

NUMERICAL MODELLING OF MECHANICAL CONTACT AND STRESS DISTRIBUTION IN SPOT WELDING FOR SIMILAR THICKNESS METAL PLATES

Meseguer-Valdenebro, J. L.¹; Franco Chumillas, Patricio²; Serna Serrano, José¹;
Sánchez Lozano, Juan Miguel¹

¹ Centro Universitario de la Defensa. San Javier, ² Universidad Politécnica de Cartagena

This paper shows research work which is considered in the context of joint technologies, in particular with resistance spot welding (RSW).

The welding process by electrical resistance is formed by different necessary steps in order to get a joint among two plates by electrodes. This paper is focused on the first step of the welding process, that is, in the mechanical contact prior to heating of plate by the Joule effect. In this first step several geometrical factors are studied, like the diameter of the electrode, the thickness of the plate, the applied pressure and radius wear on the electrode tip. These variables characterize the mechanical contact by the stress distribution between plate and electrode.

In next papers, we will carried out with the process analysis, performing a study of transient state welding process with different roughness of plate and its influence on forge process.

Keywords: *Spot welding; Mechanical contact; Joining methods; Stress distribution; Finite element methods*

MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL CONTACTO MECÁNICO Y DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN SOLDADURA POR PUNTOS PARA CHAPAS DE METAL CON ESPESORES SIMILARES

Este artículo presenta un trabajo de investigación que está contemplado en el ámbito de las tecnologías de unión, en particular con la resistencia eléctrica por puntos (RSW).

El proceso de unión por resistencia eléctrica está compuesto por diferentes etapas que son necesarias para poder obtener una unión entre dos chapas mediante electrodos. Este artículo se centra en la primera etapa del proceso, es decir en el contacto mecánico previo al calentamiento de la chapa por efecto Joule. En esta primera etapa se estudian diferentes factores geométricos como el diámetro del electrodo, espesor de la chapa, presión aplicada y radio de desgaste en el extremo del electrodo. Estas variables caracterizan el contacto mecánico mediante la distribución de tensiones entre chapa y electrodo.

En posteriores artículos se continuará con el análisis del proceso realizando un estudio sobre proceso de soldeo en régimen transitorio para diferentes rugosidades de la chapa y su influencia en el proceso de forja.

Palabras clave: *Soldadura por puntos; Contacto mecánico; Métodos de unión; Distribución de tensiones; Elementos finitos*

Correspondencia: Centro Universitario de la Defensa. c/Coronel López Peña, s/n. C.P. 30720. Santiago de la Ribera (Murcia)

1. Introducción

Los procesos de fabricación mediante la técnica de soldadura por puntos, “Resistance Spot Welding” (RSW) en lengua anglosajona, han sido empleados extensamente en el sector de la automoción por su rapidez y versatilidad en el proceso productivo (Ambroziak & Korzeniowski, 2010; H. Zhang & Senkara, 2011). También se pueden encontrar ejemplos de aplicaciones en el sector aeronáutico, como la variante de esta técnica desarrollada por General Electric en la cual se controla el desplazamiento de los electrodos con gran precisión, aumentando la calidad del proceso (Mendez & Eagar, 2001).

El amplio uso de esta técnica hace aconsejable realizar estudios para comprender y optimizar los fenómenos que ocurren, con la finalidad de optimizar el proceso y reducir los costes asociados al mismo. En particular, la reducción del desgaste sufrido por los electrodos de soldadura permite mejorar la calidad de las uniones y aumentar el rendimiento de la producción. Para analizar el efecto del referido desgaste, este artículo hace uso de herramientas de simulación numérica para estudiar la influencia de los diferentes parámetros de soldeo mediante RSW (Li, 2004). El estudio paramétrico realizado permite determinar las tensiones máximas en las zonas de contacto entre electrodos y chapas, un parámetro relacionado con el desgaste de dos piezas que se encuentran en estrecho contacto y que se ven deformadas a consecuencia de la presión aplicada por los electrodos, al tiempo que circula una corriente eléctrica entre los mismos (Zhang, Chen & Zhang, 2008).

El desgaste en los electrodos tiene varias causas. La principal causa está asociada a los ciclos térmicos que sufre el material, esto implica una dilatación y contracción continua del mismo, que deviene en el desgaste de la zona de contacto entre electrodo y chapa (Parker, Williams & Holliday, 1998). La segunda causa está relacionada con la desalineación entre chapa y electrodo, lo que implica que las condiciones de contacto entre ambos no sean óptimas. Este hecho se debe a una inadecuada aplicación de la fuerza entre chapa y electrodo (Tang et al, 2000).

