

# Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja

Parte 4: Extrapolación a escala productiva

**Juan Rukavina Mikusic<sup>1</sup>, María Cristina Di Stefano<sup>1</sup>, Carlos Ferrari<sup>2</sup>, Felipe Diniello<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Centro de Tecnologías Químicas (CTQ), Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Unidad Académica Bariloche, Fanny T. de Newbery 111, Bariloche, Río Negro, Argentina

<sup>3</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Electrónica, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*juanrukavina@gmail.com*

*Recibido el 12 de noviembre de 2018, aprobado el 05 de febrero de 2019*

---

## Resumen

En el presente estudio se analiza el proceso de soldadura llevado a cabo en un conjunto de piezas de geometría de revolución compleja y extensa, a escala real, con especial énfasis en la etapa de inserción y su relación termo – geométrica – mecánica. Se muestra asimismo una validación del trabajo teórico experimental efectuado vinculando la caracterización de los principales componentes del proceso: material y elemento resistivo con los parámetros fundamentales: corriente (densidad de potencia), tiempo de proceso y presión de consolidación.

**PALABRAS CLAVE:** TERMOPLÁSTICOS - PROCESO – INSERCIÓN – SOLDADURA - GEOMETRÍA COMPLEJA

## Abstract

In the present study we analyze the welding process carried out in a set of geometry pieces of complex and extensive revolution, on a real scale, with special emphasis on the insertion stage and its thermo-geometric-mechanical relationship. Furthermore, it shows a validation of the experimental theoretical work carried out linking the characterization of the main components of the process: material and resistive element with the fundamental parameters: current (power density), process time and consolidation pressure.

**KEYWORDS:** THERMOPLASTICS – PROCESS – INSERTION – WELDING - COMPLEX GEOMETRY

## Introducción

Se ha podido establecer a partir de las tres entregas anteriores que la soldadura mediante la utilización de mallas calefactoras resulta ser una de las más prometedoras técnicas de unión para componentes fabricados con materiales termoplásticos. Se asocian en ella diferentes fenomenologías cuyas variables, parámetros y propiedades involucradas actúan bajo condiciones de no linealidad. Dado que tanto el polímero como la malla conductora son materiales sólidos, el problema térmico responde a la ecuación de Poisson transitoria para propiedades termofísicas de los materiales con comportamiento no lineal y para una fuente volumétrica variable con el tiempo. La no linealidad térmica se debe fundamentalmente a que las propiedades térmicas, físicas y mecánicas de los materiales varían considerablemente con la temperatura.

Por las características del problema, la transferencia de calor se encuentra gobernada por el mecanismo de conducción o difusión de calor en sólidos dado que a partir de las propias condiciones geométricas, tanto el mecanismo de convección como el de radiación pueden ser despreciados. En consecuencia, el flujo de calor parte desde el seno del conductor metálico (donde se genera por efecto Joule), se conduce a través del mismo y migra hacia el polímero, donde se distribuye en función de las resistencias térmicas existentes y que son dependientes de la geometría del sistema.

La necesaria aplicación de presión para la ocurrencia del proceso impulsa al material a deformaciones considerables dando lugar finalmente más que a una sumatoria, a un acoplamiento de problemas térmicos y mecánicos.

La conceptualización luego de todo este trabajo ha sido desde una visión independiente de cada una de las fenomenologías explicitadas a través de sus variables macroscópicas representativas, para poder plantear luego la factibilidad de su acoplamiento con la finalidad última de predecir y optimizar el proceso global. En consecuencia se tornó necesario idear inicialmente el desarrollo de un modelo de proceso basado en los parámetros asociados a éste – cuyo rango de validación quedara determinado por las condiciones de contorno – y que también permitiera sistematizar la ventana de trabajo óptima.

En esta cuarta y última entrega, se efectúa el recorrido final del proceso de soldadura aplicado a escala real para un conjunto de piezas de geometría de revolución compleja y extensa, verificándose la correcta determinación previa de las condiciones de contorno y parámetros asociados a la ventana de trabajo. Para ello:

a) Se desarrollan y fabrican:

- Las piezas a soldar.
- Los teje-mallas.
- Las mallas calefactoras.
- Los moldes insertadores para las distintas zonas de las piezas a soldar.
- Las camas contenedoras de las piezas a insertar y soldar para poder aplicar la presión hidráulica al sistema.

b) Se efectúan los procesos de:

- Inserción de las mallas calefactoras en la interfaz de soldadura con su correspondiente ciclo termomecánico.
- Encastre de las medias cañas.
- Soldadura final a escala real con su correspondiente ciclo termomecánico.

Finalmente, se establecen a partir de las conclusiones los importantes avances logrados en esta temática. A la vista de todas las etapas de desarrollo cumplidas se consideran válidas todas las propuestas y los aportes originales aplicados. La valoración resulta altamente positiva en cuanto a la calidad final obtenida en las uniones soldadas por resistencias aplicadas al entorno de piezas extensas y complejas tanto en el campo experimental de laboratorio como en su extrapolación a escala real.

