

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

Parte 3: Fase experimental

Juan Rukavina Mikusic¹, María Cristina Di Stefano¹, Carlos Ferrari², Felipe Diniello³, César Espinoza¹

¹ 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

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

³ 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 21 de mayo de 2018, aprobado el 6 de julio de 2018

Resumen

La determinación de una ventana de trabajo representativa de un correcto proceso de soldadura de polímeros termoplásticos a partir del seguimiento y control de la mera modificación de los valores relacionados a cada variable interviniente, implica un trabajo arduo, hartamente difícil y costoso. Soldar materiales con distintas propiedades – con o sin fase dispersa por ejemplo – complica aún más los caminos a seguir. Debido a ello se han analizado en las entregas anteriores la ocurrencia de los distintos fenómenos físicos –contacto íntimo, expansión térmica, flujo transversal de resina en la interfaz de soldadura y contracción volumétrica – intervinientes en cada una de las etapas del proceso. En este trabajo se establece el camino hacia la determinación de una ventana de trabajo fiable, basado en una certera fundamentación teórica a partir de la relación vinculante entre los fenómenos descriptos y las respuestas de las interfaces de soldadura sometidas a distintas sollicitaciones mecánicas.

PALABRAS CLAVE: TERMOPLASTICOS - INSERCIÓN - SOLDADURA - CURVAS DESPLAZAMIENTO - RESISTENCIA TRACCIÓN

Abstract

The determination of a working window representative of a correct process of welding of thermoplastic polymers from the monitoring and control of the mere modification of the values related to each intervening variable, implies an arduous, very difficult and expensive work. Welding materials with different properties - with or without dispersed phase for example - further complicates the paths to follow. Due to this, the occurrence of the different physical phenomena - intimate contact, thermal expansion, transverse flow of resin in the welding interface and volumetric contraction - intervening in each of the stages of the process have been analyzed in the previous deliveries. This work establishes the way towards the determination of a reliable work window, based on an accurate theoretical foundation depending on the binding relationship between the phenomena described and the responses of the welding interfaces subjected to different mechanical stresses.

KEYWORDS: THERMOPLASTICS - INSERTION - WELDING - DISPLACEMENT CURVES - TENSILE STRENGTH

Introducción

La soldadura por resistencia resulta ser un proceso asociado a múltiples variables; la mayoría de ellas interdependientes y a su vez partícipes de un transitorio. Con lo cual la búsqueda de indicadores óptimos, como una secuencia de ensayos consecutivos y modificatorios de forma univariable, da por resultado un cúmulo de valores que no llegan a poder ser interpretados como representativos del sistema en estudio. Debido a ello los trabajos iniciales de experimentación condujeron en forma indubitable a la necesidad de encontrar fundamentos teóricos que pudiesen validar la ocurrencia de los mismos, principalmente en la comprensión de la influencia que los distintos parámetros ejercen sobre el propio proceso de soldadura. Luego y como se ha visto en las dos entregas anteriores (Rukavina *et al.* 2016, 2017) la temperatura y el grado de consolidación se reconocieron como aquellos factores que definen la calidad de las mismas y se ha logrado demostrar que dependen únicamente de las variables intervinientes: la entrada de energía, la presión y el tiempo de calentamiento.

Se ha considerado a la malla calefactora no sólo como la responsable de la generación de calor y elemento sensor de la temperatura durante el proceso, sino como un componente de la interfaz de soldadura y definitorio de la calidad de las uniones soldadas. El diámetro de los alambres y el área abierta mostraron ser sus parámetros más importantes.

Particular importancia se le asignó a las características de los materiales componentes de las interfaces de soldadura; fundamentalmente la relación en volumen de la fase dispersa con respecto a la matriz (en el caso de los materiales sintéticos), el efecto del tamaño de las partículas como también los aspectos relativos a la adhesión entre ambas fases.

Determinados defectos – básicamente la generación de vacíos –y el flujo transversal de polímero dan cuenta de una modificación en el espesor de soldadura y por ende en la curva de desplazamiento vs tiempo. Superior al deseado o lógico en el caso de vacíos y caída repentina en presencia de flujo.

Todos estos mecanismos han sido tema de

estudio dando posibilidad concreta a la obtención de relaciones teóricas tal que pudieran ser avaladas por sus correspondientes respuestas a obtener a partir de los ensayos mecánicos y observaciones de las interfaces de rotura.

Surgen así los datos de la curva de desplazamiento en el tiempo, los que aunados a los valores de temperatura, densidad de potencia y presión, permitieron efectuar la determinación de la ventana de trabajo para cada uno de los distintos materiales conformantes de la interfaz de soldadura.

Consideraciones fundamentales del modelo

Se ha desarrollado y validado un modelo referido a la soldadura por resistencias de polímeros termoplásticos a partir de los siguientes parámetros distintivos:

a- Malla calefactora

Desde el punto de vista del estado del arte, a partir de los trabajos de Sierksma, D. (2002) se ha observado que luego de la soldadura las superficies expuestas a la fractura mostraban una notable falta de homogeneidad en los procesos de calentamiento efectuados con mallas metálicas según alguna de sus direcciones. Fundamentalmente las temperaturas alcanzadas en la zona central de la malla eran superiores a las que se alcanzaban en sus extremos. En contrapartida, si la superficie total de los alambres constitutivos de las mallas resistivas estuviese recubierta (aislada), la homogeneidad que pudiera conseguirse a partir de la inexistencia de puntos de contacto (cortos) llevaría a una capacidad de circulación "ideal". Es decir, para el área total de la malla resistiva, resulta factible inducir la utilización de ambos sentidos de circulación (en serie) posibilitando una completa homogeneidad en la distribución de la temperatura. Por ello se adopta la utilización de una malla en serie.

b- Medición de la temperatura

La cuestión central que singulariza el diseño se establece a partir de que la malla cumpla la doble función de elemento calefactor y sensor de temperatura.

c- Cálculo de la constante del material para la relación Resistencia vs. Temperatura

Para el cobre esta relación resulta por bibliografía $R(T) = R(0) \times (1 + 0,0039 T)$

Donde: $R(T)$:
Resistencia en Ohm a la temperatura T ($^{\circ}\text{C}$)
 $R(0)$: Resistencia en Ohm a 0°C
0,0039: Constante del material

Se obtuvo para el sistema el nuevo valor de la constante, Rukavina *et al.* (2017)

