

considerando que  $\xi = \frac{x}{d}$ , reemplazamos (5) en (4) y obtenemos:

$$\varepsilon_y = \Delta T_c \lambda \left[ -\theta + \int_{-1/2}^{1/2} \theta d\xi + 12\xi \int_{-1/2}^{1/2} \xi \theta d\xi \right] \quad (6)$$

De esta forma podemos determinar las deformaciones elásticas originadas por la carga térmica a partir de la función  $\theta$  que no depende de ningún parámetro del modelo.

Por último podemos calcular las deformaciones plásticas como:

$$\varepsilon_y^p = \varepsilon_y - \frac{\sigma_f}{E} \quad (7)$$

donde  $\sigma_f$  lo podemos definir como una función que depende de la tensión nominal de fluencia ( $F_y$ ) y de una función adimensional que vale  $\varepsilon_y$  para aquellos puntos donde no se sobrepasa el límite de fluencia de manera de no tener deformaciones plásticas en estos puntos

$$\sigma_f = F_y \Phi_f \quad (8)$$

El ángulo de doblado final se obtiene integrando las deformaciones residuales sobre la sección de la chapa:

$$\alpha = \frac{1}{I} \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-d/2}^{d/2} x \varepsilon_y^p dx dy, \quad (9)$$

donde  $I = \frac{d^3}{12}$ .

Como vimos anteriormente, podemos establecer que la distribución de las deformaciones residuales al final del proceso es similar a la de las deformaciones plásticas al finalizar el proceso de calentado salvo una deformación constante a lo largo del espesor que no origina curvatura. Por lo tanto para calcular el ángulo de doblado podemos utilizar las deformaciones plásticas de la etapa de calentado, es decir, considera  $\theta$  en el instante  $\tau_c$  ( $\theta_{\tau=\tau_c}$ )

Reemplazando en (9) a (7), llegamos a

$$\alpha = \lambda \frac{a}{d} \left[ \Delta T_c \left( 12 \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \xi (-\theta + \int_{-1/2}^{1/2} \theta d\xi + 12\xi \int_{-1/2}^{1/2} \xi \theta d\xi) d\xi d\eta \right) - \frac{F_y}{\lambda E} \left( 12 \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \xi \Phi_f d\xi d\eta \right) \right] \quad (10)$$

Los dos términos de esta ecuación están constituidos por el producto de los parámetros del modelo multiplicados por factores que dependen de  $\theta$  y de  $\Phi_f$ .

De este modo se puede definir los siguientes factores adimensionales:

$$\begin{aligned}
 k_T &= 12 \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \xi \left( -\theta + \int_{-1/2}^{1/2} \theta d\xi + 12\xi \int_{-1/2}^{1/2} \xi \theta d\xi \right) d\xi d\eta \\
 k_f^* &= 12 \int_{-1/2}^{1/2} \int_{-1/2}^{1/2} \xi \Phi_f d\xi d\eta \\
 k_f &= \frac{k_f^*}{k_T}
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Lo que permite expresar el ángulo de doblado como:

$$\alpha = \lambda \frac{a}{d} k_T \left[ \Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E} \right]
 \tag{12}$$

### 3. ESTUDIO PARAMETRICO

#### 3.1. Temperatura – Tensión de Fluencia

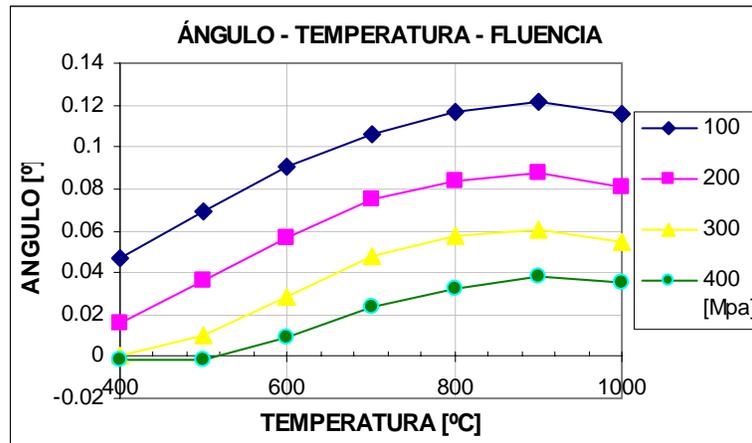


Figura 8. Ángulo de doblado en función de la temperatura para distintas tensiones de fluencia