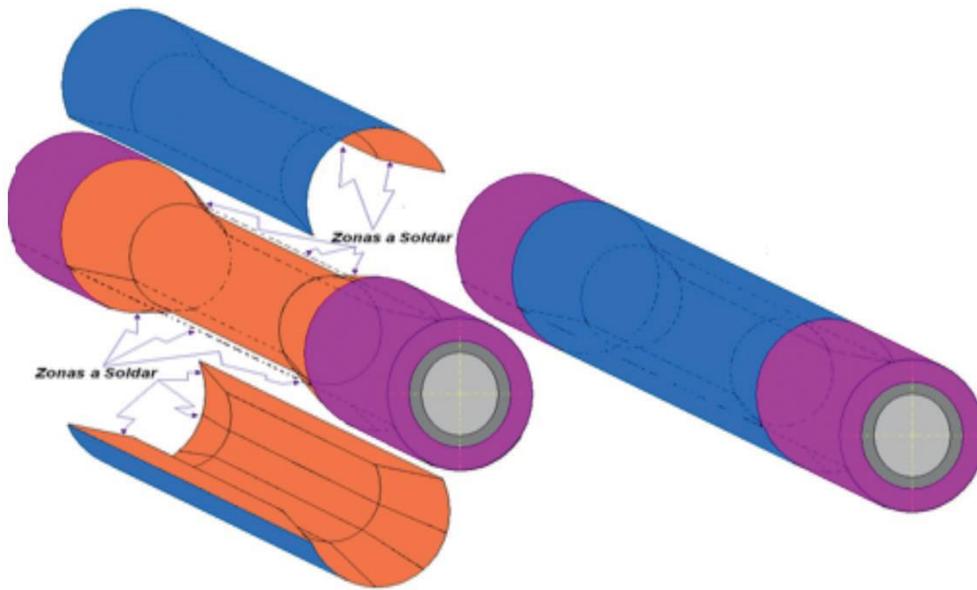
Conjunto de piezas a soldar

El conjunto de piezas a soldar se compone de:

- a. un tubo con una cavidad conformada por una zona cilíndrica y terminaciones troncocónicas
- b. dos mediacañas que van a ser soldadas al tubo y entre sí en cada una de sus terminaciones planas

Se anexa vista de los componentes a utilizar en el trabajo de soldadura (Figura 1). El material utilizado para su fabricación es polipropileno macizo grado comercial.

Fabricación de las mallas calefactoras a utilizar



**Fig. 1. Vista de los componentes y zonas a soldar**

en el proceso de soldadura.

Se han desarrollado y construido los teje – mallas a partir de los cuales se efectúa en forma manual la fabricación de las mallas para llevar a cabo el proceso de soldadura.

Se subdivide el sistema en dos zonas:

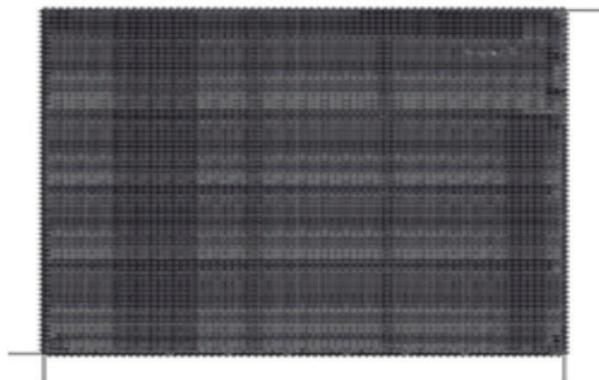
1. plana y cilíndrica: con dos mallas se contempla la cobertura total de ambas zonas
2. troncocónica: se requieren cuatro mallas de acuerdo al número de zonas

**a- Desarrollo de los teje – mallas**

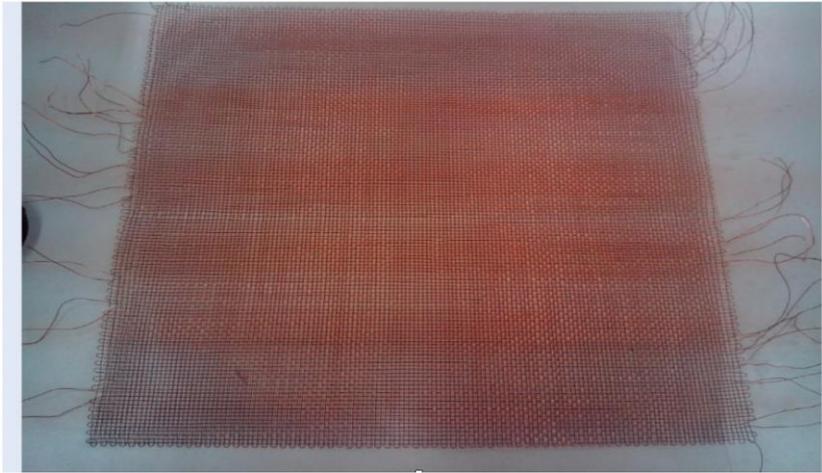
Se anexan las Figuras 2 y 3 correspondientes a las zonas troncocónicas y planas / cilíndricas.

**b- Fabricación de las mallas calefactoras**

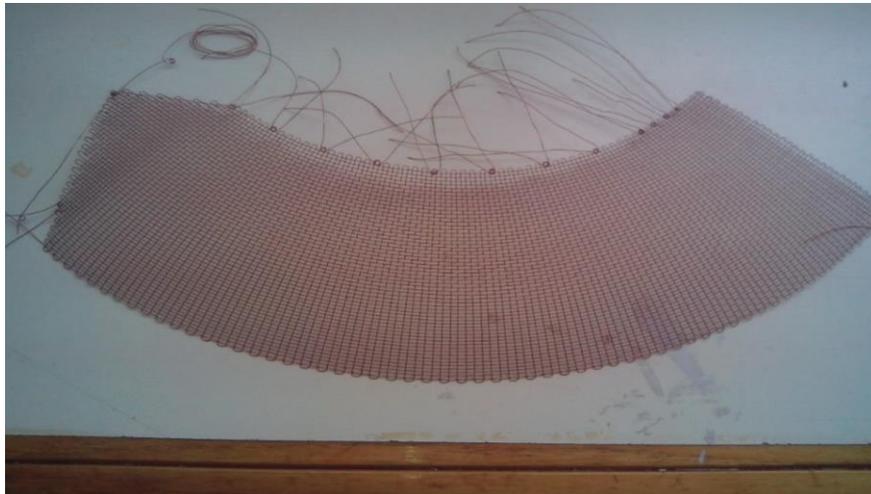
La cuestión central que singulariza el diseño resulta de considerar a la malla en su doble función, como elemento calefactor y sensor de temperatura. Por ello posee una distribución en serie, fabricada con conductores aislados y preformada para las zonas a calefaccionar. En



**Fig. 2. Teje – malla zona troncocónica Fig. 3. Teje – malla zona plana / cilíndrica**



**Fig. 4. Malla zona plana / cilíndrica a escala real**



**Fig. 5. Malla zona troncocónica a escala real**

general introduce concentraciones de esfuerzos por cizallamiento, anexa un peso relativamente importante y una diferente expansión térmica con respecto al material a soldar. Es decir, no se puede perder de vista un dato fundamental: un implante metálico actúa como un contaminante en la zona soldada dado que queda atrapado en la interfaz de soldadura. De ahí que desempeñe un papel clave en el proceso como uno de los principales contribuyentes a la calidad, rendimiento mecánico y capacidad de control del proceso a partir del tipo de material constructivo y sus condiciones geométricas (diámetro de los alambres, espesor, porcentaje de área abierta y relación del material constructivo distancia abierta / diámetro de alambres).

En las Figuras 4 y 5 se muestran las mallas confeccionadas de acuerdo a cada zona.

#### **Desarrollo y fabricación de los moldes insertadores**

Como se ha demostrado en Rukavina *et al.* (2017), cuando una malla metálica es intercalada en una interfaz polimérica semicristalina, el comportamiento de la resistencia con la temperatura y en el tiempo difiere entre el primer calentamiento y los sucesivos restantes. Para solucionar este inconveniente se propone efectuar la inserción de la malla en una de las superficies a unir previamente a la soldadura. Luego esta etapa se convierte en condicionante del



**Fig. 6. Insertador zona cilíndrica**



**Fig. 7. Insertador zona troncocónica**

proceso global dado que define el comportamiento térmico posterior (etapa de soldadura) y los resultados asociados a las solicitaciones mecánicas.

a- Molde insertador zona cilíndrica y troncocónica.

Se muestran la Figura 6 para zona cilíndrica y Figura 7 para zona troncocónica:

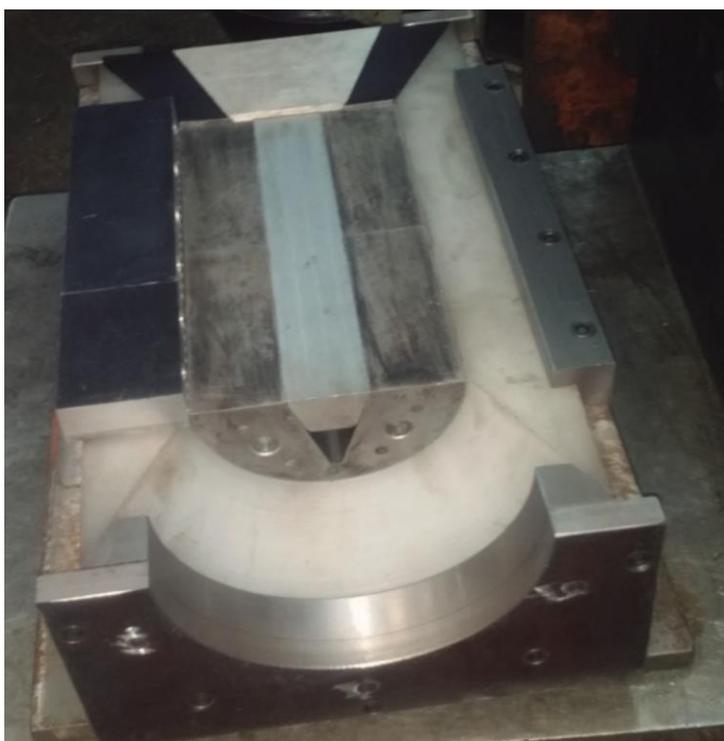
b- Mediacañías con las mallas colocadas listas para el proceso de inserción.

La Figura 8 permite visualizar las mallas correspondientes a cada zona.

c- Media caña con malla e insertadores colocados para efectuar inserción.



**Fig. 8. Media caña con las mallas colocadas para su inserción**



**Fig. 9. Media caña con insertadores colocados para efectuar inserción**

La Figura 9 muestra la media caña con los insertadores colocados en las distintas zonas: cilíndrica, troncocónica y plana.

### Proceso de inserción

Del modelo analizado en profundidad en Rukavina *et al.* (2017) resulta prácticamente imposible aplicar la presión de consolidación a carga total para las condiciones iniciales de estado sólido del polipropileno. La geometría gobierna el sistema independientemente de la perfección constructiva de los insertadores.

En otras palabras, los alambres situados en las áreas de mayor carga final pueden ser dañados con facilidad (cortados) produciendo una discontinuidad conductiva en el circuito eléctrico. Por lo tanto, la carga aplicada en el estado inicial no supera los 500 kg (equivalente a  $0,53 \text{ kg/cm}^2$ ) pudiéndose observar, a partir de los resultados experimentales obtenidos, que es suficiente para lograr el íntimo contacto necesario para la ocurrencia del proceso. A su vez, y para disminuir a un grado máximo los riesgos operativos, se ha decidido colocar entre la malla y los insertadores una película de poliamida Kapton de 50 micrones

de espesor cuyas propiedades eléctricas y físicas superiores se mantienen a temperaturas elevadas (hasta  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

Características principales:

- Aislamiento eléctrico:  $1012 \text{ ohmios-cm}$  a  $200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Densidad:  $1,42 \text{ g/cm}^3$
- Conductividad térmica:  $0,16 \text{ W/m.K}$

Cabe agregar que a temperatura ambiente las propiedades de un film de poliéster y del Kapton son similares. Sin embargo, cuando la temperatura aumenta o disminuye, las propiedades del Kapton son afectadas en menor medida que el poliéster, no reblandeciéndose y proporcionando una superficie muy antiadherente incluso a temperaturas muy elevadas. Asumir esta posibilidad como un parámetro concreto asociado a las variables del proceso ha conllevado a un resultado más que interesante.

### a- Ciclo termomecánico para inserción de las mallas a escala real

Se determina el ciclo de trabajo para la inserción

de las mallas en las mediacañas zonas semicilíndrica, plana y troncocónica:

- Calentamiento de insertadores hasta temperatura de 80 °C a través de las resistencias eléctricas externas incorporadas y medidas con la malla calefactora. En este primer ciclo la malla actúa simplemente como termómetro.
- Alcanzada la  $T = 80\text{ °C}$  se aplica potencia a la malla hasta llegar a una  $T = 170\text{ °C}$  con una pendiente de calentamiento de  $3\text{ °C/segundo}$  mientras sigue calentamiento con insertadores.
- En  $T = 170\text{ °C}$  se mantiene potencia por 6 segundos.
- Se corta la potencia mientras permanecen los insertadores con las resistencias conectadas. Debe verificarse una  $T$  en malla de 110 a 120 °C.
- Se aplica segundo ciclo de potencia para llegar a una  $T = 190\text{ °C}$  con una pendiente de calentamiento ahora de  $1,4\text{ °C / segundo}$ .
- Obtenida la  $T = 190\text{ °C}$  se aplica una carga con equipo hidráulico de 0,22 MPa
- Cumplidos 50 segundos de mantenimiento a 190 °C se corta automáticamente la potencia programada y la calefacción de los insertadores dejando enfriar al sistema con la carga aplicada. De acuerdo a lo establecido en Rukavina *et al.* (2016) los valores de la presión de consolidación resultan:

- Para metodología de aplicación a presión constante: 0,6 a 0,9 MPa

- Para metodología de aplicación a desplazamiento constante: 0,15 a 0,40 MPa

Con lo cual en los ensayos de laboratorio (probetas de 40 mm X 40 mm) y dado que la carga aplicada ha sido a presión constante, el valor considerado para ésta ha sido de 0,735 MPa mientras que para los ensayos a escala real (desplazamiento constante) se toma en consideración una presión de consolidación igual a 0,22 MPa.

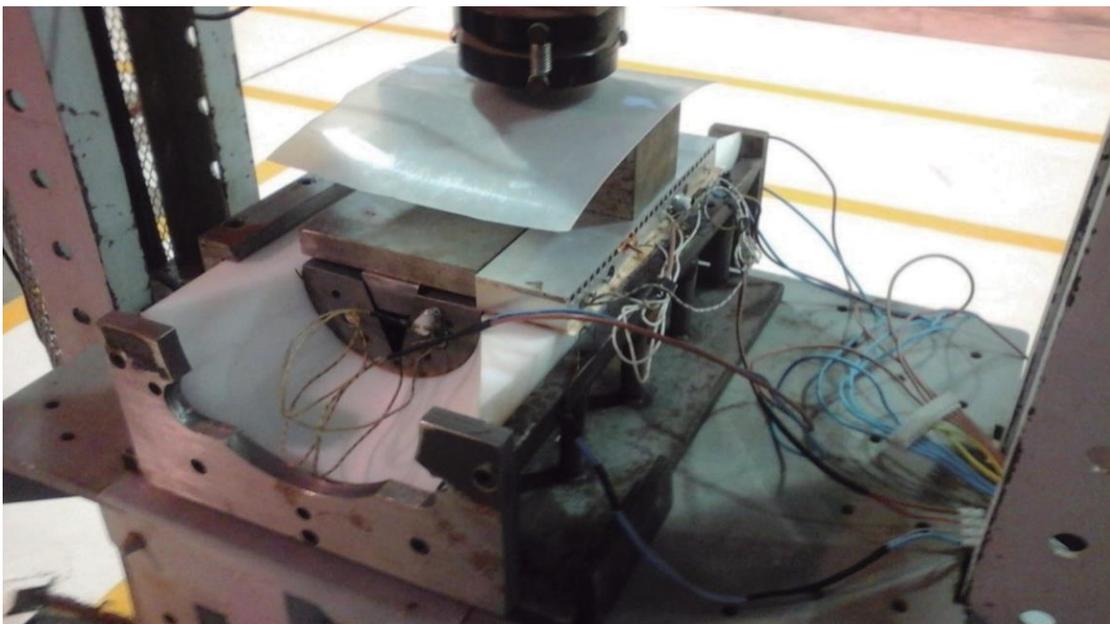
A partir de estos resultados se obtienen dos conclusiones importantes:

- Se cumple la propuesta teórica del estado del arte en la materia

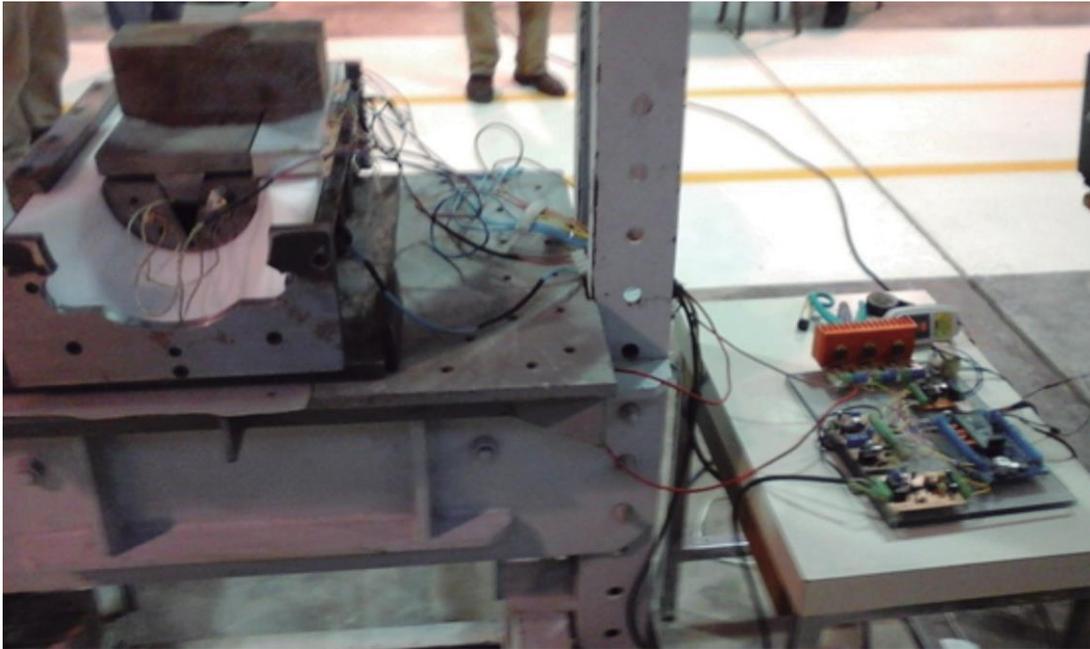
- Definidos la potencia y el tiempo, la presión adquiere un valor "cuasi relativo" y variable de acuerdo a la metodología de aplicación y dentro de ésta con un rango bastante amplio (0,6 a 0,9 MPa para presión constante y 0,15 a 0,4 MPa para desplazamiento constante).

#### **b- Inserción de las mallas en las mediacañas**

La Figura 10 muestra la media caña introducida



**Fig. 10. Inserción en zona cilíndrica - plana introducida en cama de apoyo en equipo de carga hidráulico**



**Fig. 11. Proceso de inserción en zona cilíndrica - plana introducida en cama de apoyo en equipo de carga hidráulico conectado a sistema de potencia y control**



**Fig. 12. Mallas insertadas completamente en ambas mediacañas**

en cama de apoyo en equipo de presión hidráulico lista para conectar a equipo electrónico para efectuar la inserción.

El procedimiento se realiza con equipo electrónico de desarrollo propio (Figura 11).

**c- Visualización final sistema de mallas insertados en las medias cañas**

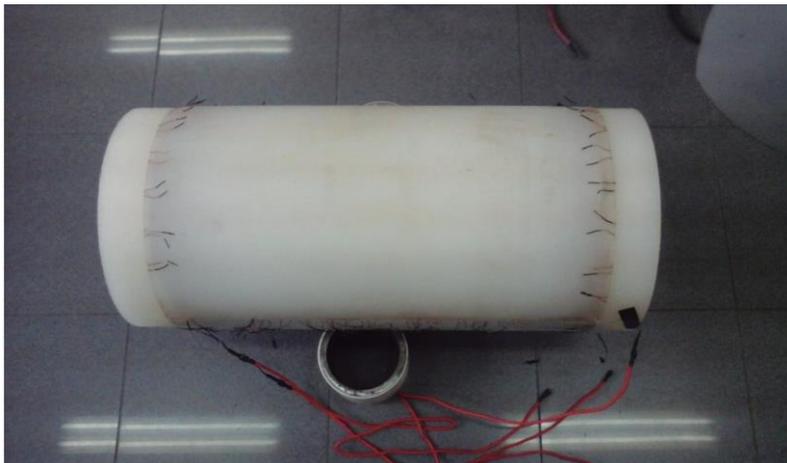
Se puede apreciar en la Figura 12 la totalidad de las mallas insertadas para ambas mediacañas.



**Fig. 13. Encastre de una mediacaña al tubo**



**Fig. 14. Encastre segunda mediacaña al tubo**



**Fig. 15. Mediacañas encastradas. Sistema listo para soldadura**

Ciclo termomecánico para soldadura de tubo mediacañas a escala real. El ciclo comprende dos etapas:  
 a- Encastre de medias cañas

Este procedimiento es fundamental para obtener un cerramiento completo del sistema próximo a ser soldado. Para ello se precalientan las mallas insertadas hasta una temperatura

de ablandamiento (140 – 150 °C) y con aplicación de presión se acomoda cada una de las medias cañas por separado. La carga no es un valor estándar en cuanto que se visualiza la operatoria y se opera manualmente el sistema hidráulico. Una vez logrado el sistema final de inserción se convertiría claramente la carga en un valor conocido.

