

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

## Parte 1: Introducción al marco general

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

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, IDETQA, Investigación y Desarrollo en Tecnologías Químicas Aplicadas, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>2</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

<sup>3</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Extensión áulica Bariloche, Fanny T. de Newbery 111, Bariloche, Río Negro, Argentina

*juanrukavina@gmail.com*

*Recibido el 12 de marzo de 2016, aprobado el 22 de junio de 2016*

### Resumen

La soldadura por resistencias de materiales termoplásticos posibilita un ensamble fiable y competitivo para el conformado de estructuras complejas y extensas. Basa su ventaja en la capacidad de fluir de los materiales termoplásticos. Cuando son calentados a temperaturas superiores a la de fusión propician un mojado interfacial estableciendo un proceso de contacto íntimo y difusión molecular entre las caras a soldar. La recuperación de las propiedades iniciales se efectúa a partir del control de los mecanismos de recristalización asociados a la etapa de enfriamiento.

**PALABRAS CLAVE:** POLÍMEROS – TERMOPLÁSTICOS – SOLDADURA - MALLAS CALEFACTORAS - ESTRUCTURAS COMPLEJAS

### Abstract

Resistance welding of thermoplastic materials allows a reliable and competitive assembly for manufacturing complex and extensive structures. This process bases its advantage on the flowability of thermoplastic materials. When heated at temperatures above the melting point they allow interfacial wet, establishing intimate contact and molecular diffusion processes between the faces to be welded. Recovery of initial properties is accomplished by controlling the mechanisms associated with recrystallization during the cooling step.

**KEYWORDS:** POLYMERS – THERMOPLASTICS – WELDING - RESISTANCE HEATING MESHES - COMPLEX STRUCTURES

## Introducción

Las matrices termoplásticas caracterizadas por una microestructura formada por cadenas poliméricas lineales, sin entrelazar, no requieren de reacciones de polimerización o curado en los procesos de fabricación donde se ven involucradas. Estas importantes características aunadas a una alta tenacidad, buena resistencia mecánica y química, baja absorción de humedad y capacidad de reproceso, permitieron introducir un cambio en las tendencias de empleo de los materiales poliméricos causando un fundamental impacto en los avances tecnológicos a través de:

- una significativa reducción de costos en la producción a partir de los cortos tiempos de procesado en comparación con los largos ciclos de polimerización requeridos para la utilización de los compuestos con matriz termoestable
- nuevos procesos de fabricación, como lo son los ensambles por soldadura, sostenidos exclusivamente en cambios físicos: reblandecimiento (como disminución de la viscosidad), fusión y solidificación, en ausencia total de reacciones químicas.

Se establece así una alternativa de solución válida a la problemática asociada a la utilización de materiales compuestos y con propiedades altamente aislantes. Las matrices poliméricas de baja densidad como soporte a un relleno con propiedades muy diferentes, abren un abanico de posibilidades en la fabricación de compuestos que ofrecen una combinación de soluciones y una diversidad de aplicaciones imposibles de obtener con metales, cerámicos o polímeros solos.

Sin embargo existe aún una elevada dicotomía entre el desarrollo del creciente potencial en las utilizaciones de alto rendimiento de los compuestos de fibra continua de termoplásticos reforzados y la limitada deformación del refuerzo de las fibras. La producción actual de productos manufacturados asociados a esta tipología de materiales debe hallar sustento entonces en el conformado a través de geometrías simples, lo que implica que para el logro de estructuras complejas la unión de los componentes resulta ser un proceso inevitable. Es decir la forma lógica de obtener piezas de geometría extensa y compleja es a través de una técnica de unión por soldadura que posibilite la manufactura fi-

nal de las mismas, dando uso al pleno beneficio disponible por las altas resistencias de los materiales compuestos.

Asimismo, los procesos industriales que requieren calentamiento presentan serios problemas cuando se trata de materiales aislantes. Si éstos poseen una masa relativamente elevada la penetración de calor desde la superficie es muy lenta por conducción térmica y, si resultara necesario acelerar los procesos, se podrían producir sobrecalentamientos superficiales, conduciendo inevitablemente a sostenidos mecanismos de envejecimiento debido a las condiciones inestables o reactivas de los enlaces covalentes.

En contrapartida, la unión por soldadura posibilita fundir en forma localizada sólo pequeñas porciones de material sin afectar el resto del esquema estructural. El enfriamiento se produce en un breve intervalo, en total concordancia con la masa calentada. En consecuencia, se verán anulados todos los probables factores degradativos –irreversibles en el tiempo– asociados al cambio en cualquiera de las propiedades originales de los materiales tanto en las zonas remotas como en la interfaz de soldadura.

De igual forma que la unión adhesiva, la unión por soldadura de materiales termoplásticos permite la eliminación de las concentraciones de tensiones que pudiesen ser causadas por uniones mecánicas; sin embargo difieren notablemente los tiempos de los respectivos procesos, siendo los de soldadura mucho menores. Los niveles de resistencia mecánica alcanzados superan en un 50% a los de las uniones adheridas con lo cual resulta factible deducir que los termoplásticos cristalinos compatibilizan mejor su unión a través de la aplicación de calor que por la utilización de adhesivos. Luego y en términos generales, la propia técnica de unión, es decir la soldadura y específicamente por resistencias, si bien resulta el camino a transitar en la metodología a utilizar, aún no se la puede considerar como un proceso que ha alcanzado su etapa de madurez. Todavía se deberán resolver un número no menor de problemas tales como la multiplicidad de parámetros que actúan en simultáneo, las incertidumbres en las técnicas de medición y fundamentalmente las no linealidades asociadas a las variables espacio-temporales. Es por todo ello que cada proceso de soldadura tiene un único conjunto de parámetros que lo viabiliza.

Por otro lado resulta válido presuponer que cualquier estructura es solo tan fuerte como lo es su eslabón más débil, y como consecuencia, las uniones entre las partes de una interfaz se convierten precisamente en el eslabón débil. Por lo que este camino específico de desarrollo tiene una doble finalidad: convertir el eslabón en un constructo asociado a elevados valores en sus propiedades mecánicas y, a su vez, permitir mantenerlos dentro de esos límites a través del tiempo.

Frente a esta conjunción de necesidad–posibilidad de solución, resulta lógico e ineludible circunscribirse y centrarse en los parámetros fundamentales que rigen el proceso de unión por soldadura y sobre los principales fenómenos que impactan en su calidad, es decir: los parámetros y condiciones de contorno que permitan una solución efectiva a las limitaciones expuestas.

### Comparación entre las distintas técnicas de unión-soldadura de polímeros

En la tabla siguiente se visualizan las diferentes técnicas de unión calificando de 0 (menos adecuada) a 10 (más adecuada) las distintas variables consideradas indispensables para la toma de decisión.

Si bien es cierto que la soldadura por inducción supera por escaso margen a la efectuada a través de resistencias, resulta imposible de aplicar para el caso en estudio, es decir cuando la matriz polimérica a soldar se halla unida a su vez a una estructura de acero. Aunque la soldadura por ultrasonido adquiere una valoración positiva, las diferencias encontradas en los ítems correspondientes a unión a gran escala (8/5) y reprocesamiento (8/5) desestiman su posibilidad de uso.

**Tabla 1. Comparación de técnicas de soldadura. Adaptado de Silverman *et al.* en Ageorges *et al.* 2001**

	Sujeción mecánica	Unión con adhesivo	Soldadura por resistencia	Soldadura por ultrasonido	Soldadura por inducción	Técnicas de dos etapas
<b>Desempeño</b>	4	10	10	10	10	10
<b>Reproducibilidad</b>	10	5	8	9	9	9
<b>Durabilidad</b>	5	5	8	9	8	9
<b>Costo<sup>a</sup></b>	2-7	3-7	7-6	8-6	7-6	7-5
<b>Tiempo de proceso</b>	2	0	8	10	8	7
<b>Mínima preparación de la superficie</b>	2	2	10	10	10	10
<b>Flexibilidad</b>	10	10	5	5	7	7
<b>Unión a gran escala</b>	10	10	8	5	8	2
<b>Inspección en línea</b>	5	10	10	10	10	5
<b>Automatización/ Entorno de producción</b>	10	10	10	10	10	10
<b>Portabilidad/ Aplicación para reparar</b>	10	10	8	7	7	8
<b>Reprocesamiento/ Reciclado</b>	10	0	8	5	8	2
<b>Amigable con el medio ambiente</b>	10	2	8	8	8	8

<sup>a)</sup> el primer valor corresponde a pequeños volúmenes de producción, por ejemplo menores a 10 piezas. El segundo valor corresponde a grandes volúmenes de producción.