Del análisis se observó que para una determinada tensión de fluencia del material existe una temperatura mínima por debajo de la cual la carga térmica no es lo suficientemente intensa como para producir deformaciones plásticas residuales significativas por lo tanto no se logra un doblado final de la chapa. Para tensiones de fluencia mayores este valor mínimo aumenta.

Una vez superada esta temperatura el ángulo de doblado crece en forma lineal con la temperatura. La pendiente de esta recta es similar para distintas tensiones de fluencia.

Esto concuerda con la ecuación (12) donde el doblado resulta proporcional al término

$$T_{equi} = \left[ \Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E} \right] \quad (13)$$

que definimos como *temperatura equivalente*.

El ángulo en función de la temperatura alcanza un máximo para un determinado valor a partir del cual disminuye levemente. Del gráfico se puede apreciar que a partir  $T_c = 800^\circ C$  el ángulo de doblado va disminuyendo su pendiente en función de la temperatura. Este valor de  $T_c$  se debe a los cambios que se consideraron en la curva de  $E$  y  $F_y$  en función de  $T$  adoptada para el modelo.

A partir de los resultados obtenidos con ABAQUS se calcularon los factores adimensionales  $k_T$  y  $k_f$ :

$$\begin{aligned} k_T &= 58.77 \\ k_f &= 3.47 \end{aligned} \quad (14)$$

y obtenemos la ecuación del ángulo de doblado:

$$\alpha = \lambda \frac{a}{d} k_T \left[ \Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E} \right], \quad (15)$$

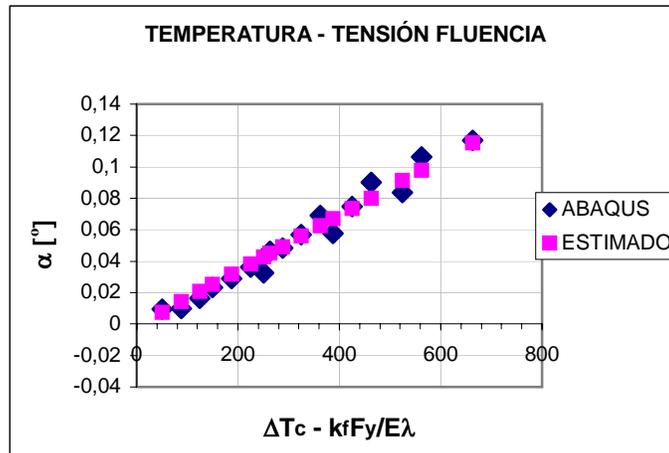


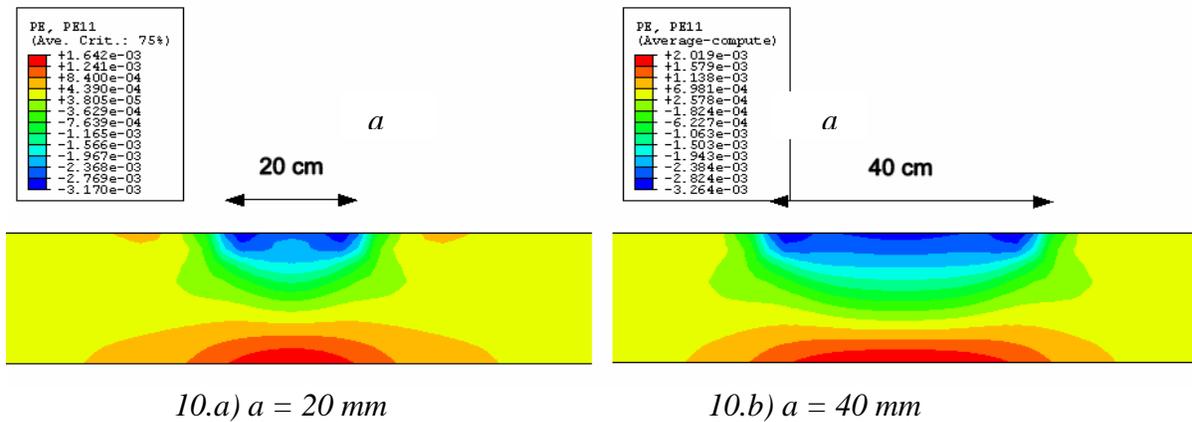
Figura 9. Ángulo de doblado en función de la temperatura equivalente