Las siguientes Figuras 13, 14 y 15 ilustran per-

fectamente la operatoria.

b- Soldadura final a escala real

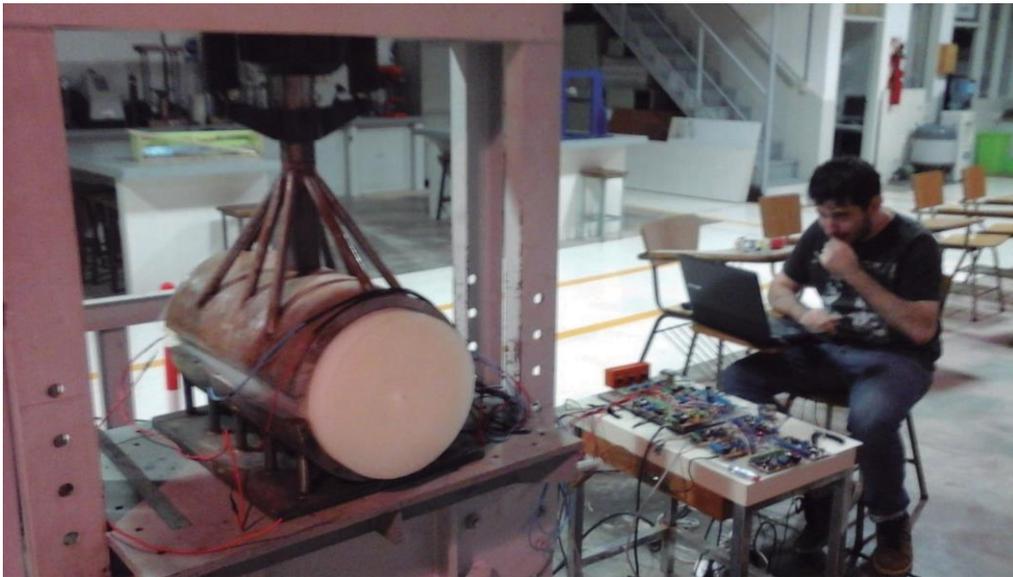
De acuerdo a escala laboratorio se aplican las siguientes condiciones extrapoladas:

1- Aplicación de la carga:

Carga total = 8020 kg

2- Aplicación de potencia:

Se determinan las condiciones de potencia para



**Fig. 16. Soldadura final con aplicación de potencia y carga**



**Fig. 17. Tubo y mediacañas a escala real soldado**



**Fig. 15. Mediacañas encastradas. Sistema listo para soldadura**

una pendiente de 2,5 °C/segundo hasta temperatura final de 230 °C.

El ciclo termomecánico se divide a su vez en dos etapas como parte de un único proceso:

- En primera instancia se aplica potencia para llegar a 190 °C (temperatura en malla) y se mantiene por 15 segundos para aplicar una carga inicial de 3000 kg lo cual permite efectuar correctamente el íntimo contacto para luego continuar con el calentamiento y llegar a los 230 °C. A esa temperatura se mantiene por espacio de 50 segundos que es el tiempo calculado para que pueda comenzar el flujo lateral de material fundido y permita llenar cualquier posible oquedad que hubiera quedado en las interfaces de soldadura.
- Una vez finalizada la operatoria la carga se mantiene compensando el desplazamiento hasta que la temperatura final llega a los 80 °C, momento en el cual se desconecta la misma dando por finalizado el proceso de soldadura.

En las siguientes Figuras 16, 17 y 18 se aprecia el procedimiento de soldadura y el conjunto tubo – mediacañas finalmente soldado.

Se mecaniza el sistema apenas un poco menos de 2 mm para poder apreciar cómo quedan las interfaces. En la zona de discontinuidad de

mallla correspondiente a tronco cono y semi-cilindro se observa una continuidad excelente de material indicando que las condiciones de soldadura han permitido “llenar” correctamente las interfaces con ausencia de elemento calefactor. El resto del sistema indica un correcto funcionamiento de los parámetros asociados a la ventana de trabajo establecida para el proceso a escala final.

## Conclusiones

### Generales

Debido a la naturaleza eminentemente interdisciplinaria de este trabajo, el hilo conductor se ha mantenido en las sucesivas etapas a través de la integración del conocimiento aportado por las distintas áreas intervinientes las que han permitido construir para este propósito una ontología genérica como componente central del proyecto logrando integrar los conceptos específicos del dominio de cada especialidad: la química de materiales, mecánica, electrónica y la modelización por elementos finitos.

La necesidad de obtener un diseño del sistema para una extrapolación posterior hacia su escalabilidad productiva ha inducido a desarrollar un modelo físico experimental eficiente y capaz de predecir el comportamiento a escala final a

través de la aplicación de su correspondiente ventana de trabajo.

El desarrollo del modelo físico se ha intentado nutrir de alguna manera también a partir de una revisión de la exigua literatura existente en el campo de la soldadura por resistencias. Exigua en superficies planas y nula en geometrías de revolución extensas y complejas.

El trabajo teórico se ha vinculado entonces con la caracterización de los principales componentes del proceso, por un lado: material y el elemento resistivo y los parámetros fundamentales y característicos del proceso por el otro: la corriente (densidad de potencia), el tiempo de proceso y la presión de consolidación. La caracterización se ha basado en los fundamentos físico – químicos apropiados y también en determinadas excepciones asociadas con correlaciones empíricas auxiliares.

A partir entonces de la caracterización individual para cada componente se llega a conformar una sucesión de bloques desencaminados basada en una estrategia de simulación. Mediante el acoplamiento de cada uno de los bloques, se logra construir el modelo físico global representando los parámetros de entrada generales, las correlaciones empíricas, las propiedades termo-físicas y los parámetros de salida tendiente a conseguir que el mismo pueda asociarse a un relativo fácil manejo.

