

DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL PARA ANALIZAR EL CAMPO DE TEMPERATURAS EN LA JUNTA SOLDADA DE UN ACERO INOXIDABLE ESTRUCTURAL

Miguel, V.; Estrems, M.; Martínez, E.^(p); Martínez, A.

Abstract

In this work, an experimental procedure to determine the temperature distribution in sheet butt welded joints has been established. Related to light structures, the experiments are focussed on stainless steel elements welded by GTWA procedure. The proposed methodology lets the authors analyze the influence of welding parameters on the heat affected zone. The experimental method can be applied to other types of structural steels and arc welding processes.

Keywords: Temperature field, electric arc welding, metal structure, stainless steels

Resumen

En el presente trabajo se ha diseñado un procedimiento experimental para analizar la distribución de temperaturas en la soldadura de chapas a tope. Los experimentos se centran en la unión de una estructura ligera de acero inoxidable mediante el procedimiento de soldeo GTAW. Con el resultado del trabajo realizado en la presente investigación, se puede analizar la dimensión de la zona afectada por el calor en el cordón de soldadura, así como la influencia de los parámetros del proceso de soldeo. Este procedimiento experimental es aplicable al estudio de otros tipos de aceros estructurales y otros procesos de soldeo por arco eléctrico.

Palabras clave: campo de temperaturas, soldadura por arco eléctrico, estructura metálica, aceros inoxidables

1. Introducción

La estructura metálica es una alternativa de diseño y construcción que se ha venido desarrollando desde hace algunas décadas como solución estructural. En la actualidad se ha consolidado plenamente su uso[1]. La variedad de aplicaciones industriales de los sistemas de soldadura han llegado a sustituir en el sector de la construcción, al tradicional atornillado y remachado, no solamente porque la soldadura significa una operación más sencilla y rápida, sino porque además, el proyectista puede combinar ilimitadamente chapas, láminas, barras, tubos, perfiles, etc., para aplicar un gran número de posibilidades de diseño que permitirán mejorar las relaciones resistencia/peso y rigidez/peso con una mayor viabilidad económica[2].

Los aceros inoxidables son muy importantes en la construcción de equipos para la industria de procesos y para la edificación. Estos aceros se usan en lugar de los convencionales por sus excelentes propiedades tales como: resistencia a la corrosión, dureza a baja temperatura y buenas propiedades a alta temperatura.

La elevada resistencia a la corrosión de los aceros inoxidables se debe a la pasivación que sufren con formación de una película superficial de óxido de cromo impermeable que aísla al acero del medio corrosivo.

Los aceros inoxidables tienen una conductividad térmica inferior a la de los aceros al carbono, lo que conduce, en términos comparativos, a gradientes de temperatura más pronunciados y mayores deformaciones permanentes. Aplicado a las operaciones de soldeo, una difusión más lenta del calor a través del metal base representa que la zona soldada permanecerá caliente durante más tiempo y la posibilidad de precipitación de carburos de cromo en borde de grano si la transición de 800°C a 500°C durante el enfriamiento no se hace suficientemente rápida. También, debido a la mayor concentración del calor en la zona del cordón, se necesita menos calor para producir la fusión comparado con la soldadura de aceros ordinarios de construcción, lo que significa que, a igualdad de condiciones, la velocidad de soldeo puede ser más elevada en aquéllos.

En relación al coeficiente de dilatación térmica, éste es más elevado en los aceros inoxidables que en el acero al carbono, lo que genera una mayor problemática para la soldadura de aquéllos desde el punto de vista de las deformaciones y tensiones residuales tras el enfriamiento [6].

En los procesos de soldeo por arco eléctrico, el aporte de energía se realiza en una zona localizada alcanzándose temperaturas muy superiores a la temperatura de fusión del material base. Las altas diferencias de temperatura que se establecen entre la zona de aplicación del calor y las zonas adyacentes a ésta, junto con la buena conductividad térmica, en general, que presentan los metales a soldar origina un importante flujo térmico que condiciona el comportamiento de las estructuras soldadas, modificando las propiedades resultantes tanto en el cordón de soldadura como en las zonas cercanas a él. Cuando se analizan los efectos perjudiciales que el ciclo térmico de soldeo puede producir sobre la pieza soldada, el interés no se centra necesariamente en la zona de fusión o cordón de soldadura, sino también en la zona cercana a éste, denominada zona afectada térmicamente (ZAT), que suele presentar un grado de debilidad mayor en sus propiedades mecánicas que el propio cordón. Por lo tanto, el conocimiento de la evolución de la temperatura en los alrededores del cordón de soldadura, durante el proceso de soldeo y en el proceso de enfriamiento, es esencial para determinar el grado de afección en el material y sirve para establecer estrategias que minimicen estos efectos térmicos como son el empleo de precalentamientos, tratamientos térmicos post-soldadura, colocación de puntos calientes, etc.