El rango de validez de esta recta tiene como límite inferior los valores donde la recta arroja resultados positivos, ya que los negativos corresponden a cargas que no llegan a originar deformaciones plásticas y por ende un doblado final. Como límite superior la  $T_c$  a partir de la cual se pierde la linealidad.

### 3.2 Espesor – Ancho de la Carga Térmica

De la ecuación (12) se desprende que el doblado es proporcional al factor geométrico  $a/d$ .

Los resultados que se obtuvieron nos permiten validar esta afirmación. En la Figura 10 se puede apreciar como la extensión de las deformaciones plásticas más intensas coincide con el ancho  $a$  de la franja térmica.



10.a)  $a = 20 \text{ mm}$                       10.b)  $a = 40 \text{ mm}$   
 Figura 10. Deformaciones Plásticas en dirección y al final del proceso para distintos anchos de la franja térmica

Para un determinado valor de la *temperatura equivalente* se analizó distintas relaciones de  $a/d$  y los resultados se compararon con la ecuación (12).

$$\alpha = \lambda \frac{a}{d} k_T \left[ \Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E} \right]$$

Valores utilizados:

$$\left[ \Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E} \right] = 542.3^\circ \text{C} , \quad \lambda = 1.2 \cdot 10^{-5} \text{ } 1/^\circ \text{C}$$

Reemplazando los valores obtenemos la recta estimada:

$$\alpha = 0.382 \frac{a}{d} \quad [^\circ]$$

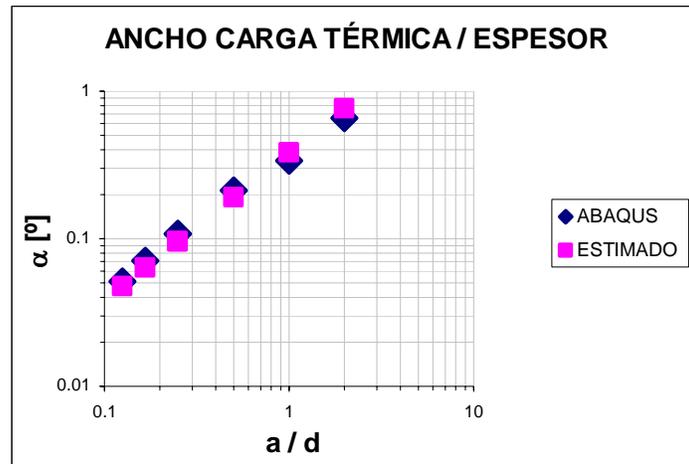


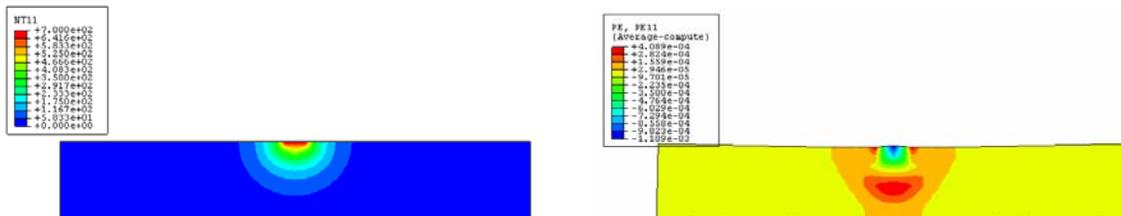
Figura 11. Angulo de doblado en función de la relación  $a/d$  (escala logarítmica)

En el gráfico se puede ver la similitud entre la recta estimada y los valores calculados con ABAQUS para distintas relaciones de  $a/d$ .

