

Field Joint Coating

REVESTIMIENTO TÉRMICO DE JUNTAS POST SOLDADURA EFECTUADAS EN DUCTOS DE ACERO REVESTIDOS CON POLIOLEFINAS.

Resumen: Desarrollo de un método de revestimiento térmico de los espacios libres de recubrimiento primario necesarios para efectuar las uniones soldadas de las tuberías en la extracción petrolera offshore. Los tubos recubiertos permiten dar cumplimiento a las exigencias impuestas por el medio en el que habrán de operar: protección anticorrosiva, aislación térmica, flotabilidad y resistencia a altas presiones. Sin embargo, no se ha podido encontrar una metodología satisfactoria para revestir las juntas en campo logrando impedir que las propias condiciones de operación estimulen procesos corrosivos irreversibles para el daño del ecosistema. Del fundamento del proyecto surge la propuesta de un sistema innovador de revestimiento basado en la incorporación de "mediacañas" sólidas de polipropileno, con tolerancias dimensionales ajustadas a las cavidades originadas entre los extremos de dos tubos de acero, consecutivos y previamente soldados, efectuando la vinculación entre ambas y el recubrimiento primario a través de un proceso de soldadura por resistencias.

Palabras Claves: Tuberías offshore; Revestimiento térmico; Juntas de campo; Mallas resistivas.

Abstract: It address developing thermal coating method clearances primary coating necessary to carry out welded joints of pipelines in offshore oil extraction. The coated tubes allow complying with the requirements imposed by the environment in which they will operate: corrosion protection, thermal insulation, buoyancy and resistance to high pressures. However, it has not been able to find a satisfactory method for coating field joints in achieving prevent that its own operating conditions stimulate corrosive processes to irreversible damage to the ecosystem. After the foundation of the proposed project comes an innovative system based on the incorporation of "half shells" solid polypropylene, with tight dimensional tolerances to the cavities arising between the ends of two consecutive steel tubes and previously welded, making the link both between the half shells as the primary coating through a resistance welding process.

Keywords: Offshore pipelines; thermal coating; field joint coating; resistive meshes.

Juan Rukavina Mikusic⁽¹⁾, Susana Noemí Santana, María Cristina Di Stefano⁽¹⁾, Carlos Ferrari⁽²⁾

⁽¹⁾Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Buenos Aires, Medrano 951, CABA, C1179AAQ, Argentina.

⁽²⁾Universidad Tecnológica Nacional – Unidad Académica Bariloche.

Mail: juanrukavina@gmail.com

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La continua y creciente demanda de energía primaria a nivel mundial, combinada con el agotamiento de las reservas petroleras convencionales, impulsa nuevas búsquedas en campos remotos, de creciente dificultad asociada, incrementándose en forma sistemática la exploración y producción en zonas offshore de aguas profundas y ultra profundas. La operatoria se ha tornado compleja y de alto riesgo en el impacto ambiental, requiriéndose el desarrollo de nuevas tecnologías para su resolución. Entre ellas se encuentra la metodología de revestimiento térmico de alto espesor de las juntas efectuadas en campo (Field Joint Coating) en ductos de acero revestidos externamente con materiales poliméricos.

Las tuberías de acero empleadas en instalaciones offshore son revestidas en plantas para dar cumplimiento a las distintas exigencias impuestas e inherentes a cada uno de los proyectos donde serán empleadas, debidas a factores mecánicos, térmicos y ambientales. A partir de las distintas funciones a cumplir por los materiales utilizados en los recubrimientos primarios, el revestimiento de las juntas debe ofrecer no sólo una relación equitativa de calidad a semejanza de las líneas principales sino también una óptima adherencia a las mismas (junta – recubrimiento primario), para todo el espectro del espacio temporal asociado a las condiciones de vida expuestas en el diseño.

PROBLEMÁTICA PLANTEADA

Se denomina Field Joint Coating (FJC) al revestimiento de la zona libre – cutback – comprendida entre los extremos de dos tubos de acero consecutivos previamente revestidos y soldados, tal como se observa en la Figura 1. Las dimensiones del mismo varían dentro de límites especificados por proyecto y para espesores

equivalentes a los del material primario.

Con base en lo expresado en los párrafos superiores, como una expresión de las condiciones de contorno, y a modo de estado del arte surge que en la actualidad la manufactura de las juntas de campo no logra alcanzar el grado de confiabilidad necesario como para impedir que las propias condiciones mecánico - ambientales – tal como se observa en la Figura 2 – puedan estimular procesos corrosivos irreversibles en el tiempo para el daño del ecosistema debido a:

a) Características del material: Se utilizan poliuretanos elastoméricos los cuales no poseen el mismo grado de aislación térmica que el polipropileno. Debido a su incompatibilidad química con este último no provee la adherencia requerida sobre la superficie del revestimiento primario imposibilitando un correcto sello al agua específicamente a grandes profundidades donde la presión hidrostática adquiere valores considerables, aunados al efecto degradativo al que se ve sometido el poliuretano por hidrólisis a consecuencia de las elevadas presiones sostenidas en el tiempo.



Figura 1. Tubo recubierto.

b) Procesos utilizados: Inyección de polipropileno (Injection molding PP – IMPP): su aplicación requiere de una considerable masa (proporcional al espesor del recubrimiento) aplