

Soldadura de polímeros termoplásticos: embebido en la matriz polimérica de las mallas utilizadas como agentes de calentamiento

Juan Rukavina Mikusic¹, Martín Higes², Carlos Ferrari³, María Cristina Di Stefano¹, César Espinoza¹

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

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

3 Universidad Tecnológica Nacional, Unidad Académica Bariloche, Fanny T. de Newbery 111, 8400, Bariloche, Río Negro, Argentina

juanrukavina@gmail.com

Recibido el 8 de julio de 2022, aprobado el 2 de agosto de 2022

Resumen

En el presente estudio se analiza la necesidad de efectuar el proceso de embebido de las mallas que actúan como agentes de calentamiento en la soldadura de materiales poliméricos empleados en la manufactura de piezas complejas y/o de pared delgada. A partir de este procedimiento se conforma un conjunto malla – película (malla embebida) para: a) efectuar el proceso de inserción en una de las caras de la interfaz a soldar, cuando de acuerdo con los factores geométricos, resulte necesario este procedimiento previo a la soldadura o b) ser utilizadas en la interfaz de soldadura como agente de calentamiento.

PALABRAS CLAVE: EMBEBIDO - MALLAS CALEFACTORAS - TERMOPLÁSTICOS - INSERCIÓN - SOLDADURA

Abstract

In the present study we analyze the need to perform the embedding process of the meshes that act as heating agents in the welding of polymeric materials used in the manufacture of complex and/or thin wall parts. From this procedure, a mesh-film assembly (embedded mesh) is formed to: a) make the insertion process on one of the faces of the interface to be welded, when, according to geometric factors, this procedure is necessary prior to welding or b) be used in the welding interface as a heating agent.

KEYWORDS: EMBEDDED - HEATING MESHES - THERMOPLASTICS - INSERTION - WELDING

Introducción

La soldadura por medio de resistencias resulta ser una excelente solución para la unión por fusión de los polímeros termoplásticos (Rukavina, *et al.* 2016, 2017, 2018, 2019). Sin embargo, se requiere aún de la profundización en determinados conocimientos para que esta tecnología pueda ser considerada madura. Es decir, que pueda llegar a satisfacer, dentro de un amplio espectro de campos de aplicación, el lógico crecimiento de un conjunto de complejidades asociadas.

Las tareas anteriores de nuestro equipo de trabajo sobre esta temática se centraron principalmente, en la comprensión de los mecanismos inherentes a la soldadura y su caracterización cualitativa. Han sido analizados los mecanismos de transferencia de calor, de consolidación y recristalización utilizando la metodología de respuesta a sollicitaciones mecánicas como nexo vinculante entre el comportamiento de las interfaces de soldadura y las respectivas ventanas de trabajo. En otras palabras, el trabajo tuvo como objetivo principal la obtención de conocimientos a los niveles micro y macro considerados indispensables desde la visión estructural y metodológica en el avance del propio proceso de investigación.

En el estudio a nivel micro se discutieron en profundidad las propiedades específicas que determinan la calidad de la soldadura, tales como las condiciones superficiales finales de los adherentes, las micrografías de las interfaces de fusión, los vacíos – decompactaciones – inducidos por el propio proceso y metodologías de testado mecánico.

En el estudio a nivel macro se puso especial énfasis en las condiciones de procesamiento. La estrategia de resultados se ha basado en el análisis de las curvas de desplazamiento (expansión y contracción volumétrica, íntimo contacto, flujo transversal) y modelos temporales de generación y transferencia de calor durante la soldadura. Es aquí, en la concepción macro donde surge y, a consecuencia del propio avance en el desarrollo tecnológico, la necesidad de establecer nuevas estrategias de diseño que permitan vencer las problemáticas incorporadas con el posible uso de estructuras de materiales compuestos termoplásticos de pared delgada y/o geometría compleja, con malla embebida. Fundamentalmente en cuanto al diseño de un esquema óptimo de calentamiento que permita efectuar uniones soldadas bajo condiciones predecibles y repetitivas. Su aplicación, por ejemplo, como recubrimiento de las tuberías utilizadas para la conducción de hidrocarburos a grandes profundidades en estaciones *offshore* o en oleoductos *onshore*, requiere garantizar por obligatoriedad de los propios proyectos un continuo funcionamiento durante períodos muy prolongados. Con lo cual deben ser 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.

Problemática a resolver

A partir del extenso trabajo realizado (Rukavina, *et al.* 2016, 2017, 2018, 2019), hemos podido determinar que durante el proceso de soldadura el comportamiento térmico de las mallas durante el primer calentamiento – el de mayor importancia en cuanto que es el destinado a la unión de las interfaces– ha resultado ser completamente diferente al generado en subsiguientes calentamientos. Este patrón permitió establecer que las regiones diferenciadas de resistencia observadas en la evolución eléctrico-térmica de la malla metálica eran debidas a la variación de la cantidad de aire contenida en la interfaz de la unión. Una vez que los materiales están soldados, el agente calefactor está completamente embebido en la matriz y rodeado por el mismo material. Esto resulta en un mecanismo de transferencia de calor homogéneo que da lugar a una evolución lineal de la resistencia con la temperatura del agente de calentamiento. En una soldadura clásica consistente en un elemento de calentamiento y capas poliméricas adyacentes, una gran parte de la superficie total de los alambres de metal está inicialmente en contacto con el aire. Cuando la corriente circula a través de la malla, ésta se calienta rápidamente y su resistencia tenderá a seguir

una evolución no lineal. A medida que el proceso progresa y la rigidez de la resina comienza a disminuir se conformará mejor a los alambres de la malla. Luego la transferencia de calor de la malla a la resina circundante aumentará como resultado del mejor contacto entre ellos reduciendo significativamente la velocidad de calentamiento. A la temperatura óptima de la soldadura el flujo de resina habrá expulsado eventualmente todo el aire de la interfaz cuyo resultado termina siendo un elemento de calentamiento completamente embebido. Resulta entendible entonces que, con el objetivo de poder utilizar las mediciones de resistencia eléctrica como método indirecto para monitorizar la temperatura de la interfaz y controlar de manera efectiva el proceso de soldadura, resultara imperioso hallar soluciones a efectos de anular la no linealidad verificada a partir de las gráficas de vinculación entre ambas variables (Rukavina, *et al.* 2017). Comprobar, además, si hallada una aproximación lineal de la relación entre ambas variables pudiera dar lugar a resultados aceptables en un proceso de soldadura llevado a cabo con una realimentación de los valores de las medidas de la resistencia eléctrica del elemento resistivo. Con lo cual y, en base a toda la información recogida a partir de los avances incorporados en el grupo de trabajo, se pudo establecer que 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 (previamente a la etapa de soldadura) a efectos de obtener valores homogéneos de temperatura en toda la superficie sometida a proceso.