Las simulaciones numéricas de este artículo pretenden aumentar el conocimiento sobre el desgaste que sufren los electrodos en el proceso de soldeo y como afecta este desgaste al comportamiento mecánico de la unión entre chapa y electrodo. En particular, de las diferentes fases que aparecen en el proceso RSW, este trabajo se centra en la fase de sujeción del electrodo, también conocida como ‘squeeze’ (Zhang & Senkara, 2011), una fase de vital importancia, pues garantizará la inexistencia de desalineaciones en la fase de soldeo

2. Modelado del problema

El contacto mecánico electrodo – chapa se estudia mediante un modelo simplificado. Una primera simplificación permite reducir la configuración real, constituida por dos chapas y dos electrodos según se muestra en la figura 1, por el contacto mecánico de una chapa con un electrodo, haciendo uso de una condición de simetría en el plano de contacto de las chapas. Adicionalmente, se hace uso de la simetría circunferencial del problema con el fin de reducir el coste computacional de cálculo.

En la figura 1, se muestran los ejes de simetría que son el eje 'X' en la dirección radial y contenido en el plano de contacto chapa-electrodo, y el eje 'Y' en la dirección del eje del electrodo. Este modelo axil-simétrico se muestra con más detalle en la figura 2a, presentando las condiciones de simetría, de contorno y de aplicación de la carga. Las chapas consideradas en este estudio tienen una longitud de 6 mm y un espesor comprendido entre 0.5 y 3 mm. El electrodo tiene un radio en la zona de contacto entre 1 y 3.5 mm, altura de 50 mm y un ángulo de 45° entre la superficie de contacto y el cuerpo del electrodo, lo que le confiere una geometría tronco-cónica. Para el contacto del electrodo

con la chapa se considera un radio de acuerdo que toma valores comprendidos entre 0.1 y 1 mm según el desgaste del electrodo, el detalle de este contacto se muestra en la figura 2b.

Figura 1. Esquema electrodo-chapa. Modelo completo de la configuración real

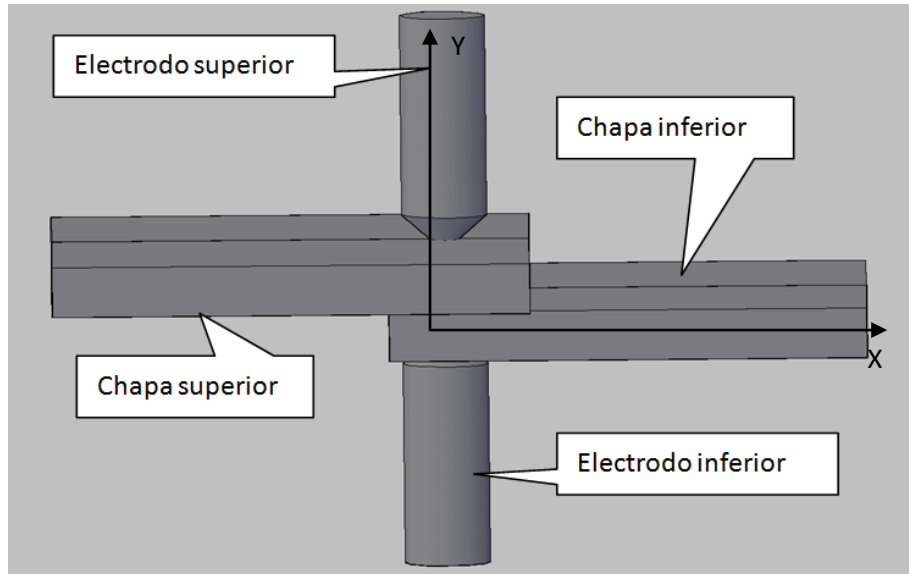


Figura 2a. Esquema electrodo-chapa. Modelo axil simétrico. Geometría y nomenclatura

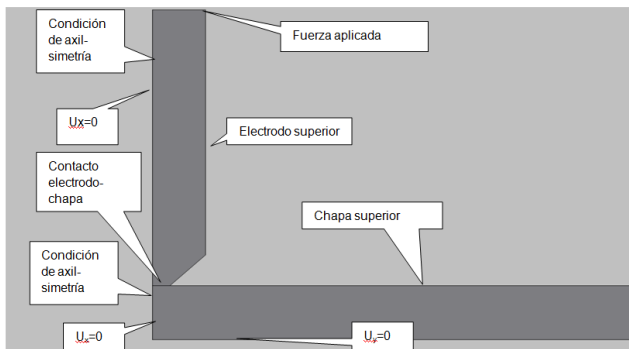
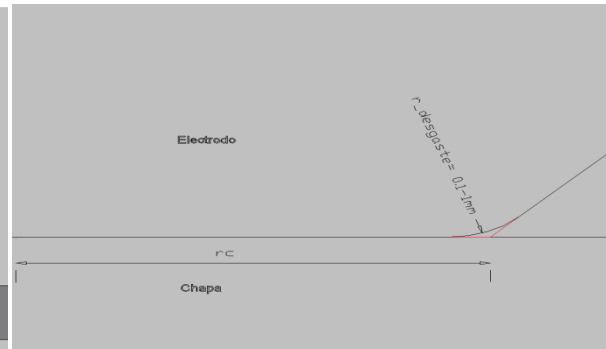


Figura 2b. Detalle del radio de acuerdo del electrodo



Para las condiciones cinemáticas del problema, la parte inferior de la chapa tiene restringido el desplazamiento en la dirección del electrodo, ($U_y=0$ en la figura 2a). Por simetría, los desplazamientos según la dirección radial del eje del electrodo también son nulos ($U_x=0$). La fuerza F que el electrodo ejerce en el contacto chapa-electrodo mostrado en la figura 2a, se calcula como $F = \sigma_y \pi r_c^2$, siendo σ_y es el valor de la presión aplicada al electrodo, que para este estudio toma un valor constante de 0.35MPa, y siendo r_c el radio del electrodo en la zona de contacto.