La sumatoria de calificaciones resulta para los distintos tipos de unión:

**Tabla 2. Sumatoria de calificaciones variables asociadas**

	Sujeción mecánica	Unión con adhesivo	Soldadura por resistencia	Soldadura por ultrasonido	Soldadura por inducción	Técnicas de dos etapas
<b>TOTAL</b>	<b>95</b>	<b>81</b>	<b>107</b>	<b>104</b>	<b>109</b>	<b>92</b>

### Estado del arte

A nivel internacional se destacan diversos institutos, centros y universidades:

- *TU Delft Faculty of Aerospace Engineering Design and Production of Composite Structures*, Holanda

- *Mc Gill University* y el Instituto de Investigaciones Aeroespaciales, Canadá

- *Centre for advanced materials technology, Department of Mechanical and Mechatronic Engineering, The University of Sidney, Sidney*, Australia.

- *Cooperative Research Centre for Aerospace Structures Ltd., Bankstown*, Australia

cuyos equipos de trabajo fundamentan sus trabajos en la investigación de:

- nuevos materiales avanzados (polieterimida, polisulfuro de fenileno);
- la progresiva sustitución de material estructural aeronáutico metálico por compuestos poliméricos
- la unión mediante calentamiento por resistencia entre materiales de origen diferenciado: aluminio con laminados de termoplásticos reforzados o entre compuestos termoplásticos y termoestables y
- un ya indiscutido interés en la utilización de mallas metálicas como elementos calefactores.

Una mención especial requiere el grupo de Labradoro, Villegas *et al.* de la Universidad de Delft de Holanda, Facultad de Ingeniería Aeroespacial. Este grupo trabaja en el Proyecto Tapas (*Thermoplastic Affordable Primary Aircraft Structure*) el cual lleva a cabo el reemplazo de materiales metálicos por compuestos

poliméricos soldados a partir de resistencias en los aviones Airbus.

En la actualidad se encuentra en pleno proceso el TAPAS 2 que efectúa el desarrollo de una sección de cola a fabricar totalmente en material compuesto termoplástico. Se continúa con el modelo del primer desarrollo a gran escala de componentes del fuselaje realizadas con materiales compuestos termoplásticos producidos durante TAPAS 1. La utilización de compuestos termoplásticos ligeros ofrece un ahorro en el peso del 15% en comparación con los materiales tradicionales de aviones, lo que reduce el consumo de combustible, aumenta las posibilidades de carga y alcance del avión de pasajeros.

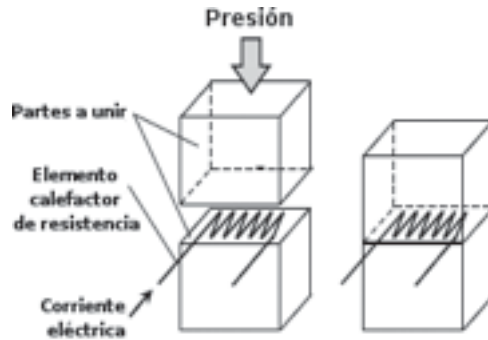
### Esquema teórico

En síntesis la soldadura por resistencias se caracteriza por utilizar, a partir de un ciclo temperatura–presión–tiempo, corriente eléctrica para calentar un implante resistivo (malla), conocido como agente de calentamiento, situado entre los materiales a unir (Figura 1).

Por efecto Joule la temperatura en la interfaz se eleva fundiendo al polímero circundante permitiendo llevar a cabo un mojado superficial con la consiguiente interdifusión de las cadenas poliméricas de ambas partes a soldar, consolidándose bajo la aplicación de una determinada presión (Ageorges and Ye, 2000a; 1998a; 1998b; 1998c; 2000b; 2000c; Arias, 1996.).

Luego, es factible efectuar una unión soldada utilizando la propia matriz termoplástica como adhesivo tomando en consideración:

- a). las restricciones de operación: imponen decisiones, es decir las condiciones a fijar con antelación al proceso mismo:



**Fig. 1. Esquema básico del proceso de soldadura por resistencias**

- 1- características de los materiales a soldar
- 2- preparación superficial
- 3- geometría de la zona a soldar
- 4- caracterización del elemento calefactor
- 5- metodología para aplicación de la corriente eléctrica
- 6- metodología para aplicación de la presión de consolidación

b). los parámetros asociados al proceso: quedan determinados por las restricciones y operan directamente sobre la calidad final de la unión:

- 1- intensidad de corriente → Temperatura de proceso
- 2- presión de consolidación
- 3- tiempo de soldadura

c). las etapas del proceso: identifican la evolución del proceso global de soldadura estableciendo en definitiva la ventana de trabajo:

- 1- calentamiento
- 2- consolidación
- 3- enfriamiento

A partir de estas consideraciones a continuación se lleva a cabo el desarrollo teórico que permite validar un modelo resultante de un conjunto operativo de restricciones y parámetros necesarios para la optimización de la ventana de trabajo del proceso.

## Restricciones de operación

### Características de los materiales a soldar

Para que la soldadura sea efectivamente viable los materiales utilizados deben ser capaces de fluir a la temperatura del proceso. Los semicristalinos comienzan a fluir cuando

tiene lugar la completa desaparición de sus grupos cristalinos. Por ende, la temperatura de proceso debe ser superior a su temperatura de fusión. Ahora bien, el sustrato, al elevar la temperatura por encima de ciertos límites, comienza a sufrir los efectos de reblandecimiento. Por lo tanto, en la soldadura deben emplearse técnicas que logren circunscribir el calentamiento a una pequeña zona en torno a la interfaz de unión.

La calorimetría diferencial de barrido (DSC) permite efectuar un análisis de las transiciones térmicas asociadas a un polímero. A medida que se va elevando la temperatura se obtiene un incremento en la capacidad calorífica encontrándose inicialmente sometidos a una transición vítrea. El cambio no ocurre repentinamente sino que tiene lugar a través de un rango de temperaturas impidiendo de alguna manera escoger una temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) discreta, para lo cual generalmente se toma como  $T_g$  el punto medio del rango en estudio.

Por encima de la  $T_g$  los polímeros poseen una gran movilidad y cuando alcanzan la temperatura de cristalización ( $T_c$ ) han incrementado su energía de tal forma que les permite adoptar una disposición cristalina sumamente ordenada, liberando calor (transición exotérmica).

Si se grafica y mide el área bajo la curva se obtiene la energía latente de cristalización del polímero. Esto es una clara indicación de que el polímero es capaz de cristalizar.