Luego, y frente a una imposibilidad de efectuar de forma correcta el procedimiento de inserción debido a:

- 1- Factores geométricos de las piezas a soldar (geometrías extensas y complejas)
- 2- Necesidad de aplicación de elevadas presiones no tolerables por alguno de los materiales incluidos en el proceso

Se propone efectuar el embebido de las mallas calefactoras en la matriz polimérica para su posterior utilización como conjunto malla – película o malla embebida tanto en el proceso de inserción como en el de soldadura propiamente dicha.

Análisis del modelo de soldadura con inserción de malla embebida

Si bien las condiciones de contorno asociadas al proceso de inserción son analizadas desde la concepción de una interfaz polimérica líquida, la presión es aplicada desde el inicio del procedimiento para permitir la ocurrencia del íntimo contacto interfacial entre la malla y el material. El contacto íntimo se puede definir desde la visión de la soldadura como un mecanismo de coalescencia de dos superficies termoplásticas adyacentes que deforman plásticamente las irregularidades de las interfaces para obtener un contacto perfecto. Estrictamente desde el punto de vista de los materiales se condice con el establecimiento de una optimización de sus superficies para minimizar el gasto de energía. Distintos modelos de contacto íntimo se presentan en bibliografía para predecir la deformación visco elástica de resina bajo una carga de compresión. Se efectúa para ello la simplificación de la geometría de la superficie como una serie de rectángulos que toman en consideración la relación del área de contacto con el área de la superficie total. Dara y Loos (1985) desarrollaron un modelo que usaba una serie de rectángulos visco elásticos con diferentes alturas basados en distribuciones estadísticas. Mantell y Springer (1992) adaptaron este modelo para tener en cuenta la variación temporal de la temperatura, la presión y la viscosidad pudiendo predecir el contacto íntimo ajustando el modelo a los datos experimentales. Yang y Pitchumani (2001), ya un tiempo después expusieron un modelo fractal para el desarrollo de contactos íntimos que utiliza parámetros que se determinan a través de mediciones del perfil de la superficie. Se realizaron extensas validaciones experimentales que confirmaron la precisión de este tipo de modelos (Yang y Pitchumani, 2002).

Se pueden esquematizar a través del siguiente esquema (Figuras 1-2):

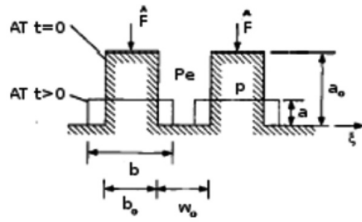


Fig. 1. Esquema para la rugosidad en función del tiempo, temperatura y presión

Con lo cual (Figura 2):

- Inicialmente coexisten dos interfaces distintas.
- La segunda etapa es de contacto íntimo entre las dos superficies.
- Las barreras potenciales asociadas con la falta de homogeneidad de la interfaz han desaparecido

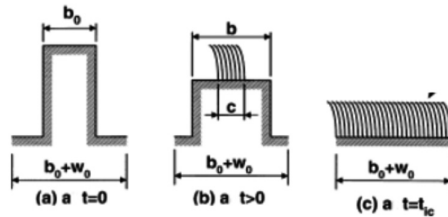


Fig. 2. Modelo de íntimo contacto

Siendo: $b_0 + w_0$ es la celda unitaria, b la región en íntimo contacto y c la región donde se habrá de producir el flujo del polímero a partir de un mojado de las superficies. De la ley de conservación de masa y suponiendo características laminares, se puede determinar la medida del flujo que se produce en la interfaz el cual se define como el grado de contacto íntimo. La expresión para el grado de contacto íntimo, D_{IC} se la puede considerar como:

$$D_{IC} = \frac{1}{w_0 + b_0} \cdot \left[1 + \frac{5P_{app}}{\mu_{mf}} \left(1 + \frac{w_0}{b_0} \right) \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^2 t \right]^{\frac{1}{5}}$$

Donde:

D_{IC} : es el grado de íntimo contacto

μ_{mf} : es la viscosidad (dependiente de la temperatura) del área de la resina en las proximidades del contacto interfacial

P_{app} : es la presión aplicada

a_0, b_0, w_0 : se corresponden con los parámetros de un elemento rectangular simplificado

t : es el tiempo durante el cual la presión es aplicada

Se aprecia la dependencia del contacto con la presión con lo cual si ésta no puede ser aplicada homogéneamente a la interfaz de calentamiento se verá anulada la posibilidad de un contacto íntimo pleno (se entiende en la superficie total) impidiendo en definitiva llevar a cabo correctamente el proceso de inserción de la malla en la superficie polimérica. Dado que el ciclo posterior de soldadura es consecuencia directa “sí y solo sí” del de inserción, las probabilidades de ocurrencia óptimas de ésta se verán reducidas, cuando no anuladas.

Su aplicación a una pieza de geometría final extensa y compleja

Para poder aplicar los conceptos vertidos en los párrafos anteriores analizamos el conjunto de piezas en estudio (Rukavina, *et al.* 2019): dos mediacañas (Figura 3, con zonas 1- plana, 2- troncocónica, 3- cilíndrica) a ser soldadas entre sí en cada una de sus terminaciones planas (Zona 1) y a su vez a un tubo (Figura 4, zona 4) que consta de una cavidad conformada

por una zona cilíndrica y terminaciones troncocónicas.