El rango de validación surge del análisis de datos experimentales originados a través de una combinatoria de los parámetros enunciados con los que se ha tratado de abarcar el espectro más amplio dentro de los rangos de operación.

### **Conclusiones relativas a los objetivos**

Se ha logrado desarrollar un proceso de soldadura por resistencia a escala laboratorio y escalado a geometría de revolución real de laminados de polipropileno. Macizo y sintáctico en todas sus combinaciones posibles: PPM-PPM, PPM-PPS y PPS-PPS para laboratorio y PPM – PPM para escala real.

- PPM: Polipropileno macizo
- PPS: Polipropileno sintáctico

Los niveles de resistencia a tracción constatados en la fase experimental de ensayos mecánicos han alcanzado valores equivalentes a un 82,58% de los correspondientes a las uniones por fusión de los mismos materiales sin la presencia de agentes de calentamiento.

Los resultados de los ensayos de flexión permiten constatar a través de los resultados de ensayos mecánicos, que para desplazamientos de 20 mm – equivalentes en varias veces a los radios de análisis propuestos – no se han podido observar grietas, fisuras o fracturas. Las uniones soldadas se han caracterizado por niveles nulos de porosidad y altos grados de homogeneidad en las interfaces.

Para el desarrollo de este proceso se ha establecido como condición de partida una aplicación para piezas extensas y de geometría compleja. Este hecho resulta determinante para la formulación de las condiciones de contorno dado que se toman las siguientes decisiones previas:

- Utilización de malla metálica como agente de calentamiento aislada eléctricamente.
- Metodología para aplicación de la densidad de potencia.
- Metodología para la aplicación de la presión de consolidación.

Las condiciones de contorno impuestas por la aplicación final del sistema a desarrollar permiten luego determinar los valores asociados a los parámetros del proceso (intensidad de corriente, tiempo de soldadura y presión de consolidación), y establecer su rango de variación en la búsqueda de una superior calidad final de las uniones soldadas.

### **Conclusiones relativas al proceso**

Permiten extraer una serie de conclusiones que pueden ser consideradas como aportes originales dentro del campo de la soldadura de termoplásticos por metodología de resistencias:

- a) El agente de calentamiento en su configuración serie.
- b) La geometría de revolución.
- c) El sistema de generación de potencia y control de temperatura en la interfaz.
- d) El proceso de inserción previo a la soldadura

e) Película de Kapton entre insertadores y malla de cobre.

f) La modelización como herramienta fundamental.

Una síntesis de los mismos se repasa a continuación:

A) El agente de calentamiento en su configuración serie.

La visión de la problemática asociada al proyecto global en estudio – media cañas de geometría compleja - permitió inferir que no era factible usar las mallas desde su concepción de circuito en paralelo, dando origen a partir de un análisis racional a un cambio radical en las características constructivas de la malla.

Resultaba imperioso resolver las siguientes cuestiones:

1. Lograr que se adaptara al formato de la soldadura garantizando así la distribución homogénea de calor en toda la superficie.
2. Que la alimentación eléctrica tuviera una solución realizable de conexionado con la fuente de energía eléctrica.

A partir del esquema de las mediacañas resulta suficientemente claro que de utilizarse la configuración convencional (un rectángulo alimentado en paralelo entre los extremos), en la zona más simple, la asociada a la cilíndrica, existiría una invalidación asociada a la superposición de las mallas.

B) La geometría de revolución

Las características geométricas de la superficie a soldar son las que terminan definiendo que no es posible utilizar una malla metálica sin aislación (circuito en paralelo) debido a las siguientes razones:

1. En la zona cilíndrica / plana habría superposición y cortocircuito.
2. La característica irregular de la zona tronco-cónica imposibilitaría una circulación homogénea de corriente en el caso en que se pudiera conectar.

Se asume entonces que la malla debe ser tejida

con un solo alambre de tal manera que la misma sea un solo circuito. Esto es: todos los hilos de la cadena están en serie, todos los hilos de la trama están en serie y estos a su vez están en serie. De tal manera que cada circuito tiene un solo par de terminales y la corriente es la misma para cada diferencial de malla.

Con esto se logra distribución uniforme de corriente / temperatura y un solo par de puntos de conexión con la fuente de potencia con una ventaja adicional asociada a la baja corriente con lo que se simplifica sustancialmente el conexionado rápido a la fuente de potencia ya que no se necesita un cable de gran sección ni terminales especiales.

Luego, y en resumen, esta proposición cumple los requisitos esenciales:

- Posibilidad de alimentación eléctrica desde un mismo lateral.
- No existe superposición de mallas calefactoras en ningún punto del volumen.
- Distribución homogénea de temperatura.
- Posibilidad de controlar y medir la temperatura del alambre y del polímero.
- Simplicidad en los puntos de conexión eléctrica debido al uso de bajas corrientes.