### 3.3 Duración de la Carga Térmica

En las figuras 12 se muestra la distribución de temperatura en el instante  $t_c$  (fin de aplicación de la carga) y las deformaciones residuales en la dirección y luego del enfriado de la chapa para distintos valores de  $t_c$ . Se puede ver la influencia que tiene la duración de la carga sobre el doblado final de la chapa, para aplicaciones breves el núcleo de deformaciones plásticas de tracción no logra descender hasta la cara inferior de la chapa ni tampoco expandirse en el ancho obteniendo un doblado final menor que para valores de  $t_c$  mayores.

Duración de la carga térmica:  $\tau_c = 0.1$



Duración de la carga térmica:  $\tau_c = 0.3$

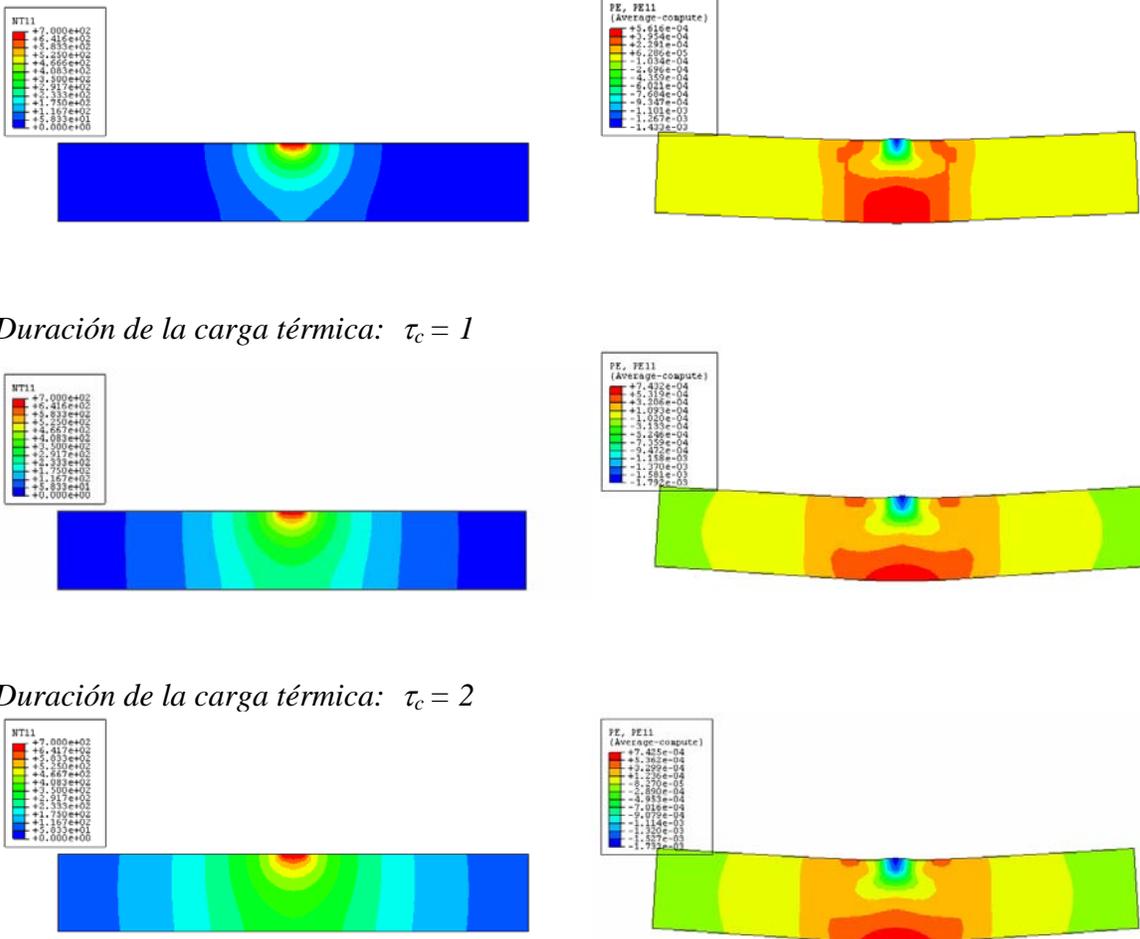


Figura12. Diagrama de Temperatura en  $\tau = \tau_c$ .  
Deformaciones residuales en y al final del proceso ( $\tau = \tau_\infty$ )

Por lo tanto a medida que aumenta  $t_c$  la temperatura alcanza valores considerables en la zona inferior originando la concentración de las deformaciones plásticas de tracción en esta zona.

Si se sigue aumentando  $t_c$  la distribución de la temperatura en la chapa se asimila a la del estacionario por lo que no se producen mayores modificaciones en el doblado final de la chapa.

Teniendo en cuenta las variables adimensionales correspondientes a la temperatura, tiempo y posición podemos graficar la distribución de temperaturas en el espesor a lo largo del tiempo.

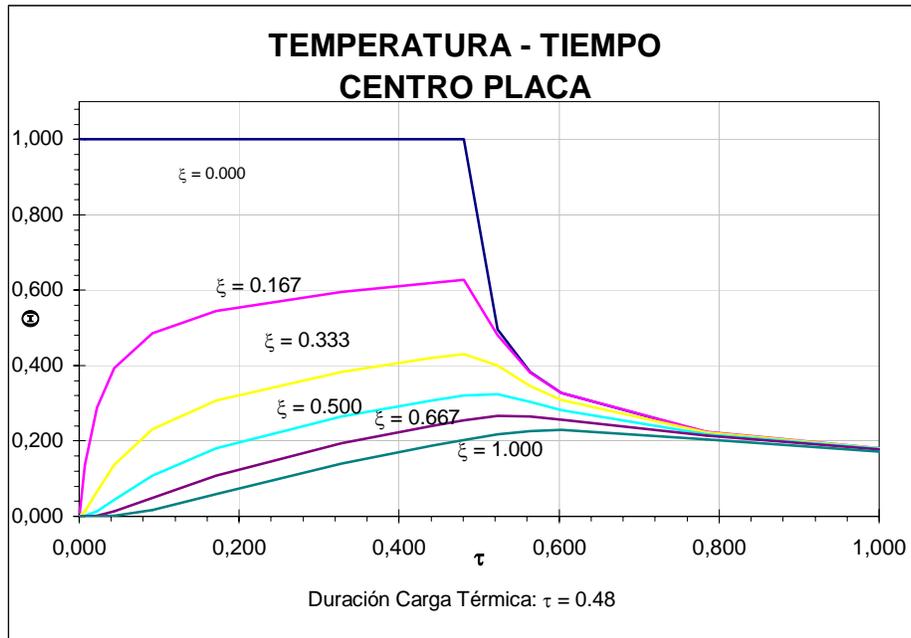


Figura 13. Diagrama de Temperatura en función del tiempo para distintos puntos a lo largo del espesor central de la chapa

Si el tiempo de aplicación de la carga fuera infinito obtendríamos la distribución de temperatura estacionaria. Pero dada la alta conductividad del acero en pocos minutos se obtiene una distribución muy similar a esta. Por lo tanto la curva de ángulo de doblado en función del tiempo resulta asintótica.

Para intervalos breves de duración de la carga podemos expresar el doblado como una fracción  $k_t$  de  $\alpha$  correspondiente a  $\tau_c = \infty$

$$\alpha = k_t \left[ \lambda \frac{a}{d} k_T (\Delta T_c - k_f \frac{F_y}{\lambda E}) \right] \quad (16)$$

Con los valores obtenidos del análisis por elementos finitos, y teniendo en cuenta las adimensionalizaciones correspondientes determinamos la curva  $k_t$  en función del tiempo de duración de la carga ( $\tau_c$ ) (ver Figura 14).

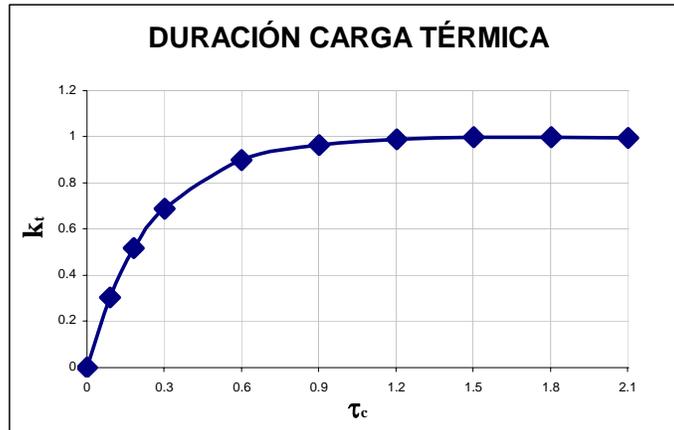


Figura14. Factor  $k_t$  en función de la duración de la carga térmica ( $\tau_c$ )

En el gráfico se puede ver la forma asintótica de la curva. Para  $\tau_c = 1.5$  obtenemos  $k_t = 0.998$  lo que permite considerarlo como  $\tau_c = \infty$

### 3.4 Velocidad de enfriado

En las Figuras 15a – 15f se compara la evolución de la temperatura en la chapa para un mismo proceso de calentamiento pero distinto enfriado. Las figuras de la izquierda corresponden al caso 1, enfriado homogéneo en las dos caras con  $hd/k = 0.066$  mientras que las de la derecha corresponden al caso 2, donde el enfriado se produce con  $hd/k = 33.33$  sobre la cara inferior.

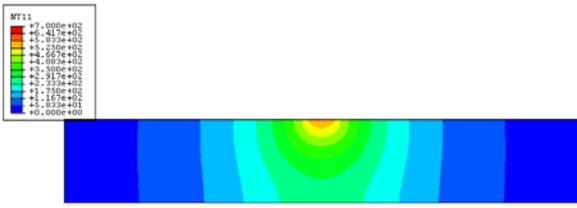
La figura 15g y 15h muestra las deformaciones residuales en la dirección y para los dos casos.

En el caso 1 las deformaciones plásticas son de contracción en la zona superior mientras que en la zona central e inferior son de tracción pero de mayor magnitud en el borde.

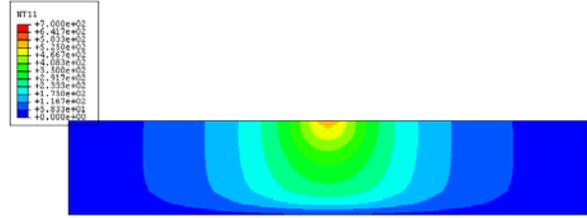
En el caso 2 las deformaciones de contracción en la parte superior son de valores similares a las del caso 1 pero la diferencia en el ángulo de doblado final se debe a las diferencias de deformaciones en el centro y en el borde de abajo de la chapa.

Esta diferencia se puede explicar a partir de la evolución de la temperatura durante el enfriado. En el caso 2 debido al gran valor de  $h$  que actúa en la cara inferior se produce un rápido enfriamiento de esta superficie por lo que se origina una marcada diferencia de temperatura en esta zona. Esto provoca que las fibras centrales a mayor temperatura que las inferiores no puedan expandirse libremente por lo tanto se genera una compresión en el centro y una tracción en el borde inferior mientras que el borde superior no sufre grandes modificaciones ya que la temperatura es mucho más uniforme.

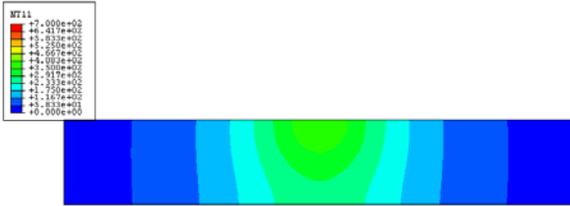
Si superponemos las deformaciones plásticas originadas en la etapa de calentamiento con las producidas durante el enfriamiento obtenemos una distribución como muestra la



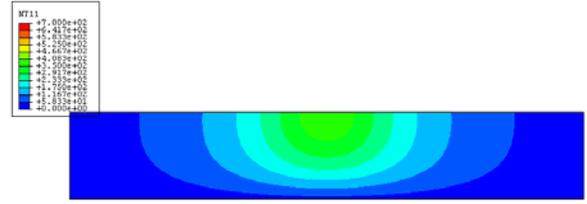
15.a) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.01$ ,  
 $hd / k = 0.066$  (superior-inferior)