Al efectuar la inserción se había comprobado la imposibilidad de aplicar la presión de consolidación tal como se había propuesto inicialmente, es decir, a carga total para las condiciones iniciales de estado sólido del polipropileno. Los alambres situados en las áreas de mayor carga final fueron dañados con facilidad (cortados) en los primeros intentos, produciendo una discontinuidad conductiva en el circuito eléctrico. Las presiones actuantes en la zona troncocónica sufrían a su vez, una importante dispersión en los valores de carga efectivamente aplicados, ocasionando zonas de buena inserción y de inserción nula. Por lo tanto, hubo que disminuir la carga aplicada en el estado inicial no superando los 0,53 kg/cm². Recién obtenida una temperatura igual a 190 °C se pudo aplicar la carga teórica con equipo hidráulico. En general el procedimiento de inserción es llevado a cabo a través de una pieza metálica que denominamos molde insertador. Se encuentra calefaccionada a través de resistencias, con forma geométrica de la pieza polimérica en donde se habrá de insertar la malla embebida. Debe soportar la presión necesaria para la ocurrencia del proceso y encontrarse recubierto de material desmoldante (Rukavina, *et al.* 2019, Figuras 1 a 15).

Con lo cual, si bien el procedimiento pudo ser llevado a cabo modificando las condiciones de aplicación de la presión, este tema durante el proceso de inserción ha sido realmente problemático.

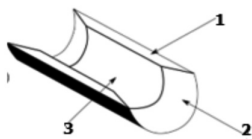


Fig. 3. Media caña

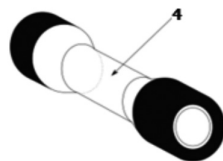


Fig. 4. Tubo

Para llegar a interpretar de forma correcta esta problemática, se efectúa un estudio de la distribución de las presiones de contacto en la interfaz conformada por el polímero – malla – insertador.

Se lo considera como un problema axisimétrico, asignándole las siguientes condiciones de contorno (Figura 5):

- presión uniforme de 0,5 MPa sobre la media caña (contorno derecho)
- desplazamiento nulo prescrito en dirección Z en la base del conjunto
- condición de contacto sin fricción (idealizado) para la interfaz entre la media caña y el tubo de polipropileno.

A partir del cual se llega a las siguientes conclusiones:

1) Como consecuencia de los efectos geométricos, la presión no se transmite de manera uniforme entre los componentes a unir. Se verifica la distribución de presiones en el interior de las piezas (Figura 6), y la presión de contacto en la interfaz (Figura 7).

2) En la interfaz de contacto (zona donde se va a producir la soldadura), existen sectores con presiones de contacto menores a la aplicada, llegándose al extremo de tener un contacto muy reducido o nulo* (color azul oscuro). A su vez se observan zonas puntuales de altas presiones (color rojo) y sectores extensos con presiones de valor medio (color verde).

*La condición de presión de contacto nula es extrema y forma parte de la idealización del modelo, por lo que en principio no se esperaría en la realidad. Su significado físico es la pérdida de contacto entre las superficies (despegue).

Se logran verificar entonces de forma fehaciente las observaciones expuestas en el inicio de este apartado, referidas a la problemática advertida durante el proceso de inserción y que dieron origen a esta propuesta de solución a través del embebido de las mallas calefactoras.

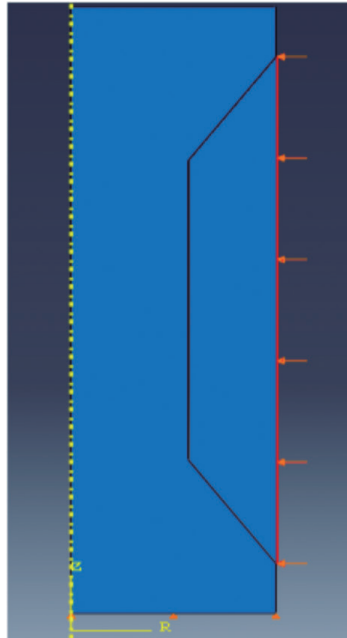


Fig. 5. Cargas aplicadas

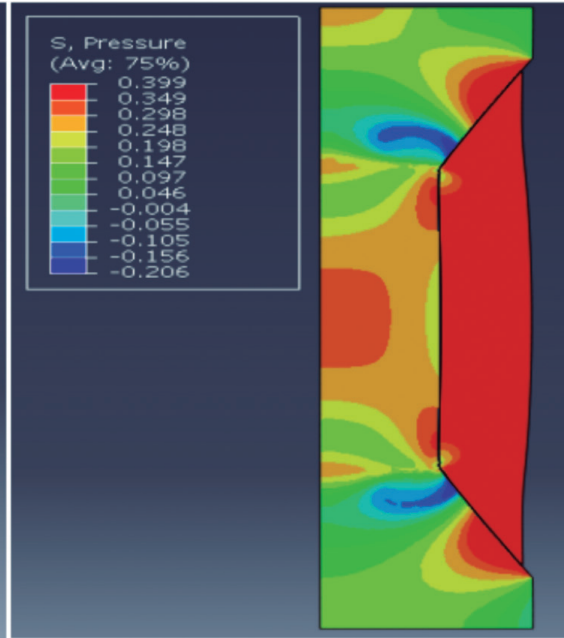


Fig. 6. Campo de presiones resultantes

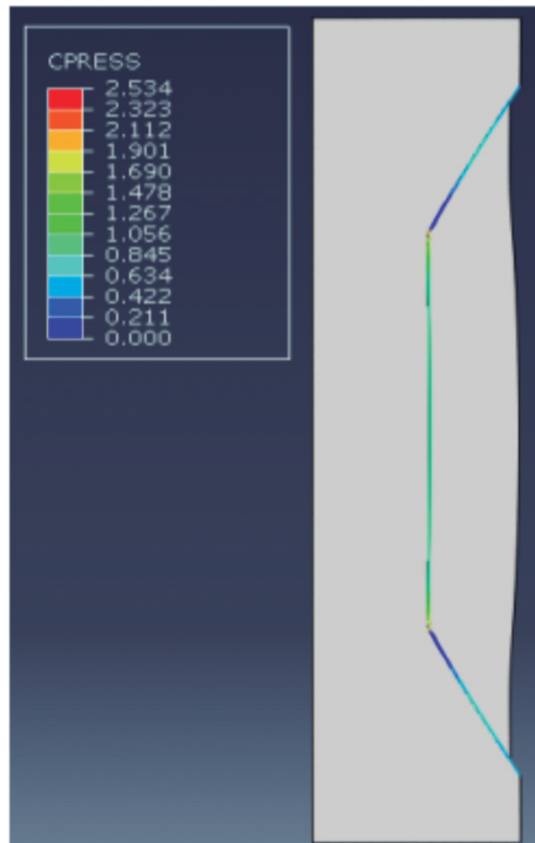


Fig. 7. Presión de contacto en la interfaz de la soldadura

Metodología para efectuar el embebido

El objetivo del embebido se compatibiliza con la inserción de una malla metálica (resistencia eléctrica calefactora) en una matriz poliolefínica termoplástica a fin de obtener una lámina malla – poliolefina (malla embebida), perfectamente recubierta en sus dos superficies. Conformando una sola unidad flexible, mecánicamente resistente y adaptable a las interfaces que posteriormente serán sometidas a su unión a través de la soldadura.