Si se continúa con el calentamiento por encima de la  $T_c$  se logra otra transición térmica: la fusión. Cuando se alcanza la temperatura de fusión ( $T_m$ ), los cristales poliméricos comienzan a separarse porque evidentemente se

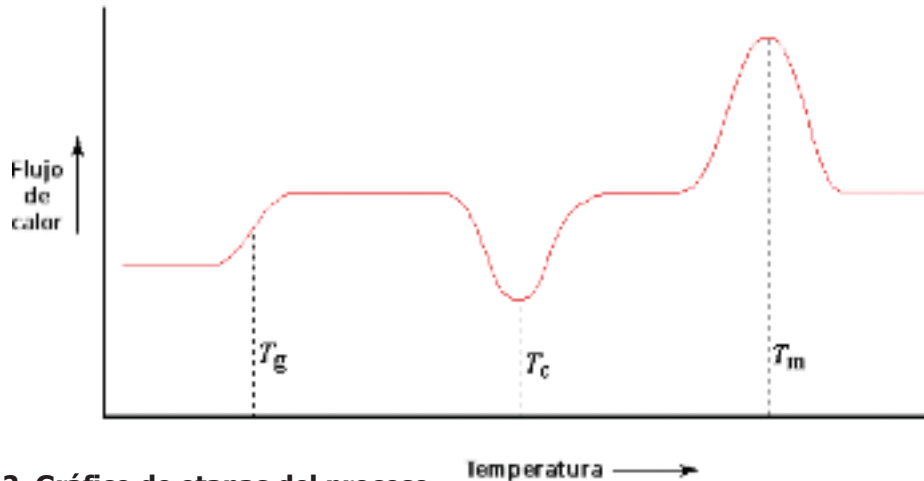


Fig. 2. Gráfico de etapas del proceso

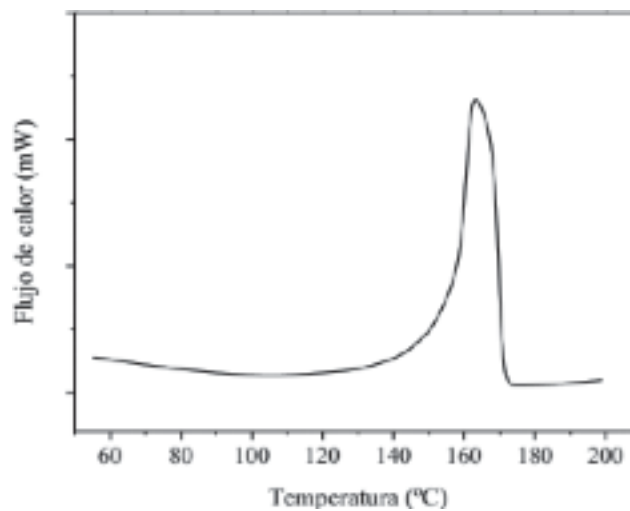


Fig. 3. Caracterización de polipropileno puro vía DSC

funden. Las cadenas abandonan sus arreglos ordenados y comienzan a moverse libremente. Existe un calor latente de fusión, como antes también un calor latente de cristalización. Cuando los cristales poliméricos funden deben absorber calor y una vez alcanzada la temperatura de fusión, la temperatura del polímero no se incrementará hasta que hayan fundido todos los cristales. Resulta posible calcular el calor latente de fusión nuevamente midiendo el área bajo la curva. Dado que se ha suministrado energía para que el polímero funda la fusión resulta ser una transición endotérmica.

Luego si se unifica todo el procedimiento surge el siguiente esquema:

La cristalización y la fusión solo aparecerán en los polímeros capaces de cristalizar, caso contrario a los completamente amorfos. En cambio aquellos polímeros que contengan do-

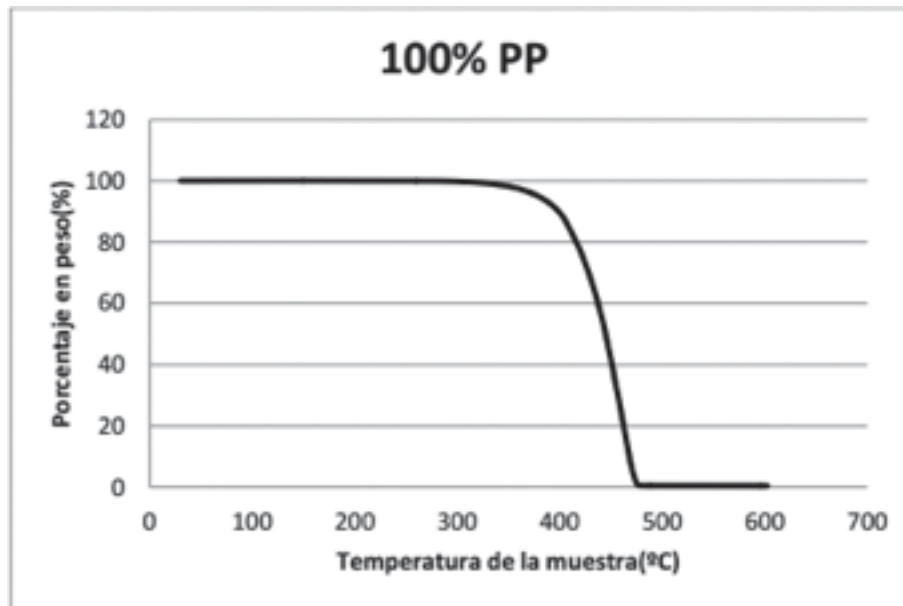
minios tanto cristalinos como amorfos, mostrarán todas las posibilidades tal cual lo expresa la Figura 2.

Finalmente, se observa una diferencia entre la transición vítrea y las transiciones asociadas a la cristalización y fusión. En el caso de la transición vítrea no hay ni depresión ni pico, porque no hay calor latente entregado o absorbido, solo existe un cambio en su capacidad calorífica, pero la fusión y la cristalización sí involucran entrega o absorción de calor, es decir existencia de calores latentes.

Se puede observar en la Figura 3 el ensayo de caracterización de polipropileno puro (Repsol) vía DSC pudiendo obtenerse dos datos importantes:

Temperatura de fusión:  $T_m = 163,3 \text{ }^\circ\text{C}$





**Fig. 4. Análisis termogravimétrico de polipropileno puro**

Entalpía de fusión:  $\Delta H=95,3$  J/g

A su vez en la Figura 4 se muestra el ensayo obtenido mediante TGA (análisis termogravimétrico) para el mismo polipropileno puro.

En el estudio de TGA se obtienen las temperaturas de inicio y fin de la descomposición:

T de inicio:  $T_i=411,5$  °C

T de fin:  $T_f=472,7$  °C

Intervalo:  $\Delta T=61,2$  °C

### Preparación superficial

La presencia de contaminantes—fundamentalmente agentes desmoldantes— en las superficies a unir en principio no es tan determinante como para el caso de uniones adheridas. Los trabajos bibliográficos no recogen datos precisos sobre el efecto del estado superficial de los sustratos en la calidad de la soldadura por resistencia.

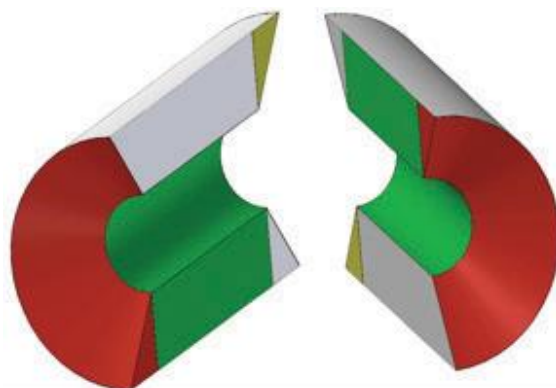
El grupo de trabajo de Xiao *et al.* (1990) propone una ligera abrasión mecánica. El equipo de Mcknight S. *et al.* (1997) especifica el uso de desengrasantes (acetona).

Otros investigadores, D. Sierksma (2001) entre ellos, proponen como válida la ausencia de cualquier tipo de preparación superficial.

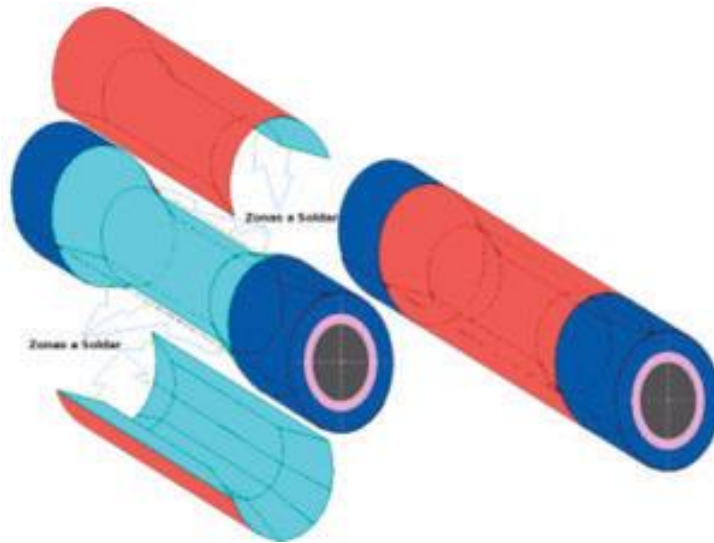
Luego surge como realista la necesidad de establecimiento de una metodología experimental idónea de preparación para cada sistema en estudio.