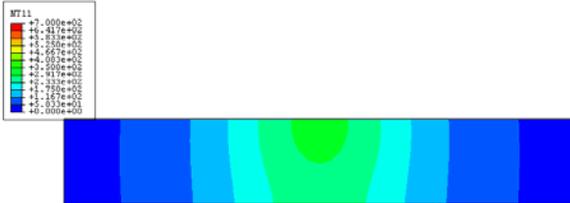
15.b) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.01$ ,  
 $hd / k = 33.33$  (inferior)



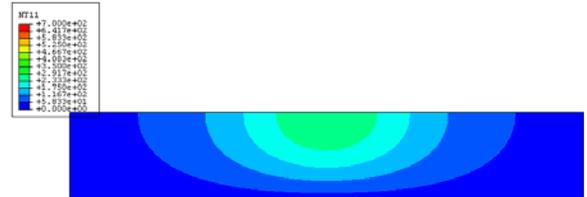
15.c) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.06$ ,  
 $hd / k = 0.066$  (superior-inferior)



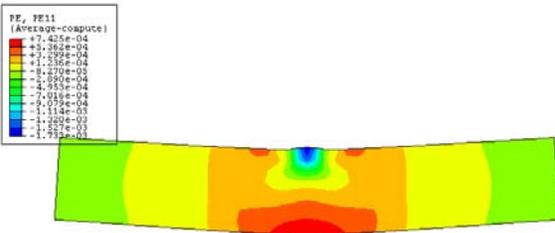
15.d) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.06$ ,  
 $hd / k = 33.33$  (inferior)



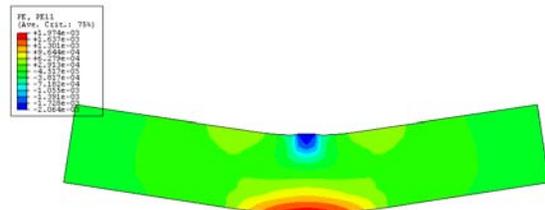
15.e) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.15$ ,  
 $hd / k = 0.066$  (superior-inferior)



15.f) Temperatura  $\tau = \tau_c + 0.15$ ,  
 $hd / k = 33.33$  (inferior)



15.g) Deform. Plásticas ( $\varepsilon^p_y$ )  $\tau = \tau_\infty$ ,  
 $hd / k = 0.066$  (superior-inferior).  
Factor amplificación deform. 50.



15.h) Deform. Plásticas ( $\varepsilon^p_y$ )  $\tau = \tau_\infty$ ,  
 $hd / k = 33.33$  (inferior).  
Factor amplificación deform. 50.

Figura15. Diagrama de Temperatura en distintos instantes del enfriado. Deformaciones residuales en y al final del proceso ( $\tau = \tau_\infty$ )

figura 15h) donde las deformaciones de contracción superiores son similares al caso 1, en el centro de la chapa no hay deformaciones plásticas mientras que en el borde inferior las deformaciones de tracciones son 10 veces mayores.

Si el enfriado se produce en forma inversa, es decir con un gran valor de  $h$  en la cara superior se generaría el efecto contrario, tracción arriba y compresión en el centro obteniendo como resultado final una disminución del doblado e incluso cambiando de sentido.

Considerando distintos valores de  $hd / k$  actuando en las cara superior, inferior y simultáneamente se obtuvieron la curva de  $k_h$ .