El programa de cálculo utilizado para resolver el contacto mecánico entre chapa y electrodo ha sido ANSYS R14 (Madenci & Guven, 2007). ANSYS es un código comercial para el cálculo de medios continuos mediante elementos finitos. Los elementos que se han utilizado para resolver el contacto mecánico entre chapa y electrodo presentan grados de libertad en los desplazamientos y en los giros, con un tamaño de elemento de 0.1 mm, lo que asegura una buena precisión en los resultados en base a un análisis de sensibilidad de malla realizado. Para las propiedades mecánicas del electrodo y de la chapa, se han seleccionado los siguientes valores:

El electrodo es de latón, con un límite elástico de 104GPa y un coeficiente de Poisson de 0.318.

La chapa es de acero inoxidable AISI 304, con un límite elástico de 2 GPa y un coeficiente de Poisson de 0.29.

Para el postproceso de los datos y la generación de las figuras mostradas en los epígrafes siguientes se ha empleado el software Matlab R2010.

3. Resultados

En este epígrafe se estudia el efecto que tiene el radio del electrodo, el espesor de la chapa, y el radio de desgaste en las distribuciones de tensiones, en particular en la zona de unión entre chapa y electrodo, a partir de las simulaciones numéricas realizadas. Se concluye el epígrafe proponiendo un modelo para la dependencia de la tensión máxima con las variables anteriores.

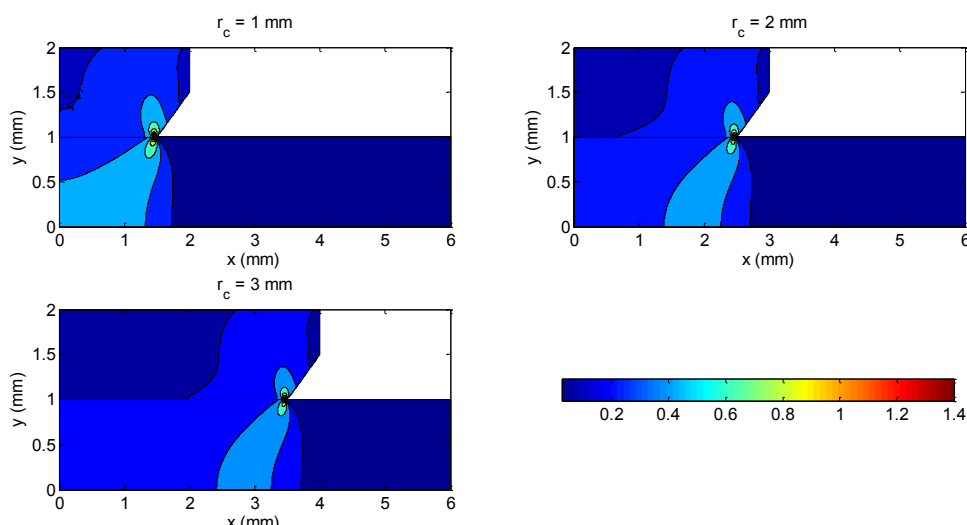
Entre los diversos efectos analizados es de destacar que, la tensión máxima en la zona de unión está estrechamente relacionada con el desgaste del electrodo. Esta relación se manifiesta de forma que, tanto en la superficie de la chapa en contacto con el electrodo como en la zona del electrodo en contacto con la chapa, las tensiones medias equivalentes aumentan conforme aumenta el radio de desgaste del electrodo. Este aumento del radio de desgaste supone una disminución de la sección de contacto del electrodo con la chapa, lo que reduce la superficie donde quedan distribuidas las tensiones. En consecuencia, para un valor de presión aplicada el electrodo constante, aumentan las tensiones locales en la zona del contacto.

3.1. Efecto del radio del electrodo

A partir de un radio de desgaste de valor 0.1 mm y una chapa de espesor 1 mm, resulta posible obtener la distribución de tensiones en función del radio del electrodo. Dicha distribución (figura 3) se representa de forma que el eje de abscisas indica la posición longitudinal de la chapa y, el eje de ordenadas su posición transversal.