### Geometría de la zona a soldar

El enorme desafío surge a partir del conocimiento fundamentado en cuanto que todos los desarrollos logrados hasta la actualidad han basado la aplicación de esta metodología en piezas planas de geometría simple. Muy por el contrario el objetivo final de este trabajo ha sido el de resolver la problemática asociada a la unión de piezas extensas, planas y no planas, como se visualiza en la Figuras 5 y 6.



**Fig. 5. Esquema de piezas a soldar desde su concepción eléctrico-térmica**



**Fig. 6. Vista desde la concepción de estructura final soldada**

### Caracterización del elemento calefactor

El elemento de calentamiento desempeña un papel clave en el proceso de soldadura por resistencia dado que suministra la energía necesaria para efectuarla convirtiéndose en uno de los principales contribuyentes a la calidad, rendimiento mecánico y capacidad de control del proceso a partir del tipo de material y sus condiciones geométricas.

Uno de los problemas a resolver se asocia al esquema térmico el cual lleva implícita la obtención de los campos de temperaturas que resultan en el polímero como consecuencia de la introducción de potencia calorífica por parte de la malla conductora (Figuras 7 y 8).

Dicha potencia térmica ingresa al sistema desde el medio externo en forma de potencia eléctrica, la cual por efecto de la resistencia eléctrica del

conductor y del pasaje de corriente a través del mismo se convierte en potencia térmica. Esta puede ser modelada a través de una fuente volumétrica equivalente de calor, la cual al estar representada por una función dependiente del tiempo, es capaz de reproducir el efecto calefactor que gobierna la mayor parte del proceso. Las rampas de potencia eléctrica que se debe aplicar al sistema determinan, junto a las características geométricas y físicas del medio, los campos de temperaturas que se producen en el polímero, y en particular en las zonas de la unión soldada.

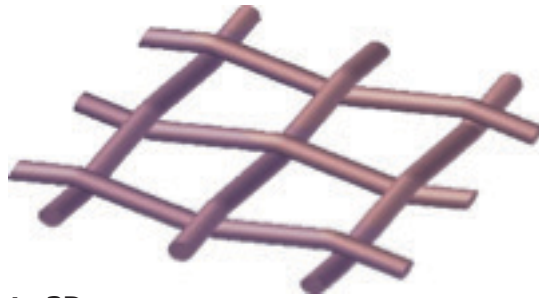
Dado que tanto la malla conductora como el polímero que se encuentra a su alrededor son materiales sólidos, el problema térmico responde a la ecuación de Poisson transitoria para propiedades termofísicas de los materiales con comportamiento no lineal y para una fuente volumétrica variable con el tiempo.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 (kT) + Q \quad \text{en } \Omega$$

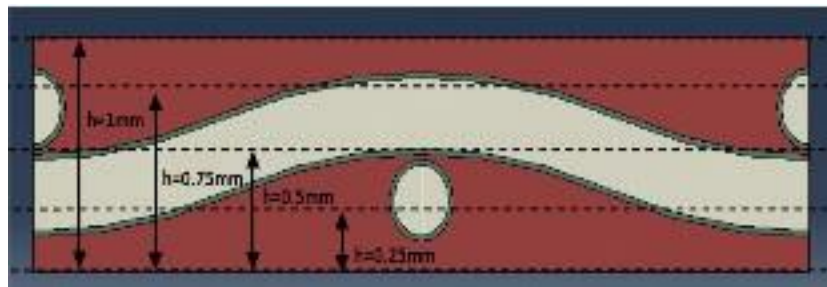
Donde:

- $\Omega$  es el dominio del problema, el cual puede estar formado por varios subdominios o materiales.
- $\rho$  es la densidad del medio.
- $C_p$  es el calor específico del medio.
- $k$  es la conductividad térmica del medio.
- $Q$  es una fuente volumétrica que depende del tiempo.





**Fig. 7. Malla plana en vista 3D**



**Fig. 8. Vista de la malla embebida en el polímero**

La no linealidad se debe fundamentalmente a que las propiedades térmicas, físicas y mecánicas de los materiales, en particular del polipropileno como material de utilización y análisis en este trabajo, varían considerablemente con la temperatura.

Por las características del problema, la transferencia de calor se halla gobernada por el mecanismo de conducción o difusión de calor en sólidos, resultando despreciables los de convección y radiación. En consecuencia el flujo de calor parte desde el seno del conductor metálico y se dirige a través del mismo hacia el polímero, donde se distribuye en función de las resistencias térmicas existentes, y que son dependientes de la geometría del sistema. Dado que el objetivo final consiste en lograr un calentamiento lo más uniforme posible en la zona de la soldadura del polímero, un factor con incidencia no menor en el desarrollo del fenómeno térmico resulta ser la forma en que se genera la fuerza impulsora que gobierna la conducción de calor en el medio. Ello depende fundamentalmente de las temperaturas de la malla y del polímero como así también de la distribución espacial de los conductores que conforman el elemento calefactor. Por ende, tanto el diámetro de los alambres como así también el espaciado y el tramado de la malla se convierten en variables características del proceso en la búsqueda

de soluciones de compromiso entre una mayor homogeneidad en el calentamiento (valores bajos de abertura de malla) y una mejor difusión (mallas con valores altos de abertura).

En términos generales cualquier material conductor de la electricidad podría ser utilizado como elemento de calentamiento (Shi, *et al.*, 2011). Sin embargo, los dos únicos materiales descritos en la literatura son las fibras de carbono y las mallas metálicas de acero inoxidable y estas últimas con o sin recubrimiento de dióxido de titanio. Muy pocos estudios se han realizado con respecto a los materiales de fabricación de las mallas del elemento calefactor (Shi, *et al.*, 2011; Hou, 1999; Reddy, 2002 y Sierksma, 2002). De todas formas de los mismos puede concluirse que las mallas metálicas ofrecen algunas ventajas cuando se establece una comparación con los elementos a base de fibras de carbono (CF), convertidas en fundamento y razón para el aumento de su uso en los últimos años. Los estudios de análisis de fractura mostraron una muy buena unión entre la malla y el polímero de la matriz (Hou, 1999) produciendo soldaduras con una mayor resistencia mecánica media (Shi *et al.*, 2011) y una menor sensibilidad a las variaciones de los parámetros, con lo cual conducen ventajosamente a una mayor ventana de procesamiento.

Las mallas construidas con fibras de carbono validaron su uso en el principio de compatibilidad con la matriz del sustrato cuando la misma está conformada por polímeros reforzados con fibra de carbono en virtud de la naturaleza semiconductor de la fibra. Sin embargo, experimentalmente surgieron grandes problemas a partir de la sensibilidad demostrada de las conexiones eléctricas a la malla, evidenciando ausencia de repetitividad en los resultados.

Principales ventajas y desventajas de las mallas metálicas resultan ser:

#### Ventajas

- a causa de su isotropía en las propiedades eléctricas permite una mayor reproducibilidad en su comportamiento eléctrico y una mayor homogeneidad en el calentamiento;
- una menor sensibilidad a la forma en que se realizan las conexiones producto de la alta tenacidad del metal que impide su rotura y
- buena resistencia a la corrosión.

#### Desventajas

- la introducción en la interfaz de soldadura de un material de naturaleza muy distinta al material base, hecho que puede afectar básicamente las propiedades mecánicas de la unión;
- el peso total de la estructura y
- el espesor de la zona de unión.