Luego: $R(T) = R(0) \times (1 + 0,0042 T)$

d- Utilización de la curva de desplazamiento vs tiempo

Idealmente la curva de desplazamiento (íntimo contacto, expansión y contracción volumétrica, y flujo transversal de polímero) se utilizó para la determinación final de los parámetros definitorios de la ventana de trabajo a partir de los modelos temporales de generación y transferencia de calor durante la soldadura. Conociendo la temperatura de trabajo y las presiones asociadas a las características de los materiales a soldar resulta necesario establecer los límites a los tiempos de proceso en su vinculación directa con la densidad de potencia de entrada. En otras palabras hay un solo tiempo para el cual tanto la formación de vacíos como el flujo transversal de polímero serán inexistentes. Y esto ocurre cuando cambia de signo el valor de la pendiente de la curva de desplazamiento en función del tiempo.

e- Inserción

Las mallas metálicas utilizadas como agentes de calentamiento en la interfaz de fusión y soldadura de los materiales termoplásticos deben insertarse en la matriz polimérica a efectos de obtener valores homogéneos de temperatura en toda la superficie sometida a proceso. El efecto convectivo de la malla al aire resulta sumamente perjudicial desde el punto de vista de la homogeneidad térmica. A fin de evitar esta problemática se propone como principio de solución efectuar la inserción de las mallas en el polímero previamente a la etapa de soldadura.

Materiales y equipamiento desarrollado a escala laboratorio

a- Materiales utilizados

a1. Polipropileno macizo (PPM) grado comercial de acuerdo a las siguientes características.

Densidad	0,91 g/cm ³
Resistencia a la tracción	300 kg/cm ²
Temperatura de fusión	164 $^{\circ}\text{C}$
Conductividad térmica	0,22 W/m $^{\circ}\text{K}$

a2. Polipropileno sintáctico (PPS) con relleno de micro esferas huecas de vidrio (3M Glass bubbles S38XHS)

b- Probetas

Se utilizaron probetas de los materiales especificados con interfaces PPM/PPM – PPM/PPS – PPS/PPS y dimensiones estandarizadas de 40 x 40 x 40 mm (Figura 5)

c- Mallas calefactoras

Fabricadas con hilos de cobre recubiertos con una primera capa de poliéster imida y una exterior de poliamida imida. El diámetro de los alambres es de 0,35 mm, la abertura de 1,85 mm y el espesor de 0,7mm. Se trata de una malla de tamaño de área abierta intermedio. Desde un punto de vista netamente teórico debe proporcionar una distribución de temperaturas suficientemente homogénea en la interfaz no obstaculizando la difusión de las cadenas poliméricas cumpliendo con las exigencias termo-mecánicas impuestas por el proceso (Rukavina *et al.*, 2016). Superficie a soldar 16 cm².

d- Teje mallas

Tal como se visualiza en Figura 1 se diseñan y elaboran los teje mallas para poder fabricar las resistencias calefactoras.

e- Prensa neumática

Se ha desarrollado un equipo neumático para poder aplicar la presión de consolidación durante el proceso de soldadura. Una vez fijado su valor se mantiene constante durante toda la operatoria de calentamiento, mantenimiento de temperatura y enfriamiento. Se ha equipado con una regla magnética analógica con su res-

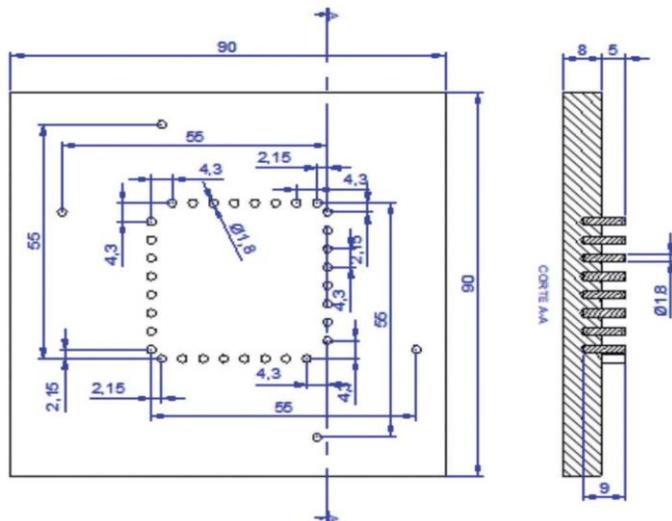


Fig. 1. Vista de teje - mallas desarrollado



Fig. 2. Vista equipo electrónico desarrollado

pectivo sensor para poder graficar en el equipo electrónico de control los efectos de contracción y expansión térmica del material (Figura 4).

f- Equipo electrónico

De desarrollo propio que vincula los siguientes elementos y variables, Figura 2.

Malla calefactora metálica: Eléctricamente caracterizada por su resistencia eléctrica y la variación de ésta con la temperatura.

Temperatura: Obtenida a través de un circuito electrónico dedicado, capaz de obtener el valor resistivo instantáneo de la malla calefactora y convertirlo en una señal analógica capaz de ser interpretada por el sistema de control.

Potencia: Circuito electrónico dedicado capaz de conectar, desconectar y modular la corriente de calentamiento de acuerdo a los requerimientos del sistema de control.

Control: Conjunto de dispositivos industriales de control (PLC + Pantalla gráfica + Fuente de alimentación), programado para ejecutar el control de corriente en la malla y la temperatura instantánea.

En el sistema propuesto y utilizado, se han aprovechado dos características intrínsecas de los metales, la posibilidad de aumentar su temperatura al circular una corriente y el incremento de la conductividad con la temperatura.

g- Limpieza de las superficies a soldar

Previo al proceso de inserción de las mallas en una de las caras de la interfaz de soldadura se efectúa una limpieza con acetona y secado a temperatura ambiente

Procedimiento experimental

La fase experimental incluye los siguientes procesos:

- Inserción de la malla en una de las caras de la interfaz a soldar
- Soldadura propiamente dicha

a- Inserción de la malla en una de las caras de la interfaz de soldadura

Tal como se ha visto 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 ciclo de calentamiento y los restantes. Este fenómeno ocurre debido a los cambiantes escenarios de transferencia de calor que se suceden alrededor de la malla. Durante el primer ciclo del proceso los alambres se encuentran en pleno contacto con el aire. A la temperatura de soldadura, es decir en ciclos posteriores al primero, el flujo de resina conformante del espesor interfacial habrá podido expulsar todo el aire circundante permitiendo el embebido de la malla.

Por otro lado la unión por fusión de termoplásticos semicristalinos se viene estudiando con especial interés en procesos no isotérmicos en los que los dos adherentes a soldar son calentados a dos temperaturas diferentes antes de ser ensamblados. Para estos casos, una cara es fundida mientras que la otra es calentada pero manteniéndola en la fase sólida. En una primera aproximación, la temperatura entre caras es tomada como un valor medio entre los valores de las temperaturas mayores y menores. La adhesión resultó ser más rápida y eficiente cuando se usaban condiciones no isotérmicas en lugar de que ambos componentes fueran mantenidos a la misma temperatura. En el esquema pueden observarse las diferencias entre procesos isotérmicos y no isotérmicos. Se puede inferir que un gradiente de temperatura a través de la interfaz mejora considerablemente la resistencia de la soldadura, ya que la fusión se extiende dentro de la placa superior. En el enfriamiento posterior, la morfología de la parte inferior (placa inicialmente fundida) se altera debido a que crecen estructuras laminares continuas a través de la interfaz. La mayor fuerza que hay que aplicar para la rotura de dichas interfaces se puede atribuir por lo tanto a una buena humectación interfacial por un lado, y por una transferencia eficiente del estrés a través de las laminillas de cristal cambiando la naturaleza de la fractura de adhesiva a cohesiva.

La problemática explicada resulta ser de ocurrencia generalizada sea cual fuese el material utilizado (macizo o sintáctico).

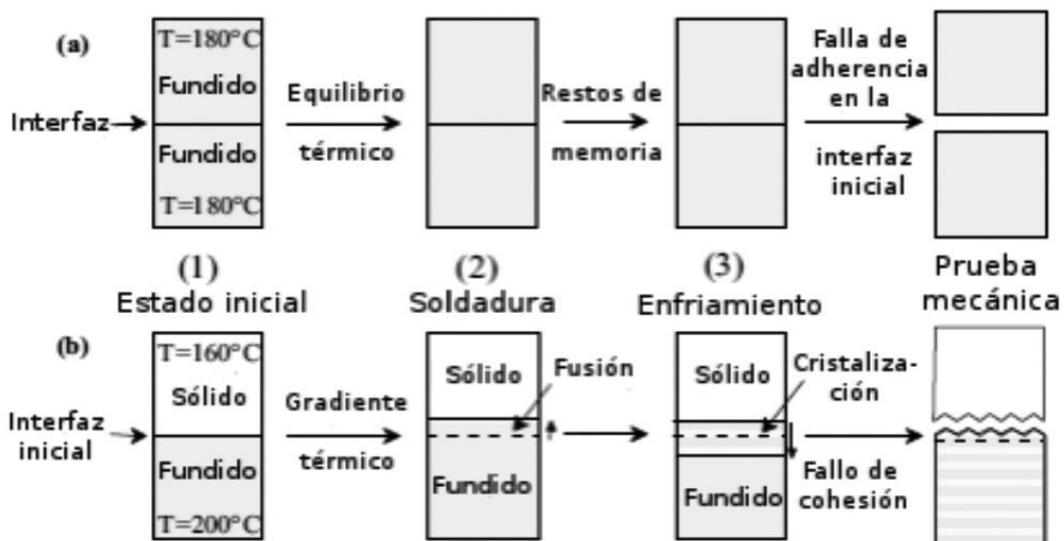


Fig. 3. Diferencias entre procesos isotérmicos y no isotérmicos



Fig.4. Prensa neumática

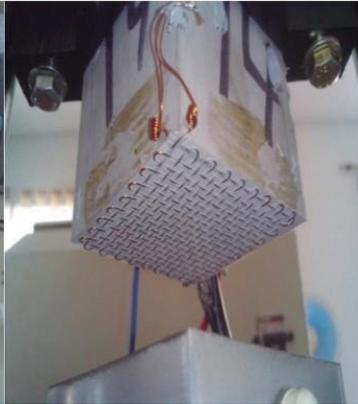


Fig.5. Inserción

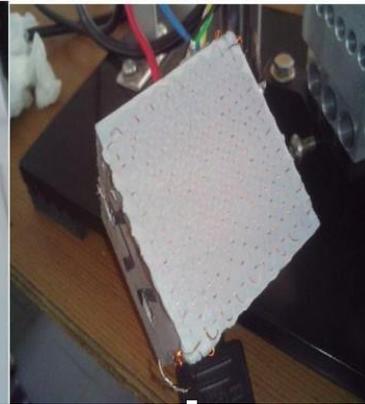


Fig.6. Malla embebida

Para solucionar este inconveniente se propone efectuar la inserción de la malla (Figura 5) en una de las caras de la interfaz previamente a la soldadura. Luego esta etapa se convierte en condicionante del proceso global dado que define el comportamiento térmico posterior y los resultados asociados a las sollicitaciones mecánicas.

Ahora bien en el calentamiento para la inserción a su vez se verifica la imposibilidad de que la malla pudiera insertarse en todo su espesor dentro de la interfaz de las probetas de ensayo en una sola fase resultando necesario subdividir el procedimiento de inserción en tres etapas:

- la primera donde se eleva la temperatura de la interfaz de apoyo hasta los 80 °C aproximadamente impidiendo que en la etapa posterior un porcentaje importante de la energía a entregar por la malla al sistema no sea consumida en el calefaccionado de implemento insertor de apoyo.
- la segunda consistente en elevar la temperatura hasta un valor inferior en un 10% al de la temperatura de inserción y desconectar la energía, dejando enfriar la probeta de ensayo con un elevado nivel de desplazamiento negativo graficado en la pantalla del equipo.
- una tercera etapa donde el calentamiento llega hasta temperatura de inserción. Este se corresponde con los segundos calentamientos determinados en la fase teórica exploratoria.

b- Soldadura propiamente dicha

A partir de una malla completamente embebi-

da (Figura 6) en la matriz polimérica se puede proceder a la soldadura con un único mecanismo controlante de transferencia de calor. El efecto convectivo originado en la interfaz malla – aire se ha desacoplado del sistema como problema luego del proceso de inserción.

Optimización del proceso

La necesidad de obtener una caracterización válida del proceso 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 a partir de una determinación individual para cada componente conformando una sucesión de bloques desacoplados basada en una estrategia de simulación. Mediante el posterior 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 manejo libre de dificultades. El rango de validación surge del análisis de datos experimentales que ha permitido desarrollar un proceso de soldadura por resistencia a escala laboratorio – piloto 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 – piloto y PPM – PPM para escala real.

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 (31.75 MPa). Se han podido corroborar asimismo los niveles de porosidad y altos grados de homogeneidad en las interfaces.

Análisis de los ciclos de inserción y soldadura
La visión completa de los procesos de inserción y soldadura se establecen a partir de las tablas y gráficos siguientes.