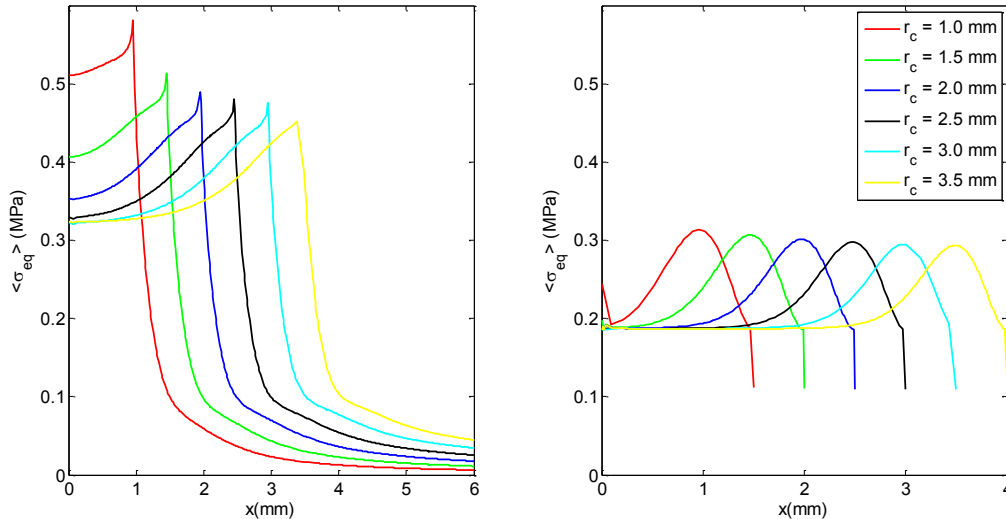
Analizando el efecto que provoca los distintos radios del electrodo en la distribución de tensiones (figura 3) se concluye que el tamaño de los contornos de dicha distribución aumenta conforme disminuye el radio del electrodo.

Figura 3. Efecto del radio del electrodo. Distribuciones de tensiones. Las tensiones se muestran en MPa, siendo el espaciado entre los contornos de 0.2 MPa



La afirmación anterior se corrobora en la figura 4 donde se representan las tensiones medias tanto en la superficie de la chapa como en la zona del electrodo. En dicha figura se observa como las tensiones medias en la superficie de la chapa aumentan conforme disminuye el radio del electrodo alcanzándose un valor máximo próximo a 0.6 MPa para un radio de electrodo de 1 mm. Un efecto similar se puede apreciar en la zona del electrodo en contacto con la chapa.

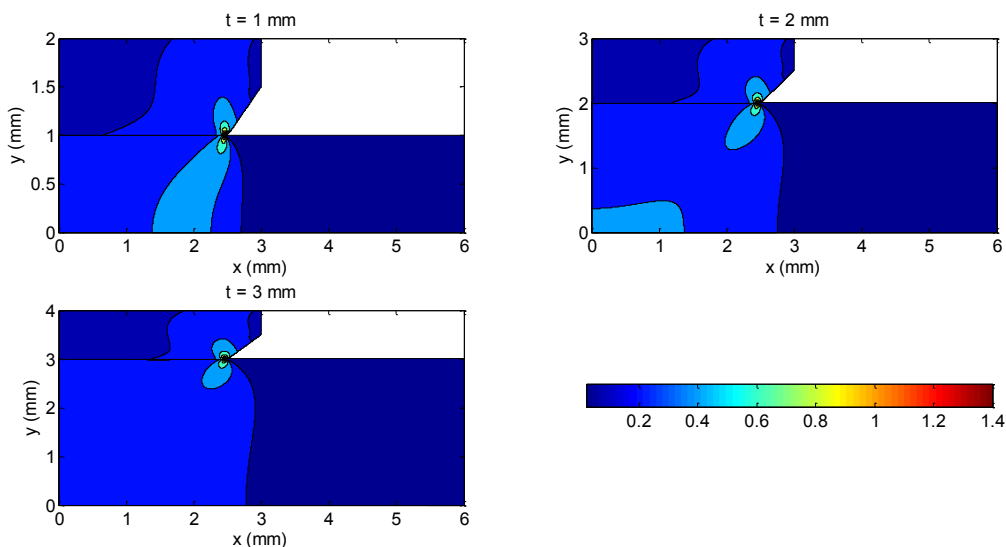
Figura 4. Efecto del radio del electrodo ($t = 1\text{ mm}$, $r_{\text{desgaste}} = 0.1\text{ mm}$). *Izquierda:* tensiones medias en la superficie de la chapa en contacto con el electrodo. *Derecha:* tensiones medias en la zona del electrodo en contacto con la chapa