Propiedades fundamentales que deben cumplir:

- permitir la difusión de las cadenas poliméricas de los sustratos para efectivizar la unión;
- lograr homogeneidad en el calentamiento;
- asegurar que el material empleado cuenta con una resistividad suficiente como para alcanzar la temperatura del proceso en la interfaz por efecto Joule;
- intentar que sea mínima la cantidad de material metálico presente en la interfaz sin disminuir la homogeneidad en el calentamiento;
- ser compatibles con el material a soldar y
- exhibir una buena resistencia a la corrosión.

Se plantea asimismo en base a la geometría los requerimientos en cuanto a su necesidad de diseño pudiendo ser utilizadas como circuitos en paralelo o en serie.

Para la primera posibilidad es decir, como un

circuito en paralelo, la corriente total  $I$  que ingresa a la malla es dividida por la cantidad de hilos conductores con un único sentido de circulación. Desde la concepción de esta clase de circuitos no resultaría necesario enfocar el análisis respecto del material de recubrimiento que pudiese actuar como aislante el cual sí resulta absolutamente necesario para un uso como circuito en serie en el cual cada punto de unión entre hilos es un punto de contacto y por ende, de corto.

Por último, no se puede omitir que un implante metálico actúa como un contaminante en la zona de interfaz dado que queda atrapado en ella después de la operación de soldadura. En general introduce concentraciones de esfuerzos de cizallamiento, un cierto peso y una diferente expansión térmica con respecto al material a soldar. A su vez puede poner en peligro la excelente resistencia a la corrosión de la matriz y requerir de un análisis especial para cada alternativa de materiales conformantes del proceso.

#### Metodología para aplicación de la corriente eléctrica

El perfil de corriente aplicado a la malla durante el proceso de soldadura determina la evolución de la temperatura en la interfaz. A su vez la temperatura determina las variaciones en el estado físico en las interfaces poliméricas pudiendo controlar los aspectos fundamentales relacionados con la cristalinidad (enfriamiento controlado), evitando posibles uniones incompletas o sobrecalentamientos (temperatura superior a la de proceso).

En este tipo de procesos resulta interesante trabajar con valores específicos tales como densidad de corriente o densidad de potencia eléctrica. Esta última tiene la ventaja que se independiza del tamaño del agente de calentamiento considerando la resistencia del mismo y la intensidad de corriente que lo atraviesa.

Siendo:

$$p = \frac{I^2 \cdot R}{L \cdot W}$$

-  $I$ : Intensidad que circula por el agente calefactor

- R: su resistencia eléctrica
- L, W : factores geométricos

La intensidad de corriente (o Potencia eléctrica) y el tiempo de calentamiento establecen –dadas las condiciones de contorno– la Temperatura máxima que puede alcanzar la interfaz de unión.

Básicamente el calor puede ser generado de dos formas (Figura 9):

- por aplicación de una potencia constante durante un tiempo predeterminado, lo que resulta en un perfil creciente de temperatura hasta el principio del enfriamiento (momento en el que se desconecta la fuente de alimentación)
- por aplicación de una potencia que se modifica gradualmente para conseguir una región constante de temperatura.

Esta segunda forma se caracteriza por una etapa inicial de calentamiento rápido (generalmente a intensidad constante) seguida de una meseta de temperatura (intensidad de corriente variable).

La mayoría de los estudios sobre el proceso de soldadura por resistencia han sido llevados a cabo utilizando el primero de los métodos, ya que es más fácil de implementar porque no es necesaria una realimentación sobre la temperatura desarrollada en la interfaz una vez definidos los parámetros del proceso.

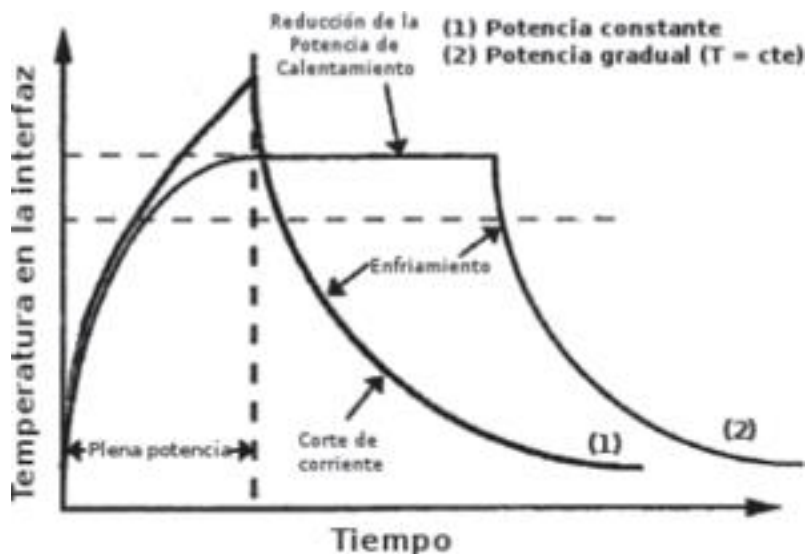
Sin embargo, para evitar sobrecalentamientos en la zona de unión el proceso a temperatura constante resulta ser el más adecuado introduciendo el tiempo de mantenimiento de la temperatura de proceso, como parámetro, el cual puede ser controlado para mejorar la calidad de las uniones. Más aún, es posible llevar a cabo un enfriamiento controlado, especialmente importante debido a la dependencia del grado de cristalinidad con la velocidad de enfriamiento.

Este método requiere información en tiempo real de la temperatura desarrollada en la interfaz de soldadura y por lo tanto una realimentación de la información del proceso. Debido a la dificultad de realizar soldaduras a temperatura constante sólo hay disponible una escasa información sobre este tipo de proceso en la bibliografía específica (McKnight, 1997).

Además, una mejora en la controlabilidad de la temperatura resultaría en tiempos más cortos en la definición de los parámetros de soldadura, por ejemplo el valor de la potencia aplicada entre otros, para diferentes configuraciones de material y tamaño del agente de calentamiento.

Dos son las posibilidades para controlar el proceso: mediante medidas directas o por el contrario utilizando métodos indirectos.

- El método directo se basa en la posibilidad de medir la temperatura desarrollada en la interfaz, lo cual puede realizarse utilizando



**Fig. 9. Esquema representativo de los tipos de calentamiento**

termocuplas. Algunas desventajas del empleo de termocuplas es que éstas permanecen en la interfaz de la unión una vez que el proceso finaliza convirtiéndose en un agente externo y consecuentemente influenciando las propiedades de la unión. Además resulta imprescindible efectuar un aislamiento que evite el contacto de las termocuplas con la corriente que atraviesa la malla para prevenir corrientes inducidas que puedan causar medidas incorrectas. Este aislamiento puede realizarse con película aislante resistente a alta temperatura, la cual se convierte en un agente externo adicional que permanece en la unión.

- El método indirecto puede efectuarse a partir de trabajos de modelizado fundamentalmente o mediciones indirectas de la temperatura. Para esta segunda posibilidad resulta un camino lógico a recorrer el siguiente: la generación de calor del proceso de soldadura por resistencia está basado en el efecto Joule directamente relacionado con la resistencia del material del agente de calentamiento la cual varía con la Temperatura de operación de la soldadura. La intención es por lo tanto medir la resistencia eléctrica de la malla para calcular su temperatura, para lo cual es necesario caracterizar las resistencias metálicas empleadas como implante resistivo.

Todos los estudios refieren la existencia de un límite inferior y otro superior para la densidad de potencia. Por debajo del límite inferior el calentamiento es insuficiente; por encima del superior ocurre una degradación de la matriz debida al exceso de temperatura. Luego para un valor dado de densidad de potencia (comprendida entre los límites) existe una ventana de trabajo asociada al tiempo. Por debajo del tiempo mínimo puede que la Temperatura alcanzada sea inferior a la de proceso o que el calentamiento no sea suficientemente homogéneo por falta de efectividad en la transferencia de calor. El tiempo máximo queda determinado por posibles sobrecalentamientos o por excesivo flujo lateral de resina (Talbot *et al.*, 2005 y Stavrov, et al., 2003).