Los principales resultados que se pueden determinar con el análisis térmico experimental son la evolución temporal del campo temperaturas en cualquier punto de las piezas a soldar, así como el mapa isotérmico en cualquier instante durante el proceso de soldeo. Los correspondientes efectos de la temperatura sobre el material están cuantificados en diferentes condiciones [7, 8,9].

El presente trabajo analiza los resultados del campo de temperaturas de una junta soldada de acero inoxidable estructural AISI 304 mediante la técnica TIG sin aporte de material.

2. Materiales

El material ensayado experimentalmente es acero inoxidable austenítico AISI 304, X5CrNi18-10 según norma UNE [3]. El punto de fusión para este acero se estima en 1400° C y la composición química del acero ensayado se indica en la tabla 1. En las tablas 2 a 4 se recopilan las propiedades físicas [5], la variación de propiedades mecánicas con la temperatura y las propiedades térmicas a diferentes temperaturas. Las probetas empleadas para los ensayos tienen 75 mm de longitud y 30 mm de anchura, el espesor varía en función del ensayo realizado.

C	S	M	P	S	N	C	N
I	I	N	%	%	%	R	I
0.07	1	2	0.045	0.015	0.11	18	9
%	%	%	%	%	%	%	%

Tabla 1: Composición del acero AISI 304

DENSIDAD	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	CAPACIDAD TÉRMICA	RESISTIVIDAD ELÉCTRICA	MAGNETIZABLE
7.9 kg/dm ³	15 W/m K	500 J/ kg K	0.73 O .mm ² / m	No

Tabla 2: Propiedades físicas del acero AISI 304

TEMPERATURA (° C)	20	100	200	300	400	500
Módulo Elasticidad(GPa)	200	194	186	179	172	165

Tabla 3: Valores del módulo de elasticidad del acero AISI 304 a diferentes temperaturas

TEMPERATURA ° C	100	200	300	400	500
C. Dilatación Térmica(10 ⁻⁶ K ⁻¹)	16	16.5	17	17.5	18

Tabla 4: Coeficiente dilatación térmica del acero AISI 304 a diferentes temperaturas

3. Procedimiento de Soldadura

La procedimiento de soldadura empleado es por arco eléctrico con protección de gas inerte y electrodo no consumible o procedimiento TIG, también denominado GTWA, habitualmente utilizado para la soldadura de aceros inoxidables. Se ha seleccionado como gas de protección argón comercial C-50 suministrado por Carburos Metálicos. El caudal de gas utilizado es 12 l/min., y la soldadura se ha realizado sin material de aportación. El soldeo se ha realizado "en posición", esto es, posición horizontal. El electrodo empleado es de torio-lantano de 1,6 mm de diámetro, cuyo punto de fusión se estima en 4000°C. El tipo de corriente seleccionada es continua con polaridad directa. En todo momento se ha garantizado elafilado del extremo del electrodo conforme a lo establecido para el tipo de corriente empleada para mantener el arco estable. Se ha seleccionado un diámetro de electrodo pequeño con el fin de concentrar el arco y conseguir un baño de fusión reducido. La zona de la junta soldada fue preparada superficialmente con un cepillo de púas de acero inoxidable para eliminar cualquier tipo de oxidación superficial que dificultara la estabilidad del arco eléctrico durante la soldadura. Finalmente, para eliminar posibles restos de suciedad del material base, se procedió a limpiar con acetona la zona a soldar. Debido al espesor de la chapa, la soldadura se pudo realizar sin preparación de bordes.

Las variables de soldeo consideradas se indican en la tabla 5.

I	A	Intensidad de corriente
V	V	Voltaje
e	mm	Espesor de chapa
v	m/s	Velocidad lineal de soldadura

Tabla 5: Variables experimentales de soldeo.

4. Descripción de equipos e instrumentación.

4.1. Termopares

Inicialmente se utilizaron termopares tipo K encapsulados en una vaina de acero inoxidable, Figura 1, aunque finalmente se realizaron las mediciones con hilo de termopar tipo K para aumentar la velocidad de respuesta. Para mejorar el contacto entre el extremo del termopar y el material base, se practicaron taladros en la chapa para la introducción del hilo, tal y como se aprecia en la Figura 2.