Valores optimizados de los ensayos a tracción

Se han efectuado sucesivas series de ensayos hasta lograr la optimización tanto de los parámetros como de los valores de carga a rotura en tracción. Se seleccionan a modo ilustrativo los que dan lugar a las medias indicativas para cada material o combinación de materiales ensayados.

a- Material PPS / PPS

En principio se trata de un material altamente aislante con lo cual no resulta inadecuado pensar más en términos de energía que de potencia.

El calentamiento y mantenimiento a Temperatura

de soldadura deben ser efectuados en el doble de tiempo que en el caso del PPM, aun llegando a temperaturas inferiores tanto en la inserción como en la soldadura. La experiencia ha confirmado estas afirmaciones. Por otro lado temperaturas superiores a los 200 °C en la soldadura (y más aún si la presión es elevada) llevan a una "soldadura seca" debido al flujo transversal de polímero en la interfaz.

a1 - Etapa de inserción: Valores finales a considerar (Figuras 7 y 8):

- . Presión de consolidación: 6,125 kg / cm²
- . Temperatura de malla seteada: 182 °C
- . Calentamiento por resistencias sin potencia eléctrica: hasta 75° C
- . Calentamiento con potencia eléctrica y resistencias: desde 75° C hasta 168° C
- . Intensidad: 8 A
- . Enfriamiento hasta 110° C
- . Calentamiento con Potencia y resistencias: desde 110°C hasta 180° C
- . Intensidad: 6,5 A
- . Mantenimiento con control de T de malla hasta permanencia de desplazamiento y cambio de pendiente

Si incorporamos la tabla de avance del proceso de inserción (Tabla 1) nos indica un mantenimiento a temperatura de control y cambio de pendiente. Se corta la potencia de entrada para evitar desplazamiento lateral de polímero.

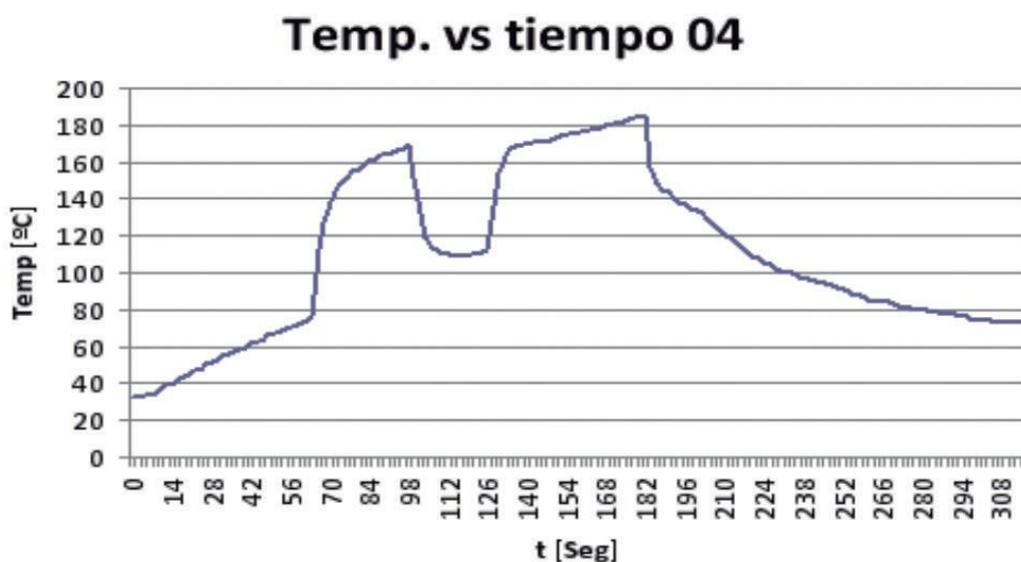


Fig.7. Inserción PPS / PPS curva Temperatura vs. Tiempo

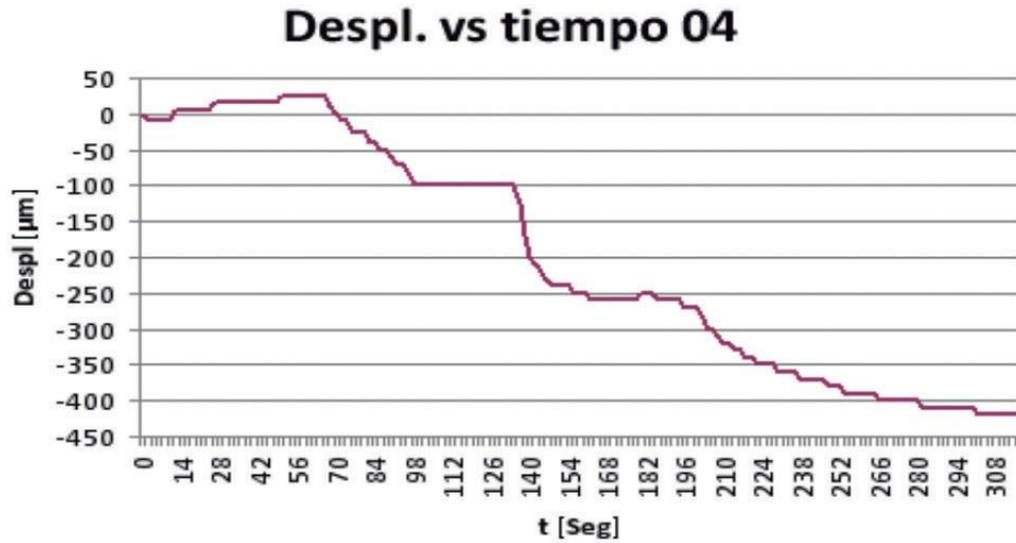


Fig.8. Inserción PPS /PPS curva Desplazamiento vs. Tiempo

Tabla 1. Valores de Temperatura / Desplazamiento en el tiempo para Inserción

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (micrones)
0	37	0
...
158	176	-250
160	176,3	-250
162	177,3	-260
164	177,6	-260
166	179	-260
168	179,6	-260
170	180,6	-260
172	181,3	-260
174	181,6	-260
176	182,6	-260
178	184	-260
180	184	-250
182	185,6	-250
184	157	-250
186	148	-260

En tiempo = 180 segundos y a Temperatura = 184 °C cambia la pendiente de la curva de Desplazamiento: -260 micrones pasa a -250 micrones, con lo cual automáticamente el sensor de desplazamiento detecta esta situación y permite efectuar el corte de la potencia dando por finalizado el proceso. Se corresponde físicamente con el inicio de la etapa de flujo transversal de polímero en la interfaz de soldadura.