3.2. Efecto de los espesores de chapa

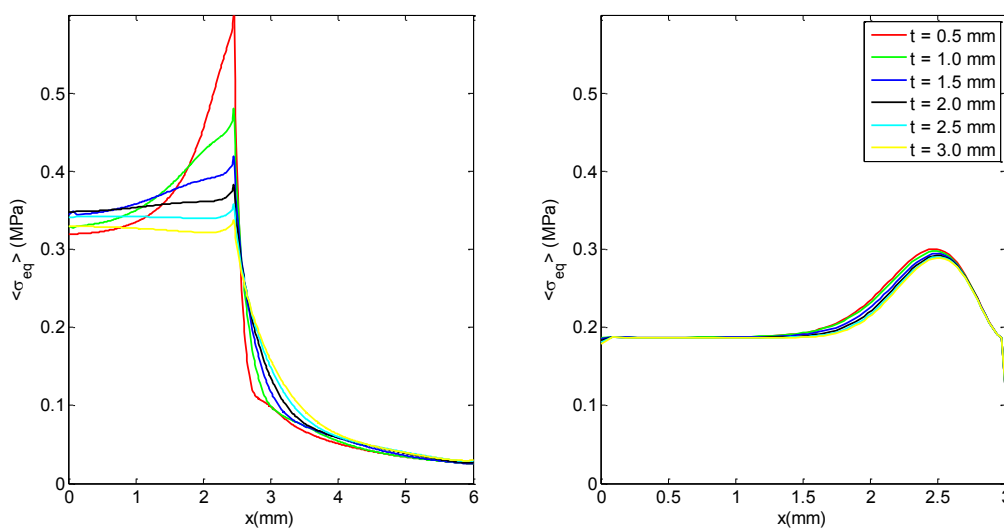
De manera análoga al proceso descrito con anterioridad se procede a continuación. En este caso se parte de un radio de electrodo de valor 2.5 mm y radio de desgaste de 0.1 mm con el objetivo de analizar el efecto que provoca la variación en el espesor de la chapa sobre la distribución de tensiones (figura 5).

Figura 5. Efecto del espesor de la chapa. Distribuciones de tensiones. Las tensiones se muestran en MPa, siendo la espaciado entre los contornos de 0.2 MPa



El análisis de este efecto proporciona cierta similitud con la variación del radio del electrodo, mostrando un aumento del tamaño de los contornos de la distribución de tensiones, en este caso, al disminuir el espesor de la chapa. Analizando las tensiones medias, tanto en la superficie de la chapa como en la zona del electrodo (Figura 6), se observa como éstas aumentan al disminuir el espesor de la chapa de forma que, el valor máximo ($\sigma_{eq} \approx 0.6$ MPa) se alcanza con un espesor en la chapa de valor 0.5 mm. En cambio, en la zona del electrodo en contacto con la chapa, se observa que las tensiones medias equivalentes no varían significativamente con los espesores de chapa, no obstante, se puede apreciar como nuevamente aumentan al disminuir el espesor, obteniéndose valores máximos cercanos a 0.3 MPa.

Figura 6. Efecto del espesor de la chapa ($r_c = 2.5$ mm, $r_{desgaste} = 0.1$ mm). *Izquierda:* tensiones medias en la superficie de la chapa en contacto con el electrodo. *Derecha:* tensiones medias en la zona del electrodo en contacto con la chapa



3.3. Efecto del radio de desgaste

Con el objetivo de analizar en profundidad la zona de unión entre chapa y electrodo, se completará la simulación numérica con un tercer estudio, en este caso se llevará a cabo un análisis que permita observar cómo afecta la variación del radio de desgaste sobre las tensiones medias, para ello se partirá de un espesor de chapa constante de valor 1 mm y un radio de contacto electrodo-chapa variable.

El efecto provocado por distintos radios de desgaste en la distribución de tensiones se muestra en la figura 7. Se puede concluir que el tamaño de los contornos de dicha distribución aumenta al incrementar el radio de desgaste. Analizando con mayor grado de detalle las tensiones medias generadas tanto en la superficie de la chapa como en la zona del electrodo (figura 8), se aprecia como las tensiones medias en la superficie de la chapa aumentan al hacerlo el radio de desgaste, en este caso su valor máximo ($\sigma_{eq} \approx 0.7$ MPa) se alcanza con un radio de desgaste de valor 1 mm. Al contrario de lo que sucedía con la variación del espesor de la chapa, las tensiones medias en la zona del electrodo en contacto con la chapa varían de manera significativa, siendo mayores al aumentar el radio de desgaste y, obteniendo un valor mínimo próximo a 0.3 MPa para un radio de desgaste de 0.1 mm y, un valor máximo (0.5 MPa) cuando el radio de desgaste es 1 mm.