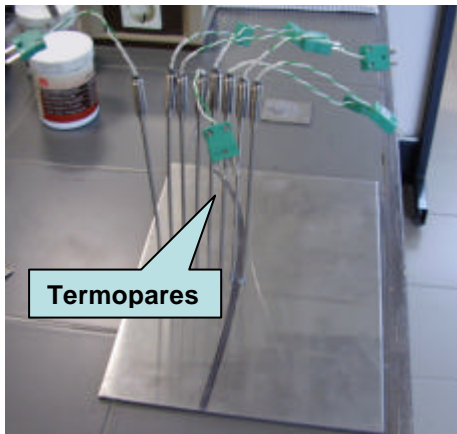


Figura 1: Termopares encapsulados

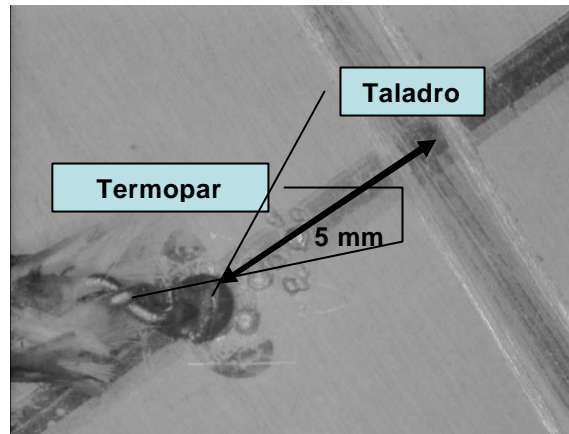


Figura 2: Posicionamiento Termopar

Para medir la distancia real entre los taladros practicados a un lado del cordón, se ha utilizado proyector de perfiles. En la figura 3 se observa tres taladros de diámetro 1 mm practicados en uno de los ensayos para la introducción de los termopares.

4.2. Registrador de temperaturas.

Para la medición de la temperatura de la chapa se ha empleado un registrador modelo USB TC-08 para termopares, conectado a un PC que permite recopilar, analizar y visualizar los datos de 8 canales. El registrador de datos ofrece además conectividad mediante puerto USB. Para registrar todos los datos de temperaturas que se registran con el TC-08, utilizamos un software comercial Picolog para Windows 5.15.6. Posee una amplia escala de temperaturas, con resolución vertical de 20 bits

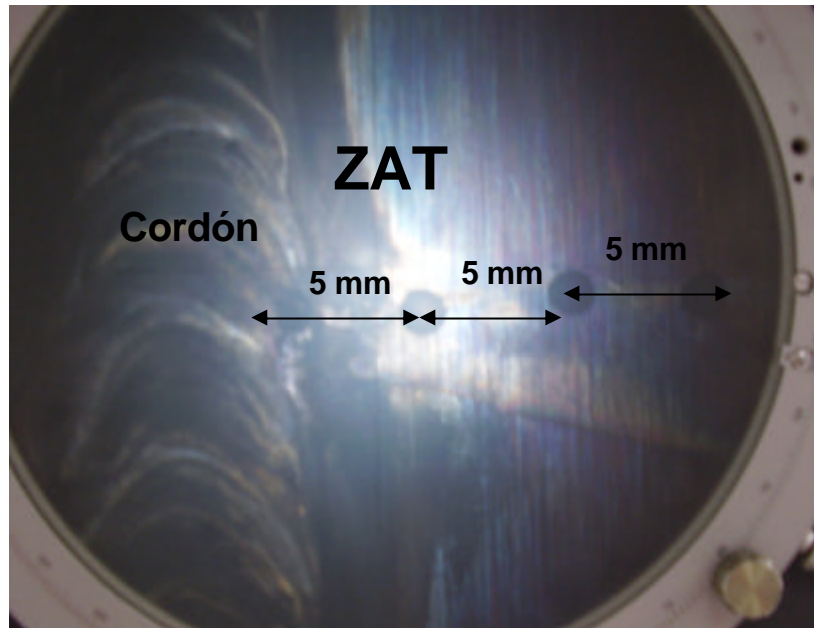


Figura 3: Distancia termopares-cordón

4.3. Equipo de soldadura.

El equipo empleado (figura 4) es un transformador-rectificador modelo MAGIC WAVE 2600 de la marca Fronius. El equipo permite la ejecución de soldaduras TIG manual, así como con electrodos revestidos y posibilita la elección del tipo de corriente y polaridad. La tensión de alimentación es rectificadora mediante transistores y el control es del tipo Fuzzi.

4.4. Control de la velocidad de soldeo.

Para mantener constante la velocidad de soldeo se ha empleado una fresadora en cuyo cabezal es alojado un utillaje fabricado expresamente para sujetar la antorcha del equipo de soldadura. En esta máquina podemos seleccionar varias velocidades de avance y considerarla como variable de ensayo (figura 4).

4.5. Soporte para el material base

Para realizar los ensayos se ha fabricado un soporte de madera para sujetar la chapa y evitar las deformaciones durante la soldadura. El soporte es alojado sobre la mesa de la fresadora. Se ha elegido madera para fabricar el soporte para evitar que existan pérdidas térmicas por conducción a través del mismo.