Entre ambos se halla el tiempo óptimo.

Desde un concepto económico (aunque tam-

bién para evitar la conducción de calor a áreas adyacentes a la interfaz) convendría trabajar con valores elevados de densidad de potencia. Sin embargo el rápido incremento de la Temperatura puede provocar en forma indeseable la falta de homogeneidad en el calentamiento (tiempos cortos). Por lo tanto se debe buscar una solución de compromiso.

### **Metodología para la aplicación de la presión de consolidación**

Para poder producir juntas de una calidad viable para su uso resulta necesario predecir y diseñar el mecanismo de control sobre la presión de soldadura aplicada. Esta proporciona un contacto íntimo entre las superficies de la interfaz permitiendo:

- evitar la desconsolidación durante la fusión;
- deformar los compuestos para promover la difusión molecular y
- expulsar el aire en la interfaz.

Como resultado del proceso de calentamiento, la movilidad de las cadenas moleculares de los polímeros aumenta. Bajo la aplicación de una dada presión, las barreras asociadas con la rugosidad interfacial tienden a desaparecer, permitiendo que las cadenas moleculares puedan difundir a través de la interfaz de soldadura (ASM, 2001). Este proceso conduce a un entremezclado ("enredo") de las cadenas y desaparición de las superficies de los sustratos, lo que a su vez promueve la capacidad de transferencia de cargas a través de la zona soldada. El polímero se enfría luego bajo la aplicación aún de la presión, para los propósitos de solidificación y de consolidación de la nueva estructura cristalina.

El tiempo necesario para la unión entre los sustratos dependerá ciertamente de la temperatura del proceso en relación con la naturaleza del material de la matriz termoplástica. En el caso de las semicristalinas (polipropileno) debido a la baja viscosidad que presentan al ser calentadas por encima de su temperatura de fusión, la difusión a nivel molecular tiene lugar en forma prácticamente instantánea en comparación con el tiempo necesario para la fluencia de la resina y expulsión del

aire en la interfaz.

Existen dos metodologías para llevar a cabo este proceso:

- control del desplazamiento
- control de la presión

En la técnica de control de desplazamiento, se aplica una presión inicial al material a soldar pudiéndose controlar durante todo el proceso de soldadura.

En la técnica de control de presión, una presión inicial se aplica a la pila de soldadura utilizando un sistema neumático permaneciendo constante durante toda la operación de soldadura. En este caso, el desplazamiento del material sometido a soldadura se puede controlar durante el proceso.

## Parámetros asociados al proceso

### Intensidad de corriente → Temperatura

Cuando la corriente fluye a través del elemento de calentamiento, el calor generado sigue la ley de Joule, en donde la energía disipada desde la resistencia es proporcional a la resistencia, a la corriente y al tiempo transcurrido:

$$P(t) = I^2 \cdot R(t)$$

Si la energía suministrada excede las pérdidas térmicas en el material y el entorno, la temperatura de los laminados comienza a incrementarse de acuerdo a un perfil de penetración. Eso da lugar a una zona específica de afectación debida a la transferencia calórica que debe ser mantenida tan cerca de la interfaz como resultare posible.

Si se toman en consideración las cuestiones geométricas se obtiene la densidad de potencia que puede calcularse a partir de la ecuación:

$$P = \frac{I^2 \cdot R}{l \cdot w} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Donde:

- I es la intensidad de corriente [A]
- R la resistencia del elemento de calentamiento [ $\Omega$ ]
- l la longitud de la zona soldada [m]

- w el ancho de la zona soldada [m]

$$E = P \cdot t \left[ \frac{kJ}{m^2} \right]$$

Si a esa P se la vincula con el tiempo durante el cual la corriente se encuentra aplicada, se obtiene el equivalente energético entregado a la soldadura.

Donde:

- P es el nivel de densidad de potencia [W/m<sup>2</sup>]
- t el tiempo de aplicación de la corriente [s]

Estos dos parámetros combinados junto a la presión de consolidación habrían de determinar los valores de resistencia de la soldadura y con ella por ende su sensibilidad asociada a las cuestiones de calidad.

Aunque los niveles de potencia utilizados para diferentes combinaciones de materiales y elementos de calentamiento sean diferentes, típicamente pueden ser divididos en tres grupos (Holmes y Gillespie Jr., 1993):

- bajo: 10 a 75 kW/m<sup>2</sup>
- intermedio: 75 a 130 kW/m<sup>2</sup>
- alto: mayor de 130 kW/m<sup>2</sup>

A partir de las ecuaciones analizadas resulta en principio obvio que la misma cantidad de energía se puede aplicar en la soldadura con un bajo nivel de potencia y un mayor tiempo de aplicación de corriente como con un alto nivel de potencia y un corto tiempo de aplicación. Sin embargo, los resultados no son los mismos. La primera combinación, un nivel de potencia bajo y largo tiempo de soldadura resulta en pérdidas excesivas de calor en el material, mientras que el segundo, un alto nivel de potencia y tiempo de soldadura corta produce altos gradientes de temperatura en la interfaz de la soldadura induciendo a un comienzo de posibles deterioros por envejecimiento de la matriz. Ambos fenómenos terminan estableciendo el mínimo y el máximo nivel de potencia que se puede utilizar para un cierto y dado proceso de soldadura.

Los ensayos de soldadura para investigar el nivel de potencia y de la energía de entra-



da en el proceso deben ser realizados en el intervalo entre estos dos niveles de contorno los cuales se determinan de antemano (Hou *et al.*, 1999). Su efecto debe ser determinado por el seguimiento de los tipos de fallas de las probetas sometidas a la acción de cargas. Las resistencias de las probetas soldadas y sometidas a diferentes niveles de potencia como una función de la energía de entrada (tiempo) fueron investigados fundamentalmente por el grupo de Hou *et al.* Dos tendencias generales se pudieron identificar: la energía necesaria para el valor pico de resistencia que debe conseguirse disminuye drásticamente con el aumento del nivel de potencia y, a su vez, en cada nivel de potencia se aproxima a su punto máximo con el aumento de energía, disminuyendo luego ligeramente. El impacto de la entrada de energía puede determinarse a partir de un examen visual y microscópico de las superficies de fractura. De acuerdo con la clasificación del tipo de fractura, la interfacial estará presente en probetas sometidas a baja energía de soldadura. El aumento de la energía de entrada posibilita una transición en el modo de fractura desde la interfacial a la interlaminar lo cual es factible visualizar. A su vez este principio se constata a través de un incremento en la resistencia. Si la energía de entrada continúa aumentando después que el nivel máximo de resistencia es alcanzado, la temperatura en la superficie se eleva más y la viscosidad del flujo de la matriz disminuye. Esto da como resultado un incremento en el flujo de la matriz permitiendo presuponer (en realidad no hay ningún análisis serio que lo afirme) que sea la causa de la disminución de la resistencia. Desde luego que los resultados experimentales son utilizados para determinar los parámetros óptimos de procesamiento.

Una vez que se analizan las respuestas de sollicitación mecánica que se corresponden con una fracción del valor de referencia especificado se determinan las combinaciones posibles de los parámetros de procesamiento que conducen a la obtención de soldaduras con propiedades aceptables y se muestran como una forma de ventana de procesamiento.

### **Presión de consolidación**

Monitoreando las fluctuaciones de presión o desplazamiento durante el control de desplazamiento o de presión respectivamente, el

proceso termina sistematizándose en cinco etapas (Bird *et al.* 1992; Dubé *et al.* 2008; Sierksma, 2001; Stavrov *et al.* 2005) (Como se puede observar en la Figura 10):

1. íntimo contacto
2. expansión térmica
3. flujo transversal de polímero
4. contracción volumétrica
5. estabilización

provenientes del análisis de los fenómenos físicos que ocurren durante el proceso de soldadura y que influyen directamente en el espesor final de la misma:

- expansión / contracción térmica
- consolidación / desconsolidación
- flujo de resina transversal

#### 1. Etapa de íntimo contacto

Sucede al comienzo del proceso de soldadura donde las discontinuidades en las interfaces de contacto pueden ocasionar una disminución en su espesor hasta que se consigue concretar el íntimo contacto. Las superficies rugosas de las interfaces a soldar se ablandan y llenan los vacíos entre las mismas y el elemento calefactor con la consecuente liberación de burbujas de aire.