Para llevar a cabo este procedimiento se utilizan dos películas planas de polipropileno cuyos espesores se establecen en un porcentaje del espesor de la malla metálica (Figura 8-5). Se coloca cada una de ellas sobre cada lado de la malla tomando en consideración la instalación de los terminales correspondientes necesarios para el conexionado a la fuente de energía eléctrica. La malla se fabrica en cobre con hilos de 0,30 mm de diámetro, aislados con un primer espesor de anclaje de poliéster imida, el cual para obtener una mejora en las propiedades térmicas se recubre con un compuesto de poliamida imida de 0,05 mm. Se conforma así un circuito en serie. El conjunto montado se ubica entre dos placas calefactoras revestidas en kapton (Figura 8-6) para favorecer el desmolde del conjunto final. Se dispone de un sistema hidráulico generador de la presión de consolidación necesaria (Figura 8-7) para mantener firme el conjunto películas de poliolefina y malla metálica durante el proceso de embebido. Se procede a calefaccionar las placas hasta alcanzar la temperatura previamente establecida logrando embeber totalmente la malla. Finalmente se enfrían las placas, desmoldando el conjunto obtenido (Figura 9). Las placas calefactoras pueden ser perfectamente planas para efectuar en una primera etapa el embebido de la malla en la película de poliolefina y luego en una segunda etapa llevar al conjunto a temperatura de reblandecimiento para permitir darle la forma final requerida para el conjunto mediante matrices específicas (Figura 10) de acuerdo a las necesidades geométricas establecidas dimensionalmente por las piezas de material poliolefínico.

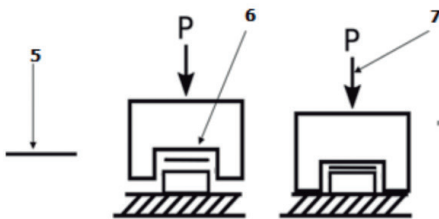


Fig. 8. Embebido sobre placas planas

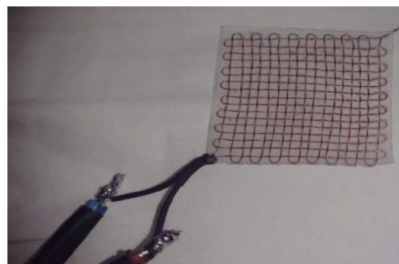


Fig. 9. Malla plana embebida



Fig. 10. Malla embebida vía matrices

Para la correcta puesta a punto de los procedimientos se considera efectuar el embebido de una malla de 40 mm X 40 mm sobre placas planas que luego será insertada en una probeta de similares dimensiones (Figura 1). Para lo cual se toman en cuenta los siguientes parámetros:

- doble película de polietileno de 0,6 mm de espesor (85 % del espesor de la malla)
- presión de consolidación: 7,25 kg/cm²
- temperatura de malla para embebido: 180 °C
- malla de 40 mm X 40 mm con espesor: 0,7 mm
- velocidad de calentamiento: 2,5 °C/segundo
- % área abierta: 72 %
- distancia abierta / diámetro alambres: 1,8 mm / 0,35 mm = 5,14

Inserción de la malla embebida en interfaz de soldadura

Una vez obtenida la malla embebida se efectúa la inserción en una de las caras de las probetas de polipropileno macizo de 40 mm X 40 mm X 40 mm bajo los procedimientos específicos (Figura 11):

- presión de consolidación 7,35 kg/cm²
- calentamiento por resistencias sin potencia eléctrica: hasta 75 °C
- calentamiento con potencia eléctrica y resistencias: desde 75 °C hasta 170 °C
- pendiente de calentamiento 3 °C/segundo
- enfriamiento hasta 100 °C
- calentamiento con potencia y resistencias de 100 °C hasta 190 °C
- pendiente de calentamiento 1,4 °C/segundo
- mantenimiento con control de temperatura: hasta cambio de pendiente en curva de desplazamiento



Fig. 11. Vista de la malla embebida insertada en la interfaz de soldadura

Soldadura de ambas caras de la interfaz

Se procede a la soldadura de ambas caras de las probetas bajo las siguientes premisas:

- presión de consolidación: 7,35 kg/cm²
- temperatura de malla seteada: 230 °C
- pendiente de calentamiento: 2,5 °C/segundo
- mantenimiento a 230 °C: hasta cambio de pendiente de desplazamiento

En la Figura 12 pueden apreciarse las probetas soldadas con la interfaz acondicionada para ensayo mecánico.

Finalmente se procede al análisis vía respuesta a la tracción visualizándose una rotura interlaminar correcta (Figura 13). Para un área final de 2,45 cm X 2,40 cm = 5,88 cm² resulta una carga de rotura promedio de 1582 kg, con lo cual resulta una resistencia a la

tracción de 26,90 kg/cm². Este valor inclusive resulta similar al promedio obtenido en los ensayos sin malla embebida que era de 26,22 MPa (Rukavina *et al.* 2018)



Fig. 12. Vista de la interfaz de soldadura



Fig.13. Respuesta de la interfaz a tracción

Para validar la propuesta de embebido de las mallas se realiza la inserción de las mismas en la media caña de polipropileno (Figura 14) a partir de los mismos elementos insertadores (Figuras 15 y 16) utilizados de forma previa a este procedimiento. El resultado se corresponde con una inserción efectuada correctamente tal como se muestra en la Figura 17.