5. Descripción del método de ensayo.

Los ensayos se inician con la preparación del metal base que se va a soldar, tal como se indica en el apartado 2. El siguiente paso consiste en posicionar los termopares en el metal base. Se debe asegurar que el termopar permanece en contacto con el metal base para garantizar la medición correcta de la temperatura en la chapa en todo momento. Se han empleado diferentes métodos para posicionar los termopares pero al final se selecciona el indicado en la Figura 1. Para garantizar el contacto durante la manipulación inicial de la chapa se emplea resina adhesiva.

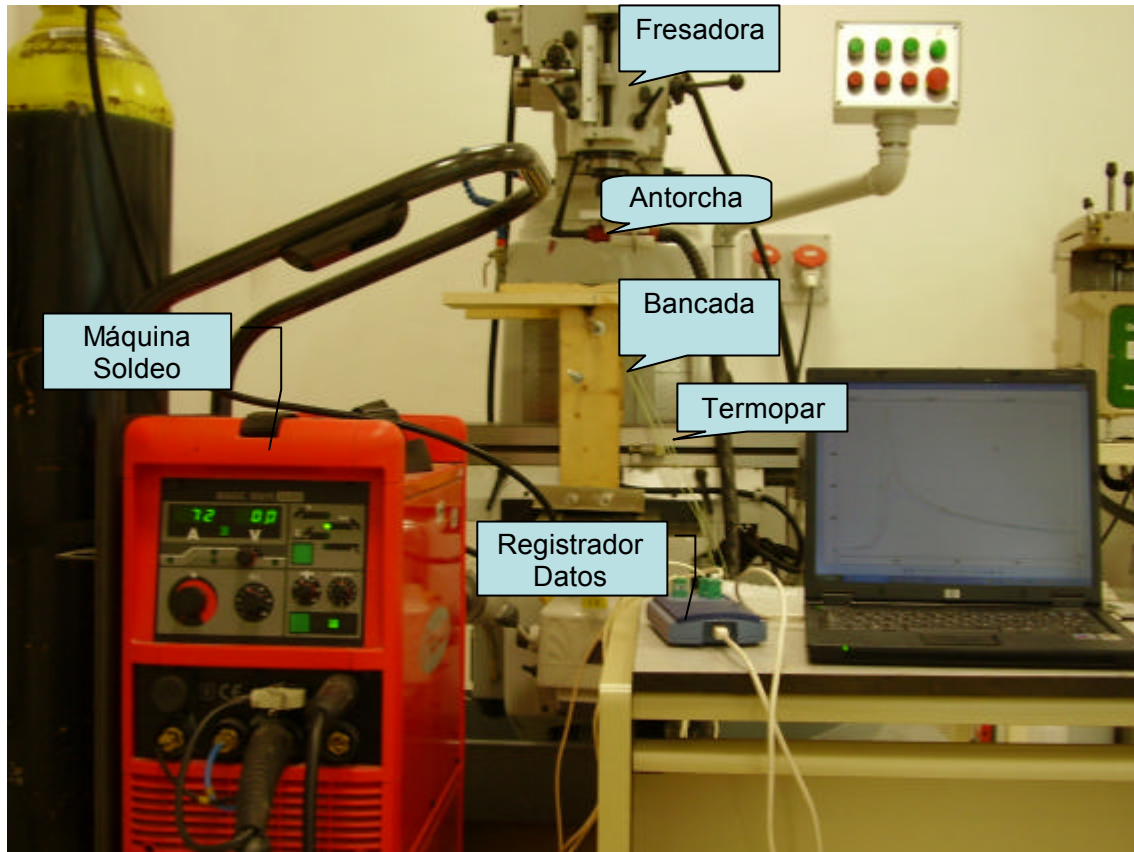


Figura 4. Equipo experimental.

A continuación, se coloca el metal base en el soporte de madera y se sujeta por medio de bridas y así evitar la deformación de la chapa. El conjunto es colocado finalmente sobre la mesa de la fresadora y sujetado mediante pernos.

A continuación se sujeta la antorcha TIG por medio del utillaje correspondiente al cabezal de la fresadora. A continuación se coloca la pinza de masa en el metal a soldar, se regula el caudal de gas y la intensidad de corriente de soldeo, se programa la velocidad de movimiento de la mesa de la fresadora y, finalmente, se conectan los termopares al registrador de datos y éste al PC.

Una vez preparado el conjunto de ensayo, se ceba el arco, se acciona la velocidad de alimentación (mesa de la fresadora) y comienza el ensayo. Mientras se realiza el cordón de soldadura se registran las temperaturas. Por último, los datos obtenidos son exportados a una hoja de cálculo para su análisis posterior.