Figura 7. Efecto del radio de desgaste. Distribuciones de tensiones. Las tensiones se muestran en MPa, siendo la espaciado entre los contornos de 0.2 MPa

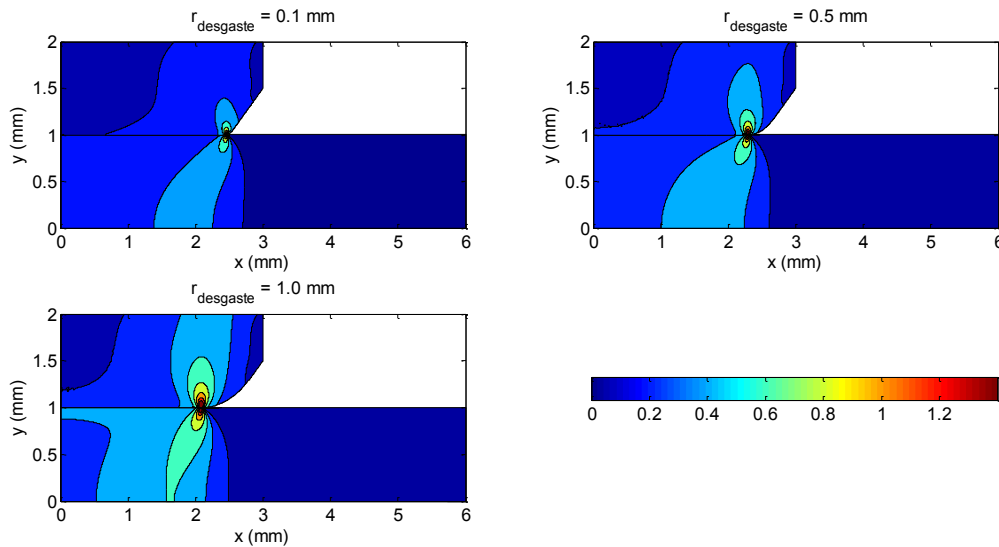
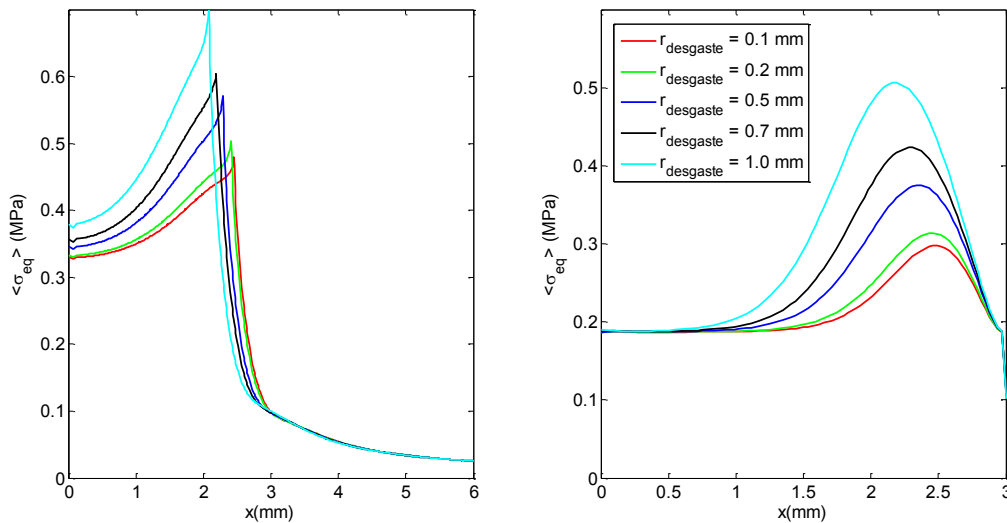


Figura 8. Efecto del radio de desgaste ($t = 1 \text{ mm}$, $r_c = 2.5 \text{ mm}$). *Izquierda*: tensiones medias en la superficie de la chapa en contacto con el electrodo. *Derecha*: tensiones medias en la zona del electrodo en contacto con la chapa



3.4. Ajuste estadístico de los resultados

En este epígrafe se realiza un análisis estadístico de las tensiones máximas obtenidas en el contacto mecánico electrodo-chapa y en la superficie de la chapa. Este análisis permite obtener un modelo sencillo para la determinación de dichas tensiones cuando se varían los diferentes parámetros geométricos.

3.4.1. Contacto electrodo-chapa

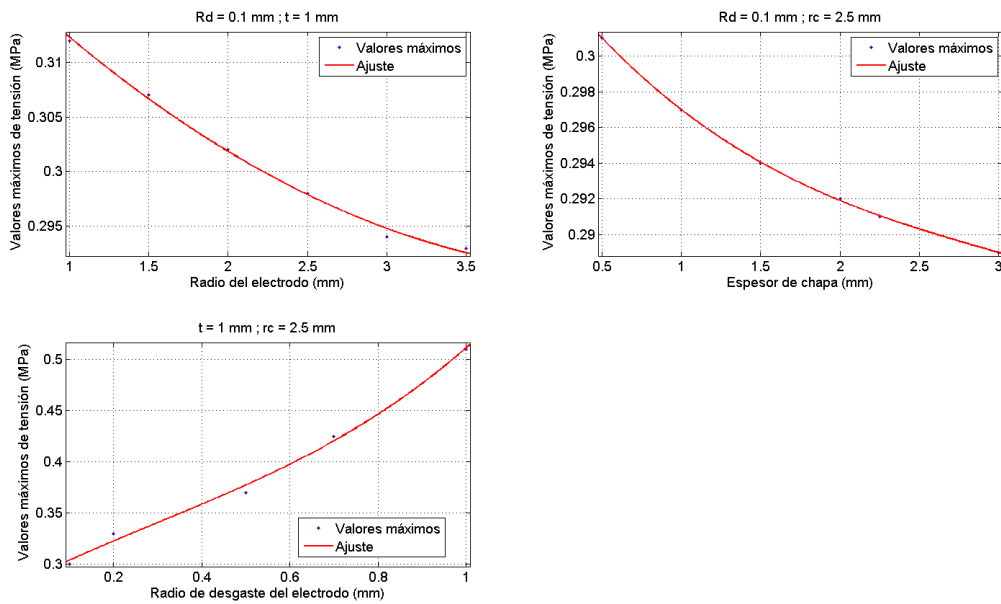
En la figura 9 se representan los valores de las tensiones máximas alcanzadas en el contacto mecánico electrodo-chapa para los tres casos estudiados, cuyos ajustes a curvas cúbico se sintetiza en la tabla 2. En dicha tabla se muestran también los valores de los coeficientes de determinación R y R^2 . A la vista de la tabla se comprueba que las tres curvas