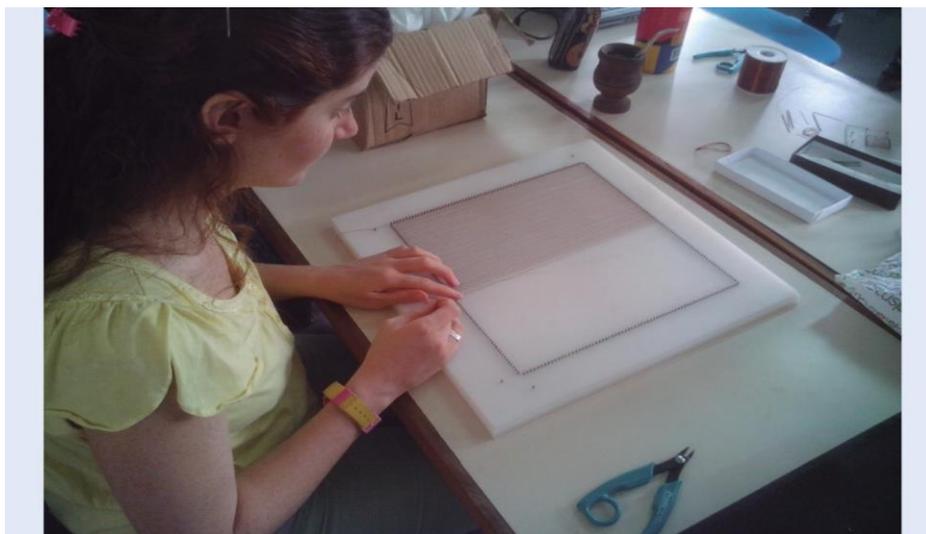
C) El sistema de generación de potencia y control de temperatura en la interfaz

La cuestión central que ha singularizado el diseño establece que la malla cumpla la doble función de elemento calefactor y sensor de temperatura. Esto resulta ser de vital importancia dado que el elemento crítico es la aislación eléctrica del conductor (cobre en este caso) frente a la imposibilidad de superar una temperatura crítica de 300 °C por encima de la cual el recubrimiento pierde sus propiedades intrínsecas y deja de ser un aislante.

La idea madre asociada al equipo de medición y control se refiere fundamentalmente a la posibilidad de cumplir con la requisitoria de ser lo suficientemente versátil como para servir en todas las fases del proyecto.

En principio se consideraron dos etapas fundamentales:

1. Medición de temperaturas, caracterización



**Fig. 18. Interfaces de soldadura mecanizadas para verificación resultados**

de mallas, ensayo y soldado de probetas para su posterior utilización en los ensayos de caracterización.

2. Control automático en la soldadura de las mediacañas a escala real.

A su vez la potencia se modifica durante el proceso para obtener una región constante de temperatura. Esta metodología requiere información en tiempo real de la temperatura desarrollada en la interfaz de soldadura y por lo tanto una realimentación de la información del avance del proceso.

Sobre esta posibilidad hay muy poca información disponible con lo cual haberla desarrollado implica un avance más que interesante en la metodología de trabajo.

Para el control se ha utilizado metodología indirecta esto es medir la resistencia eléctrica de la malla para obtener su temperatura, cuestión muy poco tratada en el estado del arte debido al no estacionario de la resistencia con la temperatura.

D) El sistema de inserción de las mallas en las medias cañas

Se ha optado por la utilización de insertadores de aluminio teflonados y calefaccionados por resistencias con control de temperatura independiente del control general diseñados

específicamente para el proyecto. Una para la geometría cilíndrica y plana y otro para la troncocónica con el resto de geometría plana.

El hecho de ser calefaccionados con una masa de aluminio realmente importante ha ayudado enormemente en el proceso de transferencia de calor impidiendo que la potencia destinada para el calentamiento de la malla fuese derivada para el calentamiento de los insertadores. Este balance energético ha resultado crucial para poder "jugar" con la potencia sin llegar a utilizar su techo de valores superiores extremos.

Si bien la geometría de revolución no resulta ideal por las diferencias de presión implícitas y observables en la superficie de las medias cañas una vez aplicada la carga, el diseño preciso de los insertadores ha permitido mantener bajo control ese desajuste propio del sistema llevando a cabo la operatoria sin grandes percances.

E) Película de Kapton

La película de este polímero introducida entre los insertadores y la malla ha resultado fundamental en el desarrollo a escala real del procedimiento de inserción. Sus elevados coeficientes de aislación térmica y eléctrica, sus propiedades mecánicas prácticamente únicas y su elevada temperatura de utilización lo fueron convirtiendo en un aliado de características sobresalientes para las etapas previas a la soldadura.

## F) Modelización por elementos finitos

Se llega a la conclusión de que el modelo elastoplástico de Drucker Prager modificado ha permitido simular en forma correcta los procesos termomecánicos asociados a la soldadura y a los posteriores ensayos de rotura de probetas de geometría plana.

En el plano de soldadura la temperatura inducida por la malla de cobre puede considerarse a los efectos del modelado numérico como uniformes. Luego se concluye que los procesos de soldadura pueden modelarse imponiendo directamente la temperatura de la malla sobre el plano de soldadura.

El modelo asumido ha permitido no solo lograr un excelente ajuste entre los resultados experimentales y numéricos sino también explorar y experimentar los rangos de validez y de control de los parámetros.

## Nota aclaratoria

Tal como se aprecia en la Figura 19 la fabricación de las mallas calefactoras se ha efectuado en forma manual. En virtud del aumento de la longitud de los alambres con el propio recorrido para la fabricación resulta imposible comenzar y terminar una malla con el mismo hilo. La tensión que adquiere resulta inmanejable. Luego los alambres se cortan y unen para no perder continuidad formando esos "pseudo flecos" que se ven saliendo de las piezas a soldar (Figuras 4, 5, 13, 14 y 15).

Cabe aclarar que en fabricación a nivel industrial resulta posible obtener un tejido de hilo único sin terminaciones salientes de malla en las interfaces de soldadura.

## Referencias

- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M.C., HIGES, M., FERRARI, C., (2016). Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja en PROYECCIONES, UTN BA, año 14, n°2, octubre de 2016.
- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M.C., HIGES, M., FERRARI, C., DINIELLO FELIPE (2017). Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja en PROYECCIONES, UTN BA, año 15, n°2, octubre de 2017.