6. Resultados y Discusión

6.1. Ensayos preliminares.

Para la puesta a punto del método de ensayo, inicialmente se realizaron los primeros experimentos con 8 termopares encapsulados en vaina de acero inoxidable. Con este sistema se detectó que los termopares más alejados del cordón de soldadura no experimentaban apenas una variación de la temperatura y que, además, la temperatura más alta registrada por dichos termopares no pasaba de 500° C, tal como se indica en Figura 5.

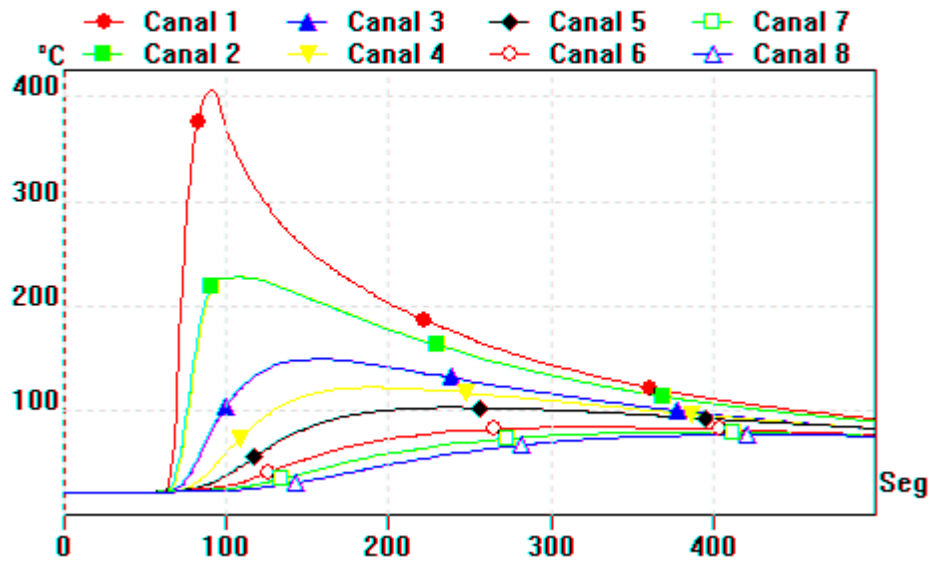


Figura 5: Resultado de ensayo con 8 termopares (ensayos preliminares). Registros temperatura-tiempo.

También, para poder aproximar a la chapa los termopares encapsulados, se diseñó un utillaje fabricado en aluminio (figura 6). Este utillaje era excesivamente rígido y no permitía compensar las deformaciones que se producen en la chapa durante el proceso de soldeo. De esta forma, se perdía el contacto entre los termopares y la chapa, obteniendo lecturas no reales de la temperatura.

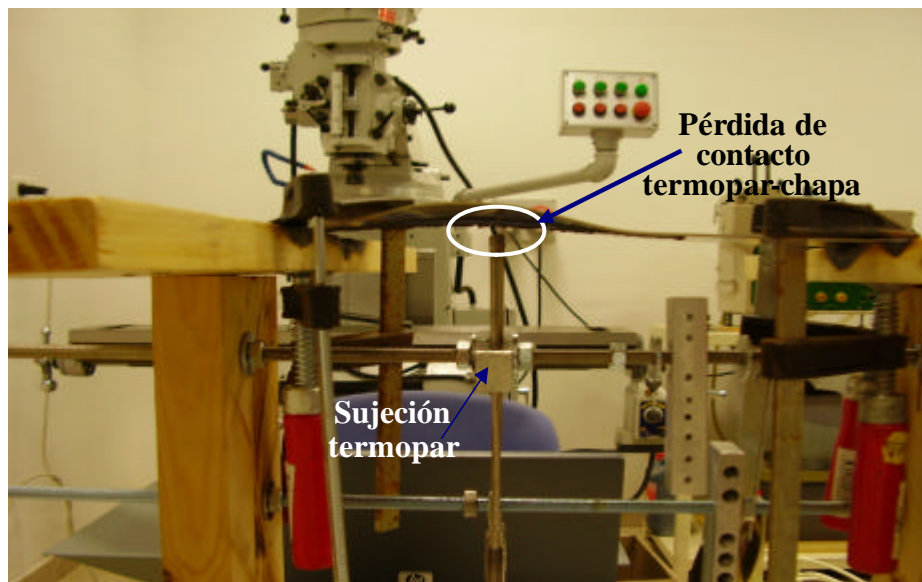


Figura 6: Utillaje para sujeción de termopares encapsulados (ensayos preliminares)

6.2. Ensayos finales.

En la tabla 6 se indican las variables de soldeo consideradas en dos ensayos realizados con el procedimiento final.