Esta condición se repite en todas las siguientes tablas donde se consigna el tiempo y la temperatura a los cuales se constata la ocurrencia de este acontecimiento fundamental en cuanto a la finalización del procedimiento en curso.

a2- Etapa de soldadura: Valores finales a considerar (Figura 9 y Figura 10)

- . Presión de consolidación: 6,25 Kg / cm²
- . Temperatura de malla seteada: 192 °C
- . Intensidad: 7,5 A
- . Cuando la T de malla llega a 190 °C mantener hasta que se modifica la pendiente de desplazamiento

Si anexamos la tabla de avance del proceso (Tabla 2) se verifica que los valores de desplazamiento se mantienen constantes a temperatura de proceso (controlada) y se corta la potencia con el cambio de pendiente.

Temp. vs tiempo 04

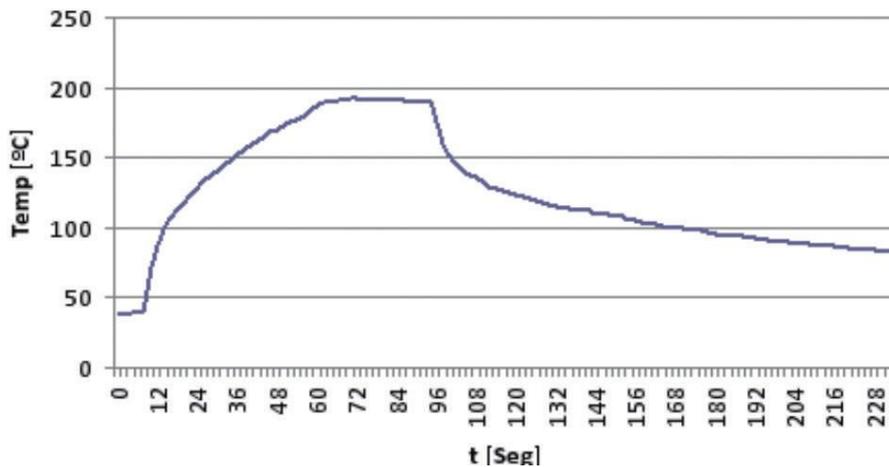


Fig.9. Soldadura PPS / PPS curva Temperatura vs. Tiempo

Despl. vs tiempo 04

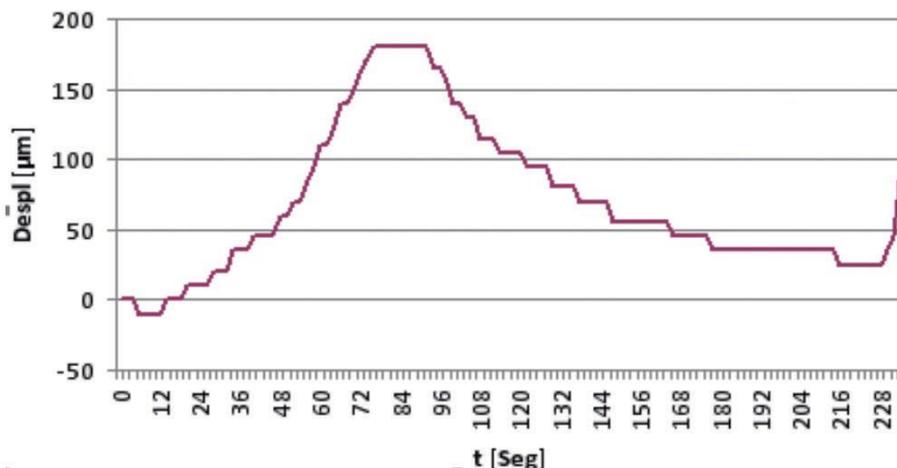


Fig.10. Soldadura PPS / PPS curva Desplazamiento vs.Tiempo

Tabla 2. Valores de Temperatura / Desplazamiento en el tiempo para Soldadura

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (micrones)
0	40	0
...
72	191,9	160
74	191,3	170
76	191,3	180
78	190,6	180
80	190,9	180
82	191,3	180
84	190,9	180
86	190,6	180
88	190,3	180
90	189,9	180
92	190,3	180
94	190,6	165
96	176	165
98	159,7	155

Efectuado el ensayo de tracción se obtienen los resultados mostrados en la Figura 11.



INFORME DE ENSAYO

Número :17-04-15 (1)

Fecha : 17/04/15 Hora : 15:52:23 Responsable: Supervisor Cliente :

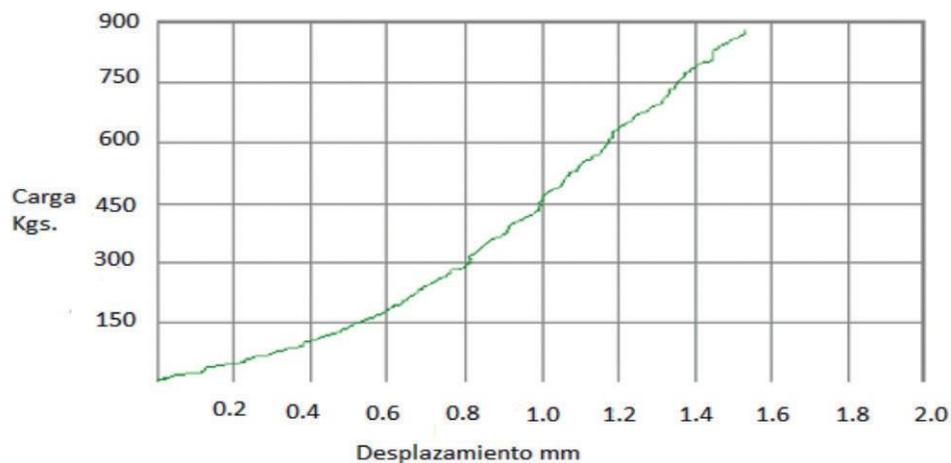


Fig.11. Ensayo de Tracción PPS / PPS

- . Como se verifica en el gráfico la carga máxima resulta ser de 877 kg.
- . Si la probeta ha sido llevada a una sección de $3\text{ cm} \times 3\text{ cm} = 9\text{ cm}^2$.
- . La Resistencia a la tracción resulta: $877\text{ kg} / 9\text{ cm}^2 = 9,74\text{ MPa}$.