ajustadas tienen un coeficiente de determinación aceptable, lo que indica que la bondad del ajuste es el bueno.

Tabla 1: Caracterización de las curvas de tensión máxima en el contacto del electrodo. r es el radio del electrodo, t es el espesor de la chapa y R_d es el radio de desgaste del electrodo

	Ajuste	R ajustado	R ²
Radio del electrodo	$\sigma_{max} = 8.889 \cdot 10^{-4} \cdot r_c^3 - 4.286 \cdot 10^{-3} \cdot r_c^2 - 3.22 \cdot 10^{-3} \cdot r_c + 0.3186$ (2)	0.99	0.99
Espesor de la chapa	$\sigma_{max} = -3.549 \cdot 10^{-4} \cdot t^3 + 3.21 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 - 1.22 \cdot 10^{-2} \cdot t + 0.3064$ (3)	0.99	0.99
Radio de desgaste	$\sigma_{max} = 0.1354 \cdot r_d^3 - 0.1232 \cdot r_d^2 + 0.215 \cdot r_d + 0.2836$ (4)	0.99	0.97

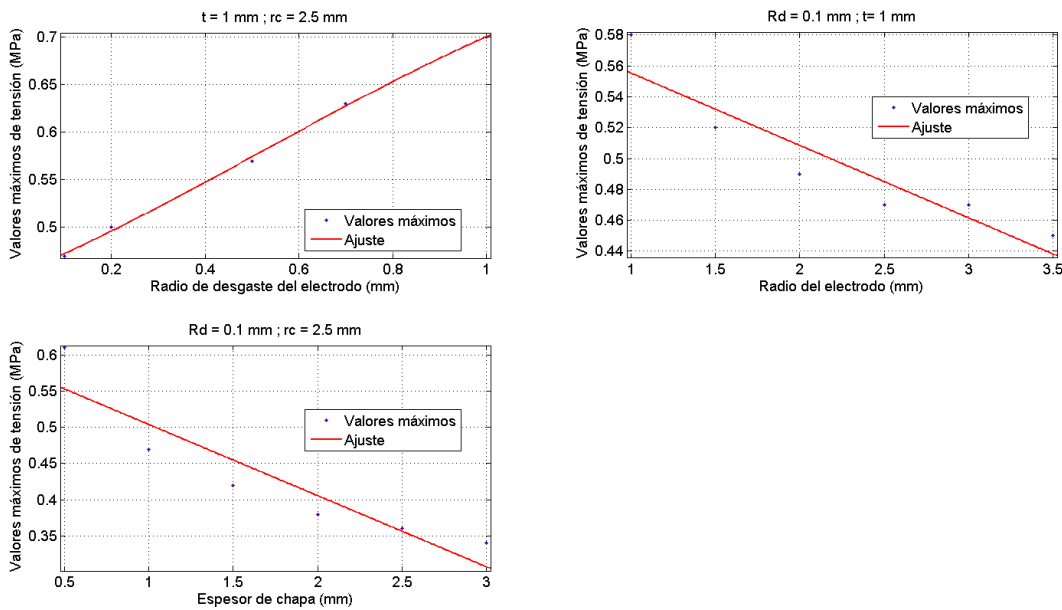
Figura 9. Variación de la tensión máxima en el contacto chapa-electrodo para los tres casos estudiados



3.4.2. Superficie de la chapa

En la figura 10 que se muestra a continuación, aparecen representados los valores de las tensiones máximas alcanzadas en la superficie de la chapa para los tres casos estudiados.

Figura 5. Variación de la tensión máxima sobre la superficie de la chapa para los tres casos estudiados



Procediendo de forma similar, se podrá obtener el ajuste cúbico para el radio de desgaste del electrodo y el ajuste lineal para el radio del electrodo y espesor de la chapa (R ajustada, R^2) sobre la superficie de la chapa.