	Ensayo I	Ensayo II		Descripción
<i>I</i>	79	120	A	Intensidad de corriente
<i>V</i>	15	20	V	Voltaje
<i>η</i>	0,7	0.7		Rendimiento de aporte de calor
<i>EBA</i>	3,485	5.263	kJ/mm	Energía Bruta Aportada
<i>e</i>	2	4	mm	Espesor de chapa
<i>v</i>	0,0034	0.0034	m/s	Velocidad lineal de soldadura

Tabla 6. Variables de soldeo experimentadas

En la Figura 7 se representan los valores de temperatura registrados en función del tiempo a 5, 10 y 15mm de distancia del eje del cordón e soldadura. Se considera como tiempo de enfriamiento 200 s, que corresponde al tiempo en que las temperaturas en los diferentes puntos se igualan.

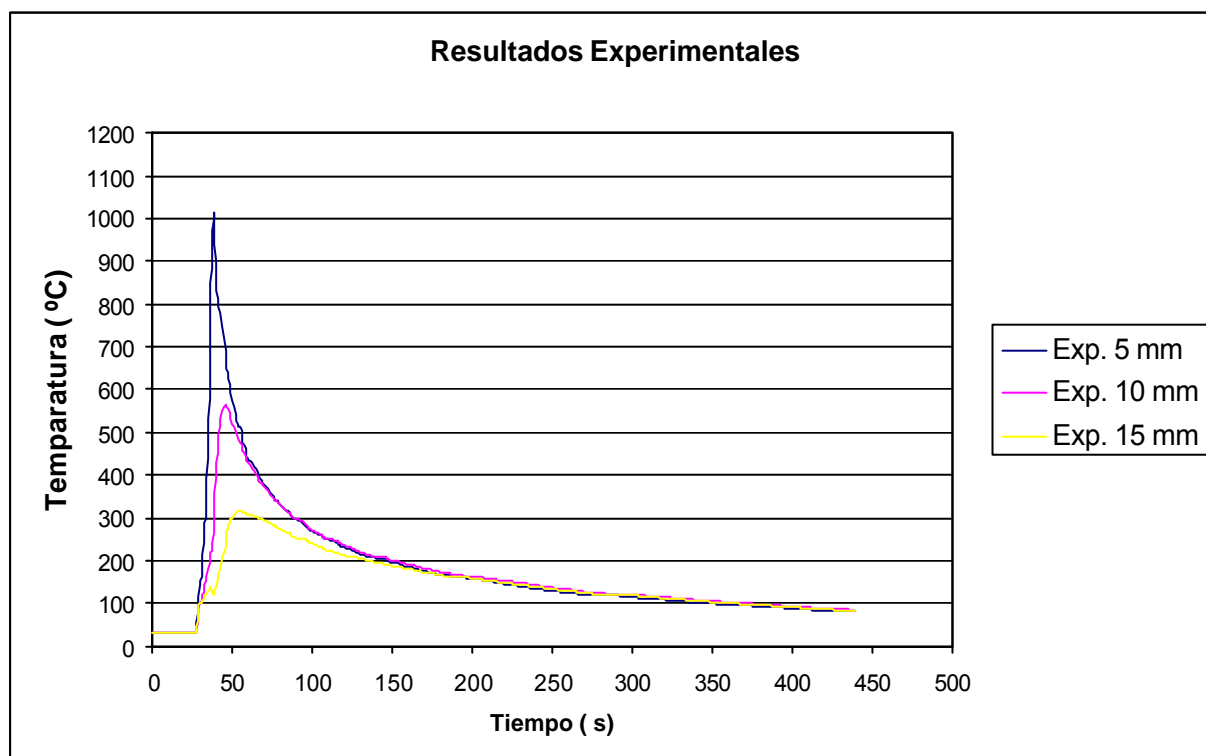


Figura 7. Resultados experimentales ensayo I

Uno de los parámetros importantes a determinar en las uniones soldadas de aceros inoxidables es el tiempo transcurrido entre las temperaturas de 800 y 500°C durante el enfriamiento, es decir, el conocido $t_{8/5}$. La determinación de este parámetro se muestra en la figura 8.