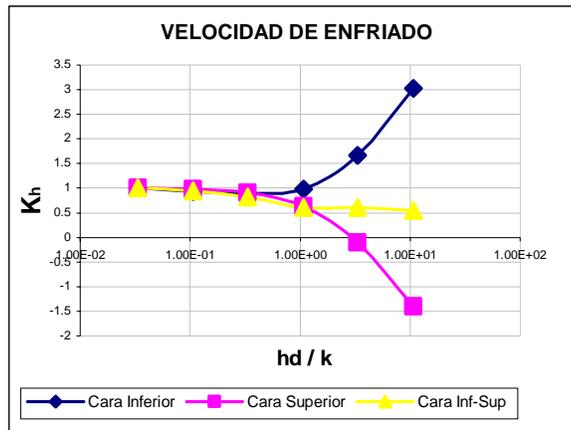


Figura16. Factor  $k_h$  para las distintas caras en función  $hd / k$

El ángulo de doblado final se puede calcular a través de la expresión:

$$\alpha = k_h \left[ \lambda \frac{a}{d} k_T (\Delta T_c - k_{F_y} \frac{F_y}{\lambda E}) \right] \quad (17)$$

#### 4. CONCLUSIONES

De la teoría de la elasticidad se puede inducir las tensiones originadas por la acción térmica y por ende las deformaciones plásticas residuales. Para ello es necesario conocer la distribución de temperatura en la chapa, su evolución a lo largo del tiempo y tener en cuenta la plasticidad del material. A través de un análisis de elementos finitos considerando deformaciones elasto-plásticas acopladas a la temperatura podemos determinar constantes de ajustes para la teoría que contemplen las diversas variables.

Si suponemos:

- que el calentamiento dura un tiempo prolongado:  $\tau_c > 1.5$  .

- que la chapa se deja enfriar al aire  $\frac{kd}{h} \cong 0.05$ ,

podemos determinar las deformaciones residuales a partir de las deformaciones plásticas en el instante  $t = t_c$  y con estas calcular el doblado de la chapa,

$$\alpha_0 = \lambda \frac{a}{d} k_T (\Delta T_c - k_{F_y} \frac{F_y}{\lambda E})$$

donde  $k_T$  y  $k_{F_y}$  fueron calculados a partir de los resultados obtenidos con ABAQUS.

$$k_T = 58.77$$

$$k_{F_y} = 3.47$$

Para tener en cuenta distintos coeficientes de transferencia térmica sobre la superficie inferior y superior y menores tiempos de aplicación de la carga corregimos a  $\alpha_0$  con  $k_h$  y  $k_t$  respectivamente

$$\alpha = k_h k_t \alpha_0$$

$$\alpha = k_h k_t k_T \lambda \frac{a}{d} (\Delta T_c - k_{F_y} \frac{F_y}{\lambda E})$$

donde  $k_h$  y  $k_t$  son factores adimensionales

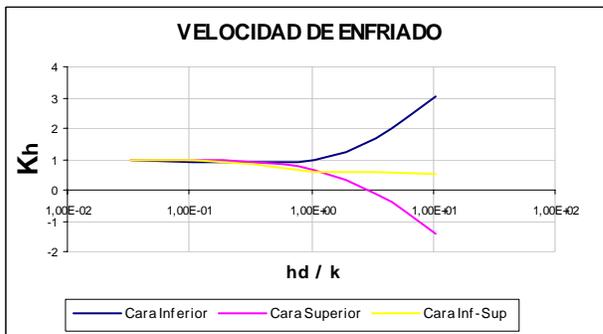


Figura 17

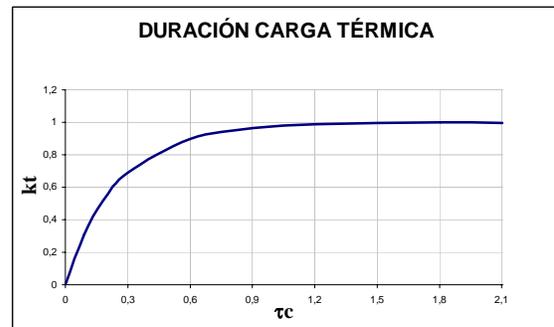


Figura 18.

### Referencias.

- G. Sánchez Sarmiento, *Elementos de Transferencia de Calor. Notas para el curso de "Modelización de Procesos Industriales"*, Facultad Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, Abril 2004.

2. Yu Luo, Morinobu Ishiyama, Hidekazu Murakawa, *Wlding Deformation of Plates with Longitudinal Curvature*, 1999.
3. S. Timoshenko, J.N. Goodier, *Theory of Elasticity*, McGraw-Hill, 1951.