Tabla 2: Caracterización de las curvas de tensión máxima en la chapa

	Ajuste	R ajustado	R ²
Radio del electrodo	$\sigma_{max} = -0.04686 \cdot r_c + 0.602$ (6)	0.8285	0.8628
Espesor de la chapa	$\sigma_{max} = -0.0982 \cdot t + 0.602$ (7)	0.815	0.852
Radio desgastado	$\sigma_{max} = -0.0729 \cdot r_d^3 + 0.1149 \cdot r_d^2 + 0.2081 \cdot r_d + 0.4503$ (8)	0.998	0.994

4. Conclusiones

El presente trabajo presenta simulaciones numéricas para la obtención de la distribución de tensiones en la zona de contacto chapa-electrodo en la técnica RSW, analizando el efecto de distintos parámetros geométricos en la configuración. Estas distribuciones de tensiones son importantes porque permiten conocer los estados de precarga sobre la chapa y en el contacto chapa-electrodo, constituyendo un primer paso para la evaluación, con gran precisión, de tensiones residuales y deformaciones de origen térmico.

El radio del electrodo determina la superficie de contacto que hay con la chapa de acero inoxidable. Al aumentar el radio del electrodo se aprecia una disminución de las tensiones máximas y por lo tanto un aumento de la vida del electrodo. La misma tendencia se encuentra cuando se aumenta el espesor de la chapa a soldar.

De especial relevancia es el desgaste sufrido por el electrodo, que se materializa en un radio de desgaste en la geometría del mismo. El aumento de este radio de desgaste influye significativamente en la distribución de tensiones medias en la zona de contacto. La

disimilitud de materiales entre electrodo y chapa hace que las tensiones máximas sean diferentes entre ellos, siendo mayores en el acero por su mayor rigidez.

El conocimiento de los campos de tensiones, y, en particular, de las tensiones máximas, tiene relevancia para la optimización de RSW. Un aumento de las tensiones en el electrodo supone una disminución de la resistencia mecánica del contacto. Cuantificar esta resistencia es útil para la fase de soldeo, donde se mantiene la presión sobre las chapas al tiempo que circula una corriente por ellas. En trabajos futuros estos resultados serán empleados para el cálculo de las tensiones mecánicas que genera el paso de corriente por los electrodos (problema termo-mecánico) y de esta forma evaluar el desgaste sufrido por el electrodo.

5. Referencias

- Ambroziak, A., & Korzeniowski, M. (2010). Using Resistance Spot Welding for Joining Aluminium Elements in Automotive Industry. *Archives of civil and Mechanical Engineering*, 10, 5–13.
- Gould, J.E. (1987). An examination of nugget development during spot-welding, using both experimental and analytical techniques. *Welding Journal*, 66, S1–S10.
- Hanselman, D. C., & Littlefield, B. (2005). *Mastering Matlab 7*. Pearson/Prentice Hall.
- Li, W. (2004). Modeling and On-Line Estimation of Electrode Wear in Resistance Spot Welding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127, 709–17. doi:10.1115/1.2034516.
- Madenci, Erdogan, & Guven, I. (2007). *The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®*. Springer.
- Mendez, P. F., & Eagar, T. W. (2001). Welding Processes for Aeronautics. *Advanced Materials and Processes*, 159, 39–43.
- Moshayedi, Hessamoddin, & Sattari-Far, I. (2012). Numerical and experimental study of nugget size growth in resistance spot welding of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 347 – 354. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.004.
- NIED, HA. (1984). The finite-element modeling of the resistance spot-welding process. *Welding Journal*, 63, S123–S132.
- Parker, J.D., Williams, N.T., & Holliday R.J. (1998). Mechanisms of electrode degradation when spot welding coated steels. *Science and Technology of Welding and Joining*, 3, 65–74.
- Sun, X., & Khaleel, M.A. (2004). Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy to Steel with Transition Material - Part II: Finite Element Analyses of Nugget Growth. *Welding Journal*, 83, 197S–202S.
- Sun, X., Stephens, E.V., Khaleel, M.A., Shao, H., & Kimchi, M. (2004). Resistance spot welding of aluminum alloy to steel with transition material - from process to performance - part 1: experimental study - weld strength, failure mode, and fatigue life were compared with self-piercing rivets of the same dissimilar metals combination. *Welding Journal*, 83, 188S–195S.
- Tang, H, Hou, W., Hu, S.J., & Zhang, H. (2000). Force characteristics of resistance spot welding of steels. *Welding Journal*, 79, 175S–183S.
- Weber G., & Burmeister J. (2000). "Online process monitoring by fuzzy classification during AC resistance welding. In , III-1156:1. Italy. Florence: IIW.
- Zhang, Hongyan, & Senkara, J. (2011). *Resistance welding: fundamentals and applications*. CRC press.
- Zhang, X. Q., Chen, G. L. & Zhang, Y. S. (2008). Characteristics of electrode wear in resistance spot welding dual-phase steels." *Materials & Design*, 29, 279 – 283. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.10.025.