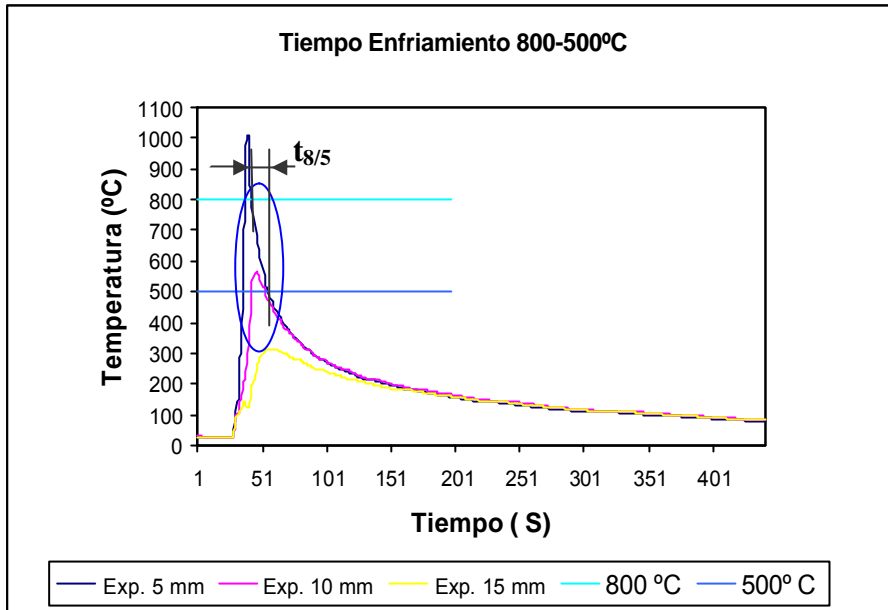


Figura 8. Determinación del parámetro $t_{8/5}$

Los ensayos permiten determinar también la variación de la temperatura con la distancia al cordón de soldadura, tal y como se indica en la figura 9.

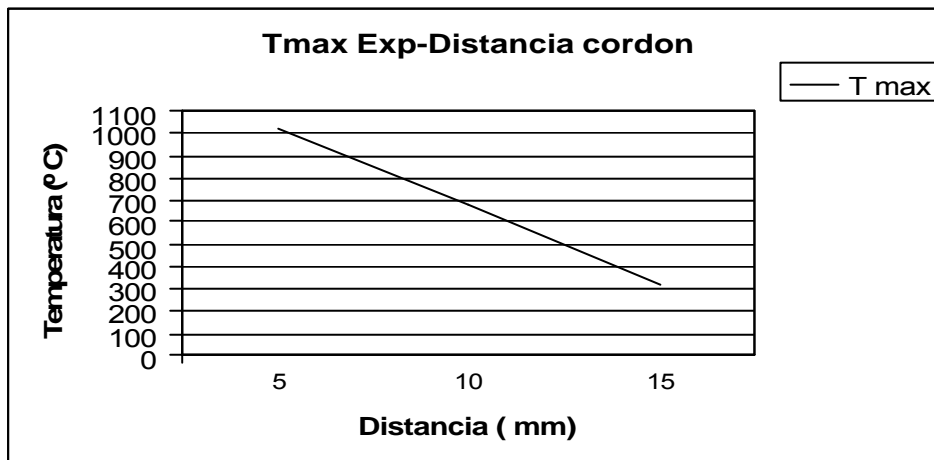


Figura 9: Variación de los valores de máxima temperatura con la distancia al cordón de soldadura.

En la Figura 10 se indican los resultados experimentales del ensayo II, según los parámetros de la tabla VI. En este ensayo se ha modificado el espesor de chapa y la intensidad de corriente. Se puede observar que, aunque la intensidad empleada ha sido mayor que en el anterior ensayo, la máxima temperatura alcanzada es sensiblemente menor. Esto demuestra la sensibilidad del fenómeno al espesor de la chapa que, al ser mayor en este caso, genera mayor disipación térmica actuando como un enfriador térmico. En este último caso se ha considerado un termopar más, de forma que se ha analizado una distancia al cordón mayor (cuarto termopar).