La Resistencia obtenida supera en un 50% a los valores asignados por el proveedor del material como límite mínimo para el proceso de fabricación por extrusión del recubrimiento polimérico de las tuberías de acero (6,3 MPa).

b- Material PPM / PPM

Su intercambio energético con el medio es grande; luego su comportamiento desde ese punto de vista es absolutamente diferente al PPS. A su vez las temperaturas necesarias para la producción de la inserción y de la soldadura son más elevadas y simultáneamente los tiempos de llegada son inferiores a los necesarios para el PPS – aproximadamente el 50% -. Llegar a las temperaturas deseadas en tiempos superiores a los realmente efectivos permite un intercambio energético mayor con el medio con una menor eficiencia en el balance energético final.

b1- Etapa de inserción – Valores finales a considerar (Figuras 12 y 13)

- . Presión de consolidación: $7,35\text{ Kg} / \text{cm}^2$

- . Calentamiento por resistencias sin potencia eléctrica: hasta $75\text{ }^\circ\text{C}$
- . Calentamiento con potencia eléctrica y resistencias: desde $75\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $170\text{ }^\circ\text{C}$
- . Intensidad: $9,2\text{ A}$
- . Enfriamiento hasta $100\text{ }^\circ\text{C}$
- . Temperatura de malla seteadada: $192\text{ }^\circ\text{C}$
- . Calentamiento con Potencia y resistencias: desde $100\text{ }^\circ\text{C}$ hasta $190\text{ }^\circ\text{C}$
- . Intensidad: $9,2\text{ A}$
- . Mantenimiento con control de T de malla hasta permanencia de desplazamiento y cambio de pendiente

Si incorporamos la tabla de avance del proceso (Tabla 3) nos encontramos que a medida que éste procede y se va llegando a la Temperatura de inserción el desplazamiento permanece constante y al momento de lograrse la inserción de la malla cambia de signo la pendiente.

Este mecanismo ocurre para todos los materiales ensayados y tanto para la etapa de inserción como para la de soldadura. Simplemente, y como resulta lógico de prever, en la inserción el desplazamiento resulta negativo mientras que durante la soldadura siempre será positivo.

Físicamente el problema puede ser visto como que el sistema llega a la temperatura necesaria, permanece bajo control de T de malla (en el equipo de medición y control) por unos segun-

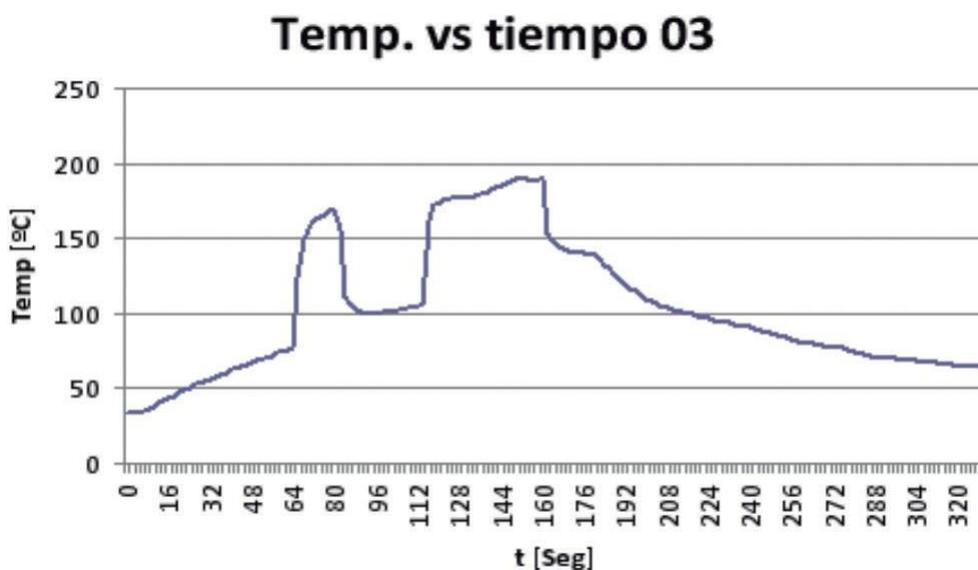


Fig.12. Inserción PPM / PPM curva Temperatura vs. Tiempo

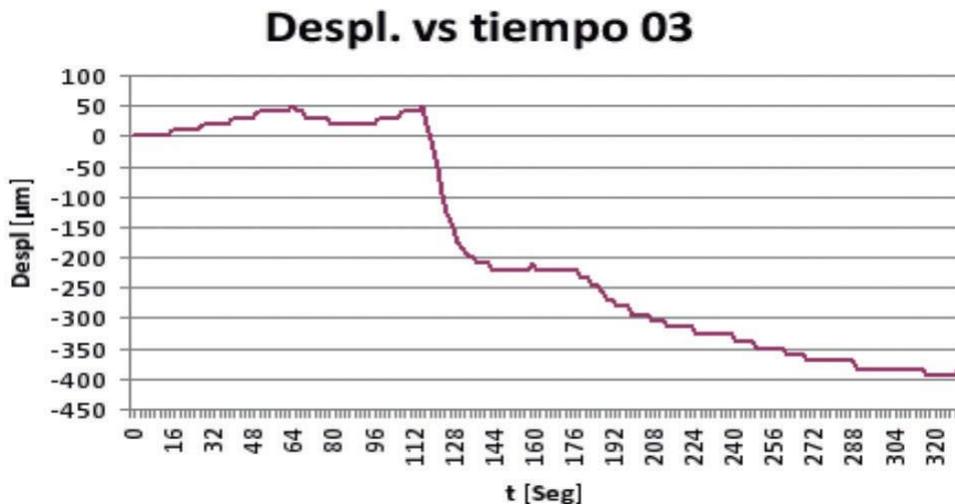


Fig.13. Inserción PPM / PPM curva Desplazamiento vs. Tiempo

dos y exactamente en el cambio de pendiente comienza la fase de flujo lateral del polímero, cuestión que se evita cortando directamente la entrada de potencia. Esto es así y debe ser así porque el material que se desplaza saliendo por los laterales no es material sobrante del sistema sino que forma parte del espesor necesario ya sea para la inserción como para la

soldadura. Si se continuara con la aplicación de potencia en definitiva se lograría que el espesor "autorregulado" del proceso se perdiera por los contornos de la interfaz de soldadura. Se define como autorregulado dado que llegado el sistema a la temperatura de operación, se mantiene todo el tiempo necesario para la formación del espesor calculado para cada etapa.