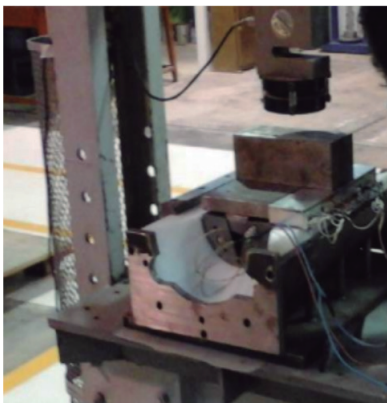


Fig. 14. Inserción zona cilíndrica



Fig. 15. Insertador zona cilíndrica



Fig. 14. Inserción zona cilíndrica



Fig. 15. Insertador zona cilíndrica

Posibilidad de utilización de poliolefinas en polvo (sinterizadas)

Desde el punto de vista operativo resulta necesario indicar que para el embebido también pueden ser utilizadas poliolefinas en polvo o sinterizadas. Para ello resulta necesario:

- 1) seleccionar un molde con la geometría final de la malla a embeber, siendo el molde formado por un conjunto de placas metálicas revestidas en material desmoldante provista con un sistema de calefacción,
- 2) colocar material poliolefínico en polvo en dicho molde en una cantidad necesaria y suficiente para recubrir al menos el 50% del espesor de la malla, ubicar la malla metálica y luego volver a introducir el mismo material poliolefínico en polvo en una cantidad equivalente a la necesaria para cubrir el porcentaje restante del espesor total de la malla llegando a embeber la totalidad del espesor de la malla,
- 3) cerrar el molde, aplicar presión de consolidación entre 5 kg/cm² y 7,5 kg/cm², y calefaccionar el conjunto polvo - malla a partir del energizado de la propia malla hasta temperatura de fusión del material poliolefínico, de tal manera que los terminales de conexión entre la malla y la fuente de alimentación necesaria para su energizado queden al descubierto por fuera de las películas poliméricas,
- 4) mantener estas condiciones el tiempo necesario hasta lograr la fusión de todo el material poliolefínico en polvo logrando de esta forma embeber la malla metálica y
- 5) enfriar y desmoldar el conjunto obtenido.

Análisis del modelo de soldadura por malla embebida sin inserción

Como primera aproximación y a partir de conceptos basados en fenómenos transitorios y no isotérmicos, se define la consolidación (Figura 18) a partir de una etapa crítica y pseudo-secuencial de procesos que consisten en: el íntimo contacto y la autohesión (Hou M. 1999).

- Íntimo contacto: resulta ser un mecanismo de coalescencia que permite y, tal como se demostró en los apartados anteriores, obtener un contacto perfecto entre dos interfaces a soldar.

- Autohesión: se define como la interdifusión de las cadenas a nivel molecular, a través de la interfaz de soldadura, de dos piezas termoplásticas puestas en contacto. Este es un concepto introducido en realidad para poder monitorear el desarrollo de la difusión molecular en la interfaz de soldadura. 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. 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 los semicristalinos debido a la relativa 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.

Luego, el aporte de una película termoplástica (malla embebida) en la interfaz de soldadura habrá de resultar beneficiosa en grado sumo para la formación del contacto líquido – líquido entre caras previo a la interdifusión de sus cadenas moleculares. En realidad, y desde una concepción práctica, no hará más que aumentar la movilidad de las cadenas, condición necesaria y suficiente para interdifundir, siempre que el material de recubri-



Fig. 18. Evolución del proceso global de soldadura

miento de la malla resulte totalmente compatible en sus propiedades con los utilizados en los sustratos a soldar.

Su aplicación a una tubería aislada térmicamente

Se analiza en los siguientes apartados y Figuras 19 a 22 la aplicación de este modelo de soldadura al revestimiento de las juntas de tubos preferentemente destinadas al transporte de cualquier tipo de fluido que requiere ser conducido a través de una tubería aislada térmicamente. Este procedimiento permitirá lograr una continuidad entre los revestimientos o encamisados en la zona en que los tubos se unen entre sí (Junta). Se requiere para esto el uso de una camisa o cuerpo tubular que se fija por medio de una soldadura entre los revestimientos presentes en los extremos de los tubos adyacentes a unir.

En la Figura 19 pueden observarse los tubos (1 y 2), los que presentan un primer revestimiento (3) de espuma de poliuretano y un segundo revestimiento o encamisado de polietileno (4), ya soldados y sujetos mediante una junta (5), quedando así una porción de los tubos (1 y 2) que deberá ser cerrada y aislada. Se muestra además las respectivas mallas embebidas (6), ya instaladas sobre los extremos de los revestimientos o encamisados originales de los tubos (1 y 2), y una camisa o cuerpo tubular (7), destinado a cubrir la junta (5) y realizada en una pieza entera, ya enhebrado sobre el revestimiento o encamisado de polietileno (4) de uno de los mencionados tubos, y en forma previa a la soldadura de dos tubos consecutivos.

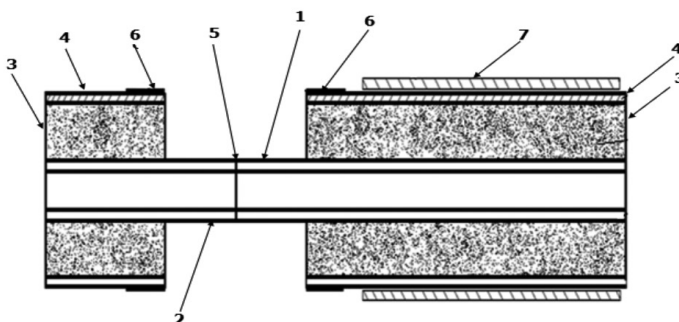


Fig. 19. Vista de dos tubos de acero revestidos y soldados

En la Figura 20, se observa cómo la camisa o cuerpo tubular (7) es posicionada sobre cada malla embebida (6), teniendo dicha camisa (7) una perforación superior (7a), capaz de permitir la inyección de espuma de poliuretano y consecuentemente el llenado de la cavidad (8).

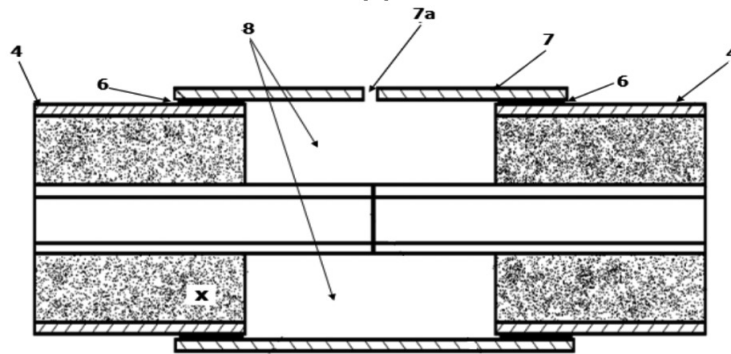


Fig. 20. Posicionamiento de la camisa sobre mallas embebidas

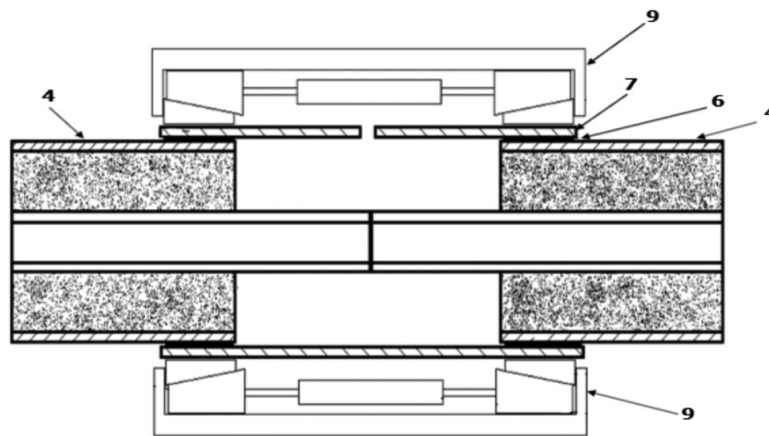


Fig. 21. Soldadura vía mallas embebidas de la camisa de polietileno y el revestimiento

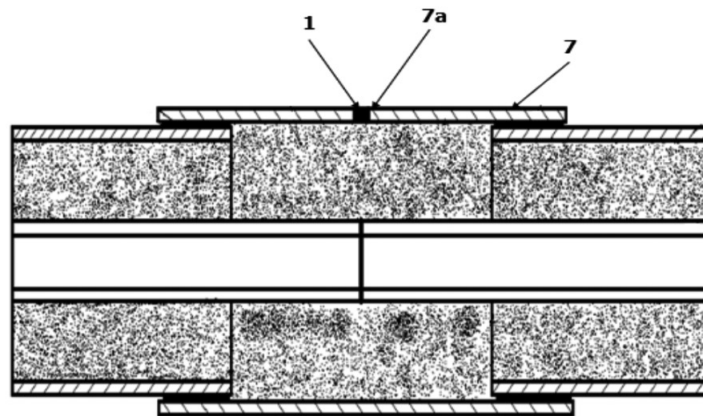


Fig. 22. Tubería con continuidad de aislación térmica original en su junta

En la Figura 21 se puede ver el posicionamiento de un equipo para precalentar y comprimir (9), la zona donde se habrá de efectuar la soldadura por medio de las mallas embebidas (6), entre la camisa o cuerpo tubular (7) de polietileno y el revestimiento o encamisado original (4), del mismo material con la que se revisten los tubos (1 y 2) a unir.

Se observa en la Figura 22, que luego de la soldadura de la camisa (7) con los segundos revestimientos (4) de cada tubo, se ha procedido al llenado de la cavidad (8) con espuma de poliuretano, habiéndose luego colocado un tapón de polietileno (10), soldado por termofusión en la abertura (7a) de la camisa o cuerpo tubular (7).

Este procedimiento permite lograr una continuidad entre los revestimientos o encamisados de polietileno en la zona en que los tubos se unen entre sí (Junta) mediante el uso de una camisa o cuerpo tubular que se fija por medio de una soldadura entre los revestimientos de polietileno presentes en los extremos de los tubos adyacentes a unir. Una vez colocada esta camisa o cuerpo tubular:

- cubrirá la junta de unión de dichos tubos adyacentes y tomará contacto por sus extremos con los revestimientos o encamisados de polietileno primero y segundo de los tubos.
- se generará un espacio o cavidad interior perfectamente sellada, definida entre las superficies internas de la camisa y los tubos y en la cual se inyectará espuma de poliuretano, recubriendo así el área exterior de la junta soldada.

Metodología para efectuar el embebido

La metodología resulta ser exactamente la misma que la desarrollada anteriormente en el apartado **Metodología para efectuar el embebido** para placas calefactoras planas. La longitud de la malla a embeber será proporcional al diámetro de la tubería a utilizar. La Figura 23 muestra el sistema malla – film de polietileno previo al embebido.



Fig. 23. Malla previa a embebido en polietileno para soldadura en tubería de 30 Pulgadas

La Figura 24 permite observar la malla embebida en el polietileno lista para ser utilizada en la soldadura.



Fig. 24. Malla embebida en polietileno para soldadura en tubería de 30 pulgadas

Soldadura de ambas caras de la interfaz

Como se ha visto en el apartado **Análisis del modelo de soldadura con inserción de malla embebida** se requiere efectuar inicialmente una inserción en una de las interfaces de polietileno para luego poder llevar adelante la soldadura. Ahora bien, para una elevada respuesta mecánica se necesitan valores de presión superiores a los 7 kg/cm^2 para poder efectuar la inserción (apartado **Inserción de la malla embebida en interfaz de soldadura**). Como se ha explicitado en apartado **Su aplicación a una tubería aislada térmicamente**, por debajo de la camisa de polietileno se encuentra una capa de poliuretano. La presión máxima que soporta este material se establece en $4,5 \text{ kg/cm}^2$. Luego, si se efectuara la inserción no resultaría factible la eliminación de los vacíos producidos por presencia de volátiles durante este proceso. Es decir, si se insertara a la presión

requerida por la metodología utilizada se inutilizaría el revestimiento de poliuretano (Figura 25). A su vez, y como se verifica por medio de la Figura 26, el diámetro de la camisa a soldar resulta ser superior al del polietileno del tubo para poder colocar la camisa por sobre el tubo. Una vez colocada se flamea con aire caliente en sus extremos para reducir su diámetro y poder efectuar la soldadura (Figuras 27 y 28).