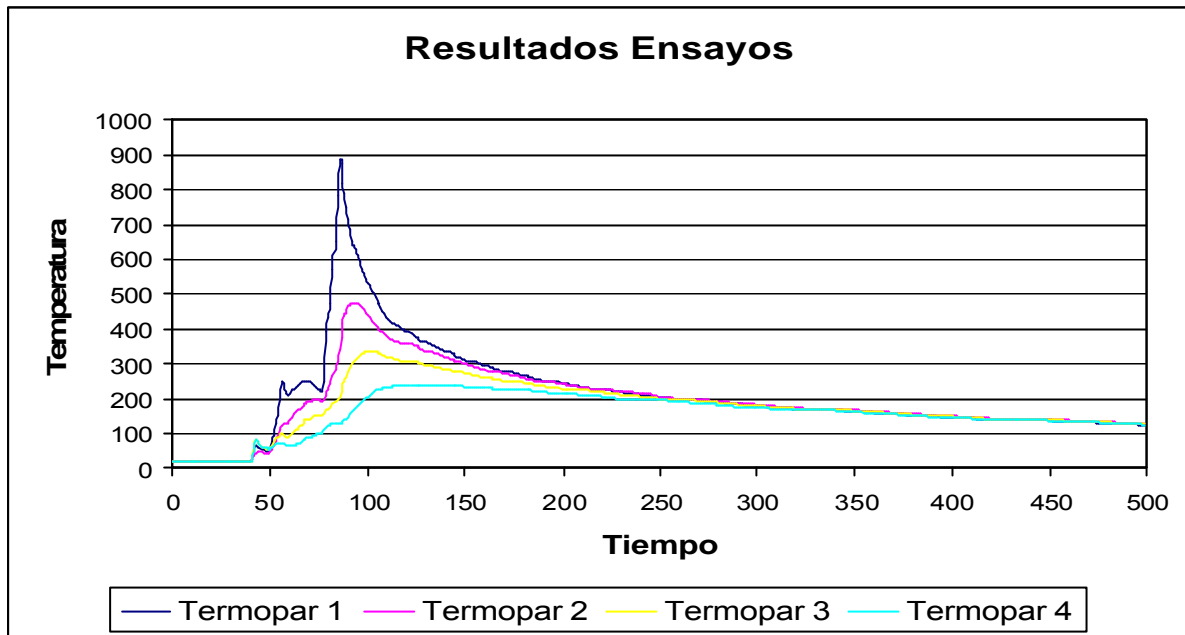


Figura 10. Registros temperatura tiempo para una intensidad de corriente de 120 A y un espesor de chapa de 4 mm.

7. Conclusiones

Se ha diseñado un procedimiento experimental para calcular la distribución de temperaturas en la zona próxima al cordón de soldadura de un acero inoxidable estructural.

Se constata que es más adecuado medir las temperaturas en la zona del cordón de soldadura mediante hilo de termopar tipo K, ya que los termopares encapsulados en una vaina de acero inoxidable, no dan buenos resultados debido a la elevada inercia térmica de la funda.

Durante el tiempo de soldeo se produce un aumento importante de la temperatura en la zona de la unión, esto produce una deformación del material base. Con este análisis experimental se puede calcular la temperatura en la ZAT para reducir la deformación del material base.

Mediante este análisis del campo de temperaturas se puede calcular la dimensión de la zona afectada térmicamente.

Los datos obtenidos con estos ensayos pueden servir para validar el cálculo de la ZAT mediante un método numérico.

Este procedimiento experimental se puede utilizar para otros tipos de acero y para otros procedimientos de soldadura por arco eléctrico como el MIG/MAG.

Referencias

- [1] Asociación Colombiana de Soldadura «Actualización Tecnológica de Inspectores de Construcciones Soldadas» Seminario -Taller, Bogotá (Colombia) octubre de 2000 pp. 4-12
- [2].M. BENHAYON. «Introducción al Proyecto de las Construcciones Metálicas Soldadas». II Congreso Colombiano de Soldadura y III Exposición Industrial (Colombia), Noviembre 1994. Centro Argentino de Tecnología de la Soldadura. CATS

- [3] Norma UNE-EN 10088-1:2006. Aceros Inoxidables. Parte 1: Relación de Aceros Inoxidables
- [4] Gómez de Salazar J.M., Moreno P., “ Soldabilidad de aceros inoxidables bajos en Ni” Congreso de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Lugo 2003
- [5] UNE-EN 10028-7: Productos planos de acero para aplicaciones a presión. Parte 7: Aceros Inoxidables
- [6] Z. Mazur, G. Gonzalez, G. Urquiza, O. Salazar, C. Mariño y A. Hernandez, Rev. Metal. 38 (2002) 14-22.
- [7] R. González, J.C. Suárez, F.J. Vicario y A. Muñoz, Rev. Metal. Madrid 42 (2006) 256-269.
- [8] Z. Mazur, G. González, G. Urquiza, O. Salazar, C. Mariño y A. Hernández, Rev. Metal. Madrid 38 (2002) 14-22.
- [9] F. Alhama, D. Alcaraz y C.F. González, Rev. Metal. Madrid Vol. Extr. (2005) 304-308.

Agradecimientos

Los autores del trabajo agradecen al Laboratorio de Ciencia e Ingeniería de Materiales del Instituto de Desarrollo Regional de Albacete de la UCLM, el apoyo recibido en la realización del mismo.

Correspondencia (Para mas información contacte con):

Eusebio José Martínez Conesa.

Profesor Ayudante de Universidad. Departamento de Arquitectura y Tecnología de la Edificación.

Área: Construcciones Arquitectónicas. Escuela Técnica de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena.

Pº de Alfonso XIII, 52, Edificio de Minas Despacho nº 15 Cartagena, España

Tlf: 968325666 Fax: 968325931

e-mail: eusebio.martinez@upct.es