Tabla 3. Valores de Temperatura / Desplazamiento en el tiempo para Inserción

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (micrones)
0	40	0
...
136	179,8	-200
138	180,1	-210
140	182,1	-210
142	183,8	-210
144	184,8	-220
146	186,1	-220
148	188,1	-220
150	189,8	-220
152	190,5	-220
154	189,2	-220
156	188,5	-220
158	189,5	-220
160	190,2	-210
162	153,7	-220
164	148,6	-220

b2- Etapa de soldadura – valores finales a considerar (Figuras 14 y 15):

. Presión de consolidación: 7,35 kg / cm²

. Temperatura de malla seteada: 232 °C

. Intensidad: 9,2 A

. Cuando la T de malla llega a 230 °C se la mantiene hasta que se modifica la pendiente

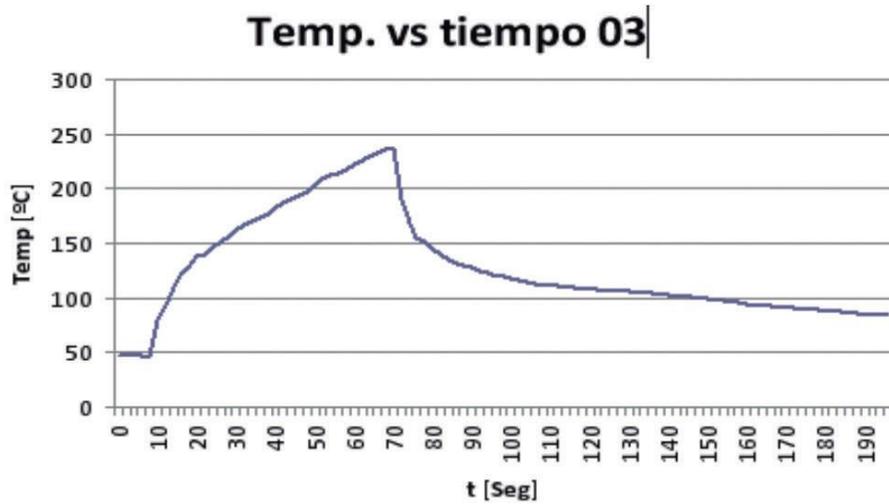


Fig.14. Soldadura PPM / PPM curva Temperatura vs. Tiempo

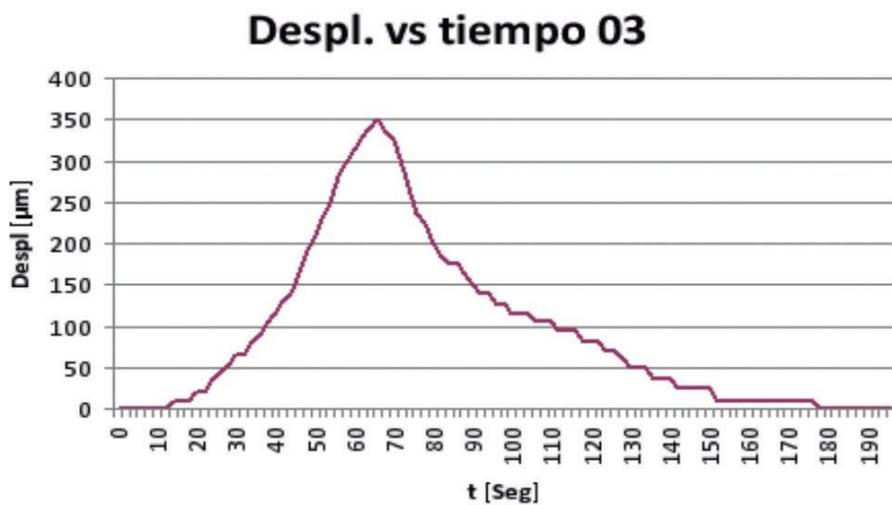


Fig.15. Soldadura PPM / PPM curva Desplazamiento vs. Tiempo

Si incorporamos la tabla de avance (Tabla 4) nuevamente resulta:

Tabla 4. Valores de Temperatura / Desplazamiento en el tiempo para Soldadura

Tiempo (segundos)	Temperatura (°C)	Desplazamiento (micrones)
0	48	0
...
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	230,0	340
66	232,7	350
68	236,3	335
70	238,3	325
72	189,7	295

Efectuado el ensayo de tracción se obtienen los resultados mostrados en la Figura 16.



INFORME DE ENSAYO

Número :17-04-15 (1)

Fecha : 17/04/15 Hora : 15:52:23 Responsable: Supervisor Cliente :

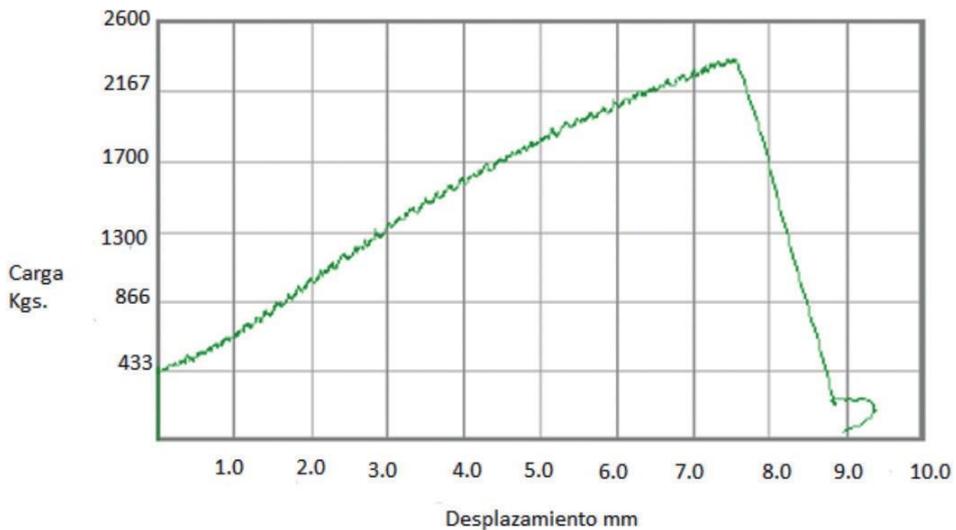


Fig.16. Ensayo de Tracción PPM / PPM

Como se verifica en el gráfico la carga máxima resulta ser de 2.360 kg.

Si la probeta ha sido llevada a una sección de 3 cm. x 3 cm. = 9 cm² .

La Resistencia a la tracción resulta: 2360 kg / 9 cm,2 = 26,22 MPa.