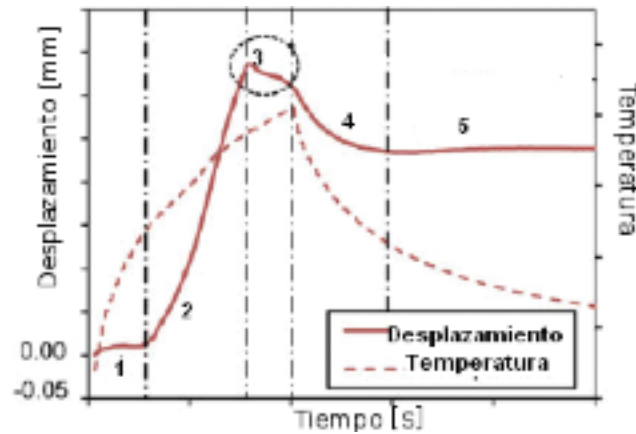
#### 2. Etapa de expansión térmica

Se caracteriza por un rápido aumento en el desplazamiento positivo (mm) hasta un valor pico (máximo de la curva). Se puede presuponer que la expansión térmica producto de la soldadura y la expansión volumétrica asociada con la fusión de cristales resultan ser los mecanismos dominantes. Se produce el contacto íntimo y la temperatura en las piezas a soldar va en aumento. Los resultados de la expansión inducen a un aumento de la carga. A medida que el sistema se acerca a la carga máxima la expansión térmica se reduce debido a la absorción del calor latente de fusión necesario para fundir los cristales dando comienzo a la fusión local y el escurrimiento del flujo.

#### 3. Etapa de flujo transversal de polímero

Se produce un brusco cambio de signo de la pendiente de la curva (Tabla 3). El desplazamiento positivo hasta ese momento pasa a ser negativo. La carga cae en forma abrupta debido a la fusión macroscópica y escurri-





**Fig. 10. Curva de desplazamiento en función del tiempo y temperatura de soldadura**

miento de flujo que se produce en el área de soldadura en la dirección transversal. Las cadenas de polímero comienzan a interdifundir y mezclar en la interfaz de soldadura bajo la presión aplicada dando comienzo a la formación de la soldadura propiamente dicha. Esta etapa dura hasta que la corriente se desconecta y el tiempo transcurrido se lo considera como el tiempo de fusión y se toma en consideración como el parámetro que regula la calidad de la soldadura (Davies *et al.* 1991).

#### 4. Etapa de contracción volumétrica–enfriamiento

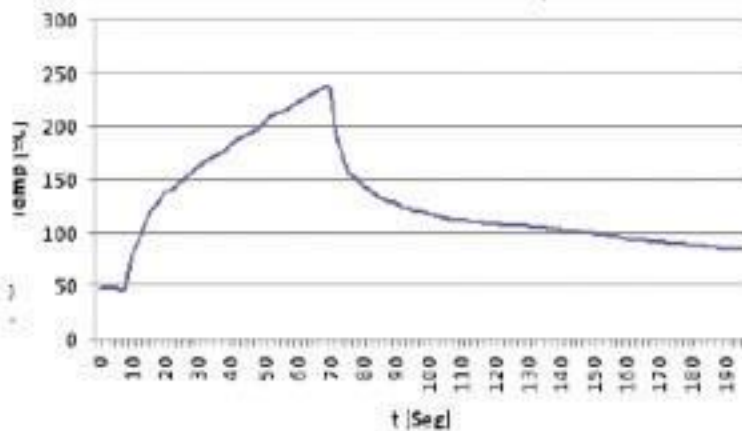
Ya no hay flujo de corriente y comienza el enfriamiento. El material fundido continúa fluyendo hasta que es detenido por la reducción de la presión transversal o el aumento de la viscosidad (Holmes y Gillespie Jr., 1993; Hou *et al.* 1999; Bird *et al.* 1992; Davies *et al.* 1991; Benatar, 1986 y Jakobsen *et al.* 1989). Una vez que la fuente de alimentación se desconecta la curva de desplazamiento va a comenzar a graficar una caída continua (signo negativo). La contracción volumétrica entonces comienza a ser el fenómeno físico dominante en esta etapa. Ahora bien, la conducción de calor desde la interfaz de la soldadura para los materiales circundantes podría de alguna manera estar provocando aún una expansión térmica lejos de la interfaz de soldadura y por lo tanto proporcionar una componente positivo para el desplazamiento total, disminuyendo su valor neto.

Inicialmente la curva indica un desplazamiento a una alta tasa de disminución modificándose paulatinamente hasta virar por completo a valores totalmente alejados de los correspondientes a la primera parte de esta etapa.

#### 5. Etapa de estabilización

En esta última etapa no se observa un desplazamiento significativo. Se puede pensar de la siguiente manera: la contracción volumétrica debe ser aproximadamente igual a la expansión térmica de las áreas alejadas de la interfaz de soldadura. Como se muestra en la figura, la temperatura lejos de la interfaz de soldadura, sigue aumentando aún después de que la alimentación ha sido suspendida. Finalmente, toda la expansión / contracción térmica cesará cuando la temperatura llega a un comportamiento estable.

El efecto de la presión de soldadura inicial aplicada debe ser constatado mediante ensayos mecánicos. Presiones iniciales demasiado bajas (0,02 - 0,05 MPa) resultan en una muy baja carga en la fase de consolidación no resultando suficiente para eliminar los vacíos de aire en la superficie. Esto conduce a una unión débil. Por el contrario presiones iniciales extremadamente altas causan la denominada unión en seco, es decir demasiado escurrimiento lateral de la resina. Esto también conduce a una unión débil. La bibliografía reporta a partir de los resultados de los ensayos mecánicos óptimas presiones iniciales en el intervalo de 0,15 - 0,4 MPa para metodología de desplazamiento constante (Hou *et al.* 1999). Estos valores deben tomarse simplemente como un dato inicial y no de referencia absoluta en cuanto que para cada material, cada diseño geométrico de la malla (diámetro de los hilos, espesor, porcentaje de área abierta) debe determinarse la ventana de trabajo que incluye como dato relevante la presión de consolidación.



**Fig. 12. Soldadura PPM/PPM curva real temperatura vs tiempo**

**Tabla 3. Avance proceso de soldadura PPM/PPM**

Tiempo [s]	Temperatura [°C]	Desplazamiento [micr.]
52	208,4	230
54	212,4	250
56	214,7	280
58	217,7	300
60	222,3	315
62	226,3	330
64	230	340
66	232,3	350
68	236,3	335
70	238,3	325
72	189,7	295

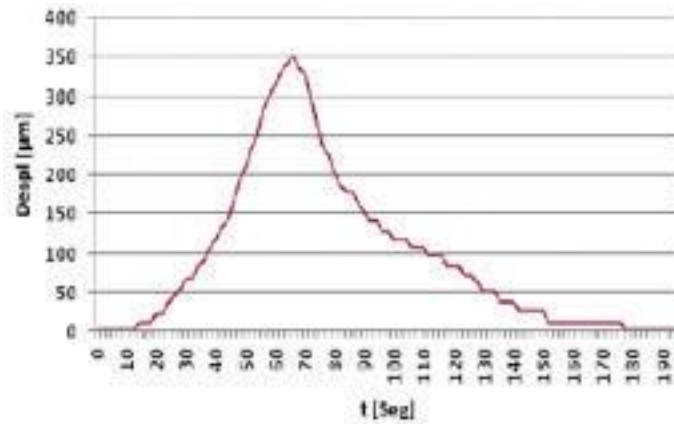
El efecto de la magnitud de la presión de soldadura es bastante similar al efecto de la presión inicial en el método de desplazamiento constante. Para presiones demasiado bajas (0,05 – 0,1 MPa) ocurre una excesiva expansión térmica y el cambio que se produce en el espesor final es positivo, lo cual significa que la presión no es capaz de prevenir la desconsolidación durante el proceso de soldadura. Valores óptimos resultan entre 0,4 y 1,2 MPa. Y una diferente presión de soldadura óptima se corresponde con cada nivel de potencia (Ageorges y Ye, 1998c).