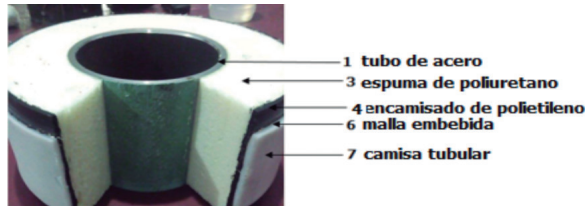


Fig. 25. Vista de un corte del tubo de acero con aislamiento térmico y soldadura con malla embebida



Fig. 26. Vista de tubo y camisa de polietileno – simulación laboratorio –



Fig. 27. Vista de tubo con camisa de polietileno soldada – Simulación laboratorio –

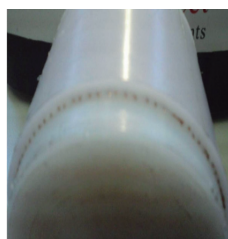


Fig. 28. Vista interfaz de soldadura polietileno – polietileno con malla embebida – Simulación laboratorio

Con lo cual surgen de lo explicitado las dos condiciones de contorno que impiden claramente efectuar la inserción del agente de calentamiento:

- en la camisa de polietileno del tubo dada la capa inferior de poliuretano
- en la camisa de polietileno exterior dado que sus diámetros en los extremos se ven reducidos por calentamiento previamente a la soldadura.

De forma simultánea se incorpora un último problema a resolver inherente a la soldadura (y no ya a la inserción). La presión debería ser superior a los 7 kg/cm^2 (apartado **Soldadura de ambas caras de la interfaz**) con lo cual tampoco podría ser llevado a cabo este proceso.

Cabe efectuar, para resolver ambas problemáticas, el siguiente análisis:

Existen dos metodologías para efectuar el proceso de soldadura: a partir del control del desplazamiento (desplazamiento constante) o de la presión (presión constante). En la técnica de control de desplazamiento se aplica una presión inicial al material a soldar pudiéndose controlar durante todo el proceso. 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. Para todos los procedimientos desarrollados hasta aquí hemos utilizado la metodología de presión constante dado que el sistema de control resulta ser mucho más sencillo y tanto la malla como la malla embebida se insertan en una de las caras previo a la soldadura. En este caso, por el contrario, se ha de aplicar necesariamente la técnica de desplazamiento constante. Para su justificación y, de acuerdo con Hou y Friedrich (1992), comenzamos graficando la evolución de la presión de consolidación y la temperatura en un proceso en el que el control de carga se efectúa imponiendo un desplazamiento constante al actuador (Figura 29).

En la etapa inicial de compactación (etapa 1), hay un incremento de la temperatura; la carga (o volumen) aumenta debido a la expansión térmica de la resina, disminuyendo luego cuando 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. El resultado de la compactación se verifica en una disminución de la carga, la cual es adicionalmente amplificadas por la reducción en el volumen asociado a la cristalización de la resina.

En la etapa 2, la expansión volumétrica asociada con la fusión de cristales y la expansión térmica 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. El tiempo transcurrido se define como el tiempo necesario para que ocurra la fusión.

En la etapa 3, la carga cae en forma abrupta debido a la fusión macroscópica y escurrimiento 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.

En la etapa 4 ya no hay flujo de corriente y comienza el enfriamiento. La pendiente de la curva de carga disminuye debido a que el flujo transversal se detuvo y el material está experimentando un proceso de solidificación con la consecuente contracción de la interfaz soldada. El efecto de la presión de soldadura inicial aplicada debe ser verificado mediante ensayos mecánicos. Presiones iniciales demasiado bajas 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. 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.

Como se puede visualizar en el gráfico la máxima presión aplicada al sistema no se corresponde con la temperatura final de la malla. Para nuestro sistema la presión máxima de 4,5 kg/cm² (máxima carga aceptada por la capa de poliuretano) se encuentra a los 190 °C, (censada en malla), temperatura superior al punto de fusión del polímero (135 °C) y menor a los 240 °C de malla calefactora a los que se llega para efectuar correctamente la

soldadura. La presión de inicio es menor a la final – en este caso se inicia a 3 kg/cm^2 – que implica un cierto desplazamiento el que se mantendrá constante durante todo el procedimiento de soldadura.

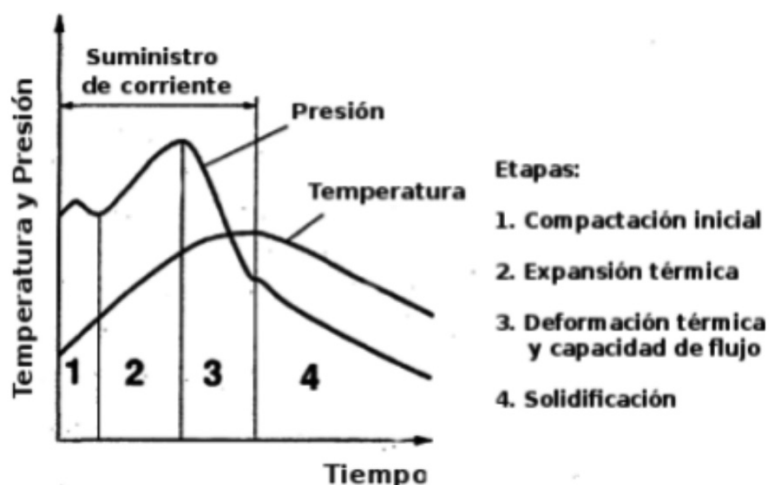


Fig. 29. Evolución de la temperatura y presión mediante desplazamiento constante

Las resinas semicristalinas solo sufren una ligera disminución en su viscosidad al sobrepasar la temperatura de transición vítrea (debido a la contribución del porcentaje de polímero en estado amorfo en su estructura) comenzando a fluir cuando tiene lugar la completa desaparición de sus grupos cristalinos, esto es por encima de su temperatura de fusión. La presión lo que permite es establecer en un primer paso un contacto íntimo líquido – líquido entre ambas caras de la interfaz (polímero – malla embebida) a partir de la expulsión mediante el flujo de resina del aire atrapado en ésta. Luego y en un segundo paso permitir una difusión a nivel molecular dando lugar a la autohesión. Cuando la misma toma valores entre $0,15$ y $0,4 \text{ MPa}$ (para sistema de presión constante) incide solo en el contacto íntimo, pero no en la autohesión. Luego el proceso dependerá solamente de la temperatura (que será mayor) y del tiempo, cuestión que no es correcta dado que las altas temperaturas aceleran la formación de huecos. Con lo cual resulta imposible poder aplicar el procedimiento de presión constante para nuestras interfaces poliuretano – polietileno.