Si se compara con el dato obtenido de la soldadura por fusión sin malla incorporada en la interfaz se obtiene: 26,22 MPa / 31,75 MPa un 82,58% del valor de su resistencia a la tracción. La obtención de éste referencia un resultado de alta eficiencia. Si consideramos que el 70% de las interfaces poliméricas de soldadura con mallas entra en contacto para la autohesión y el 30% restante es malla de cobre, un valor como el obtenido resulta indicador de una notable eficiencia del proceso.

c- Material PPM / PPS

Este es un caso especial en el cual debe considerarse en qué material se efectúa la inserción de la malla. Como se estima que el material primario es PPS la inserción se efectúa en este caso en el PPM. Para ello las consideraciones a tener en cuenta son:

Etapa de inserción: las que se corresponden con PPM / PPM.

Etapa de soldadura: las que se corresponden con PPS / PPS.

Ensayos de Flexión

En principio se continúa con la geometría plana modificando las dimensiones de las probetas.



Fig.17. Vista de las probetas para su uso en ensayos de flexión



Fig.18. Vista del proceso de inserción



Fig. 19. Vista malla insertada



Fig. 20. Vista de las tuberías de acero recubiertas con materiales poliméricos enrolladas sobre carretel en barco para su transporte hasta estación offshore

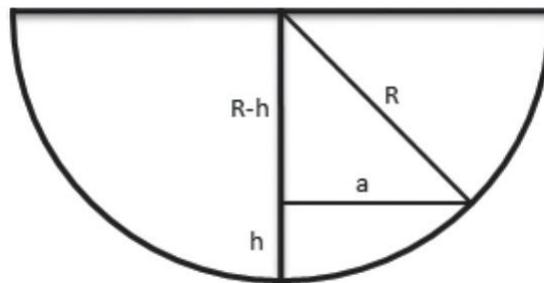


Fig. 21. Relación entre radio de curvatura y desplazamiento en deflexión

Las mismas se fabrican de 200 mm X 60 mm X 25 mm tanto en PP sintáctico como en macizo.

Dado que la Presión a ejercer sobre las probetas resulta ser de 6,125 kg/cm² para el PP sintáctico y de 7,35 kg/cm² para el PP se calculan las cargas a aplicar de acuerdo al material en proceso:

PPS: 120 cm² x 6,125 kg / cm² = 735 kg
 PPM: 120 cm² x 7,35 kg / cm² = 882 kg

Los procesos de inserción (Figuras 18 y 19) y soldadura siguen los mismos lineamientos establecidos para las probetas de laboratorio.

Resulta interesante verificar experimentalmente lo que la teoría expuesta en párrafos anteriores afirma respecto de los cambios de pendiente en las curvas de desplazamiento como el momento exacto de la finalización de los procesos. Se ha comprobado absolutamente en todos los ensayos no dejando dudas de la validez de la incorporación de este parámetro como indicador de existencia efectiva y óptima de proceso.

La Figura 20 permite la visualización a escala real de los esfuerzos a los que están sometidas

las tuberías de acero recubiertas con polímeros termoplásticos en su transporte sobre los barcos hacia las estaciones offshore. El radio de curvatura se corresponde con 7000 mm.

A partir de la Figura 21 se puede establecer la relación trigonométrica que permite calcular la deflexión que sufre la probeta de longitud 2*a (200 mm) cuando se la flexiona con un radio de curvatura R = 7000 mm.

Relación trigonométrica: $a^2 + (R - h)^2 = R^2$

Para nuestro caso: R = 7000 mm; a = 100 mm; h = 0,714 mm

Con lo cual la equivalencia de un radio de 7 metros se expresa con un desplazamiento de 0,714 mm para una probeta de 200 mm. Como para los apoyos quedan 170 mm disponibles se reduce a 0,52 mm el desplazamiento.

Los ensayos de carga vs desplazamiento que se efectuaron han sido de acuerdo a los distintos materiales soldados:

1. PPS / PPS - Se somete la probeta a una carga de 1206 kg y a 10 mm de desplazamiento.

2. PPS / PPS - Se somete la probeta a carga transversal de 1430 kg y un desplazamiento de 15 mm – Figura 23.

3. PPM / PPM - Se somete la probeta a carga de 3660 kg y desplazamiento de 14 mm – Figura 22.

4. PPM / PPS - Se efectúa el ensayo sobre ambas caras, es decir se somete a flexión primero sobre una de las caras, se lleva a cero la carga y luego se vuelve a aplicar sobre la cara opuesta. Primero se aplica la carga sobre el PPS: 2300 kg con un desplazamiento de 11 mm.

En la segunda etapa se aplica la carga sobre la cara opuesta: 1570 kg con un desplazamiento de 20 mm

Por lo tanto si tomamos en consideración el desplazamiento inicial de 0,52 mm calculado para un radio de 7 metros no cabe duda que éste ha sido superado en forma por demás amplia y sin grietas, fisuras o fracturas observables en alguna de las probetas.

En la Figuras 24 y 25 puede apreciarse la interfaz de soldadura luego del sometimiento a cargas de flexión. Se observa los hilos sin deformación con una interfaz indistinguible en la cual ha sido imposible detectar fisuras, grietas o fracturas tanto en su faz de inicio como de propagación.



Fig. 22. PPM sometido a carga



Fig. 23. PPS sometido a carga



Fig. 24. Interfaz ampliada de soldadura posterior a flexión



Fig. 25. Interfaz de soldadura ampliada posterior al ensayo de flexión en material PPM. Visión de un hilo para comparar con la continuidad del material.

Conclusiones

Como se ha visto en el caso de los ensayos de laboratorio se ha controlado y graficado el desplazamiento y se han utilizado sus valores como parámetro fundamental para la finalización del proceso considerando su cambio de signo (pendiente). Se ha comprobado en todos los ensayos referidos a los distintos materiales (PPM/PPM, PPS/PPS y PPM/PPS) por lo cual no deja dudas sobre la validez de la incorporación de este parámetro como indicador de la finalización efectiva y óptima de proceso.

Finalmente y a modo de conclusión puede inferirse que el modelo adoptado para el desarrollo ha permitido simular y verificar en forma correcta los procesos termomecánicos asociados a la soldadura y validarlos a través de los ensa-

ayos mecánicos y visualización microscópica de las interfaces de rotura.

Luego, pueden ser aceptadas como válidas todas las propuestas originales aplicadas y necesarias para la obtención de una valoración positiva en la toma de decisión en cuanto a la calidad final obtenida en las uniones soldadas por resistencia aplicadas al entorno de sistemas planos en el campo experimental de laboratorio.

En la próxima y última entrega se tratará la extrapolación a escala real – productiva – para su aplicación en los recubrimientos poliméricos de las tuberías de petróleo utilizadas en instalaciones de extracción y conducción off shore – láminas de agua profunda –.

Referencias

AGEORGE C. and L. YE, (2000). 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.

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*, UTB 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.

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