Si se grafican los fenómenos de expansión y contracción a distintas temperaturas en función del tiempo para el polipropileno se obtienen las Figuras 12 y 13. Si además se efectúa el seguimiento *in situ* del espesor de la soldadura se puede utilizar éste para evaluar el avance del proceso (Tabla 3) a través de la observación de

un espesor variable el cual produce como resultado una caracterización (indicador de calidad) del proceso relacionando este valor con la resistencia a cizalladura (Incropea, 1999)

### Tiempo de soldadura

Todos los estudios refieren la existencia de un límite inferior y otro superior para la densidad de potencia. Por debajo del límite inferior el calentamiento es insuficiente; por encima del superior ocurre una degradación de la matriz debida al exceso de temperatura. Luego para un valor dado de densidad de potencia (comprendida entre los límites) existe una ventana de trabajo asociada al tiempo. Por debajo del tiempo mínimo puede que la Temperatura alcanzada sea inferior a la de proceso o que el calentamiento no sea suficientemente homogéneo por falta de efectividad en la transferencia de calor. El tiem-



**Fig. 13. Soldadura PPM/PPM curva real desplazamiento vs tiempo**

po máximo queda determinado por posibles sobrecalentamientos o por excesivo flujo lateral de resina (Sierksma, 2002 y Talbot, 2005).

Entre ambos se halla el tiempo óptimo.

En general se ha comprobado experimentalmente que las velocidades de enfriamiento obtenidas con el corte directo de la corriente resultan ser superiores a las requeridas. Con lo cual se requiere analizar la posibilidad de un enfriamiento controlado en la interfaz (por lo menos hasta temperaturas inferiores a la de recristalización del polímero) mediante la esquematización experimental de una ley decreciente de circulación o su equivalente en °C/min.

En el caso específico del ciclo de enfriamiento y su relación con el grado de cristalinidad se efec-

túa calorimetría diferencial de barrido. Si durante el calentamiento de la resina de la interfaz no aparece ningún pico exotérmico en torno a la Temperatura de cristalización hay evidencia cierta de que el nivel de cristalinidad final se encuentra dentro de los valores correctos. Desde el punto de vista de la degradación (y cuando ésta hubiera ocurrido) debiera en general aparecer un pico endotérmico adyacente al de fusión.

En la segunda parte de este artículo a publicar en Proyecciones se presentará el análisis detallado de las etapas de calentamiento, consolidación y enfriamiento que permiten identificar una ventana de trabajo óptima que caracterice globalmente el proceso de soldadura.

## Referencias

- AGEORGES, C. and YE, L. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part I: Heat transfer. In *Composites*, number 29, pages 899–909 y 911–919. 1998a.
- AGEORGES, C. and YE, L. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part II: Consolidation. In *Composites*, number 29, pages 911–919. 1998b.
- AGEORGES, C. and YE, L. Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part III: Crystallinity. In *Composites*, number 29, pages 921–932. 1998c.
- AGEORGES, C. and YE, L. Resistance welding of thermosetting composite / thermoplastic composite joints. In *Composites: Part A*, number 32, pages 1603–1612. 2000a.
- AGEORGES, C. and YE, L. Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic matrix composites. Part I: heating element and heat transfer. In *Composites Science and Technology*, number 60, pages 1027–1039. 2000b.
- AGEORGES, C. and YE, L. Experimental investigation of the resistance welding of thermoplastic matrix composites. Part II: optimum processing window and mechanical performance. In *Composites Science and Technology*, number 60, pages 1191–1202. 2000c.
- AGEORGES, C.; YE, L. and HOU, M. Advances in fusion bonding techniques for joining thermoplastic matrix composites: a review. In *Composites*, number 32, pages 839–857. Department of Mechanical & Mechatronic Engineering, Centre for Advanced Materials Technology, The University of Sydney, Sydney NSW 2006, Australia. Cooperative Research Centre for Aerospace Composite Structures Ltd, 361 Milperra Road, Bankstown NSW 2200, Australia. 2001.
- ARIAS, M. The impulse resistance welding: a new technique for joining advanced thermoplastic composite parts. In *Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium*, pages 1361–1371. 1996.
- ASM International, Metals Park, OH. *ASM Specialty Handbook*, 2001.
- Benatar. *Methods for the fusion bonding thermoplastic composites*. In *SAMPE Quarterly*. 1986.
- BIRD, T.; HUGHES, T.; STEWARD, W. and LIGHTFOOT, E. Fenómenos de transporte. Reverte, 1992.
- DAVIES, P.; CANTWELL, W.J.; JAR, P.; BOURBAN, P.; ZYSMAN, V. and KAUSCH, H. Joining and repair of carbon fibre-reinforced thermoplastic. In *Composites*, volume 22. 1991.
- DUBÉ, M.; HUBERT, P.; YOUSEFPOUR, A. and DENAULT, J. Current leakage prevention in resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastics. In *Composites Science and Technology*, number 68, pages 1579–1587. 2008.
- HOLMES, S.T. and GILLESPIE JR., J.W. Thermal analysis for resistance welding of large-scale thermoplastic composite joints. In *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, volume 12, pages 723–36. 1993.
- HOU, M. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element. In *Composite Structures*, number 47, pages 667–672. 1999.
- HOU, M.; YE, L. and MAI, Y. An experimental study of resistance welding of carbon fiber reinforced polyetherimide (CF fabric / PEI) composite material. In *Applied composite materials*. Number 6, pages 35–49. 1999.
- INCROPERA, F. *Fundamentos de Transferencia de Calor*. 4ta. Edición. Pearson-Prentice Hall. 1999.
- JAKOBSEN, T.; DON, R. and GILLESPIE, J. Two dimensional thermal analysis of resistance welded thermoplastic composites. In *Polymer Engineering and Science*, vol. 29, pages 1722–1729. 1989.
- LABRADERO, VILLEGAS, and CASTELLÓ. TU Delft Faculty of Aerospace Engineering Design and Production of Composite Structures.
- MCKNIGHT, S.; HOLMES, S.; GILLESPIE, J.; LAMBING, C. and MARINELLI, J.M. Scaling issues in resistance welded thermoplastic composite joints. In *Advances in Polymer Technology*, volume 16, pages 279–29. 1997.
- REDDY, J. *Energy principles and variational methods in applied mechanics*. 2nd edition. Wiley. 2002.
- SHI, H.; VILLEGAS, I.H. and BERSEE, H. Modelling of heat transfer and consolidation for

thermoplastic composites resistance welding. In 18th International conference on composite materials. 2011.

SIERKSMA, D. Resistance welding of thermoplastic composites. Delft University of Technology (Inventory of Conducted Research). 2001.

SIERKSMA, D. Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composites. Delft University of Technology, Thesis report. 2002.

STAVROV, D. and BERSEE, H.E. In ASME Summer Heat Transfer Conference Proceedings, 47222. 2003.

STAVROV, D. and BERSEE, H.E. Thermal analysis of resistance welding of thermoplastic composites. In Proceedings of ICCM-15, Durban, South Africa. 2005.

TALBOT, E.; YOUSEFPOUR, A.; HUBERT, P. and HOJJATI, M. Thermal behavior during thermoplastic composites resistance welding. Aerospace Manufacturing Technology Centre, Institute for Aerospace Research National Research Council Canada, 5145 Decelles Av., Montreal, Quebec, H3T 2B2, Canadá. 2005.

XIAO, X.R.; HOA, S.V. and STREET, K.N. Repair of thermoplastic composite structures by fusion bonding. In Proceedings of the 35th International SAMPE Symposium, pages 37–4