Los valores óptimos de resistencia obtenidos de los ensayos mecánicos se corresponden con $0,735 \text{ MPa}$ para la metodología de presión fija (Rukavina *et al.* 2018). En cambio, para desplazamiento constante se obtienen valores óptimos para una presión de $0,43 \text{ MPa}$.

En el caso de los materiales en estudio – polipropileno, polietileno – resulta que:

- a mayor temperatura la viscosidad es menor; la transmisión de presión al material es mayor y por lo tanto se produce una menor resistencia del fundido. A medida que el polímero funde su capacidad de soportar cargas externas tiende a cero dado que el módulo disminuye.
- la viscosidad permanece constante en fase líquida y depende solo de la temperatura con lo cual la interfaz es un flujo prácticamente estable. Luego se determina una presión de $4,3 \text{ kg/cm}^2$ aplicada a los $190 \text{ }^\circ\text{C}$ (para mantener desplazamiento constante) la cual resulta ser la correcta en base a los valores de resistencia a tracción medidos.

Los valores a considerar para efectuar la soldadura:

- presión de consolidación: presión de inicio hasta $190 \text{ }^\circ\text{C} = 3 \text{ kg/cm}^2$; a partir de $190 \text{ }^\circ\text{C}$

presión = 4,3 kg/cm²

- temperatura de malla seteada: 240 °C

- pendiente de calentamiento: 2,5 °C/segundo

- mantenimiento a 240 °C: hasta cambio de pendiente de desplazamiento

Se anexan las siguientes figuras donde se visualiza la aplicación de esta metodología a dos tubos reales con el consiguiente desarrollo:

a) dos tubos de acero soldados con el recubrimiento: poliuretano y encamisado de polietileno. A su lado camisa tubular de polietileno a soldar con malla embebida sobre el encamisado (Figura 30)

b) malla embebida (Figura 31)

c) soldadura de interfaces polietileno – polietileno (Figura 32)

d) inspección en interfaz de soldadura (Figura 33)

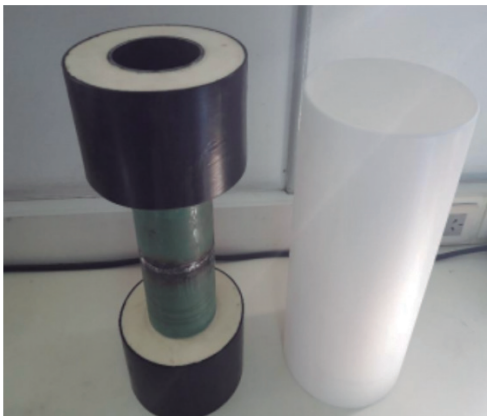


Fig. 30. Vista de acuerdo con a)



Fig. 31. Vista de acuerdo con b)



Fig. 32. Vista de acuerdo a c)



Fig. 33. Vista de acuerdo a d)

Conclusiones

1- Queda demostrada la necesidad del embebido de las mallas calefactoras para su aplicación en el proceso de inserción en una de las caras de la interfaz a soldar, cuando de acuerdo a los factores geométricos, resulte necesario utilizar esta metodología previamente a la soldadura.

A través de este procedimiento se ha logrado:

1a- Linealizar la relación de la resistencia con la temperatura durante el primer calentamiento en la unión por fusión evitando una notable dispersión en los valores de carga efectivamente aplicados a cada una de las áreas en que se subdivide la geometría del sistema.

1b- Mantener constantes las condiciones de calentamiento en la interfaz polimérica de acuerdo a los parámetros óptimos requeridos para el proceso de soldadura.

2- Frente a la imposibilidad de efectuar la inserción del agente de calentamiento en una de las interfaces poliméricas debido a restricciones en la aplicación de la presión de consolidación, resulta factible efectuar su embebido para efectivizar, a través de su utilización como conjunto malla – película o malla embebida, el proceso de soldadura por fusión.

A través de este procedimiento se ha logrado:

2a- Facilitar el contacto líquido – líquido entre las interfaces durante el proceso al permitir el flujo de polímero desde el aporte del agente de calentamiento a los sustratos correspondientes evitando la posible capa de aire que se establece en la interfaz malla / polímero y que tanta contribución negativa aporta al sistema. Para ello la presión de consolidación se aplica indefectiblemente a desplazamiento constante.

Referencias

- DARA P.H. y LOOS A.C., (1985). Thermoplastic matrix composite processing model (trans: Structures CfCMA). Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg.
- HOU M. y FRIEDRICH K., (1992). Resistance welding of continuous glass fibre-reinforced polypropylene composites. *Composites Manufacturing*, vol. 3, n° 3, 153 – 163.
- HOU M., (1999). Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composites using alternative heating element. In *Composite Structures*, n° 47, 667 – 672.
- MANTELL S.C. y SPRINGER G.S., (1992). Manufacturing Process Models for Thermoplastic Composites. *Journal of Composite Materials* 26(16), 2348–2377
- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M.C., HIGES, M. y FERRARI, C., (2016). Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja en *PROYECCIONES*, UTN BA, año 14, n°2, octubre de 2016.
- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M.C., HIGES, M., FERRARI, C. y DINIELLO F., (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.
- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M., FERRARI, C., DINIELLO F. y ESPINOZA C., (2018). Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja en *PROYECCIONES*, UTN BA, año 16, n°2, octubre de 2018.
- RUKAVINA MIKUSIC J., DI STEFANO, M.C., FERRARI, C. y DINIELLO F., (2019). Soldadura de polímeros termoplásticos vía mallas calefactoras: su aplicación a piezas de geometría de revolución extensa y compleja en *PROYECCIONES*, UTN BA, año 17, n°1, octubre de 2019.
- YANG F. y PITCHUMANI R., (2001). A fractal Cantor set based description of interlaminar contact evolution during thermoplastic composites processing. *Journal of Materials Science* 36(19), 4661–4671.
- YANG F. y PITCHUMANI R., (2002). Interlaminar contact development during thermoplastic fusion bonding. *Polymer Engineering & Science* 42(2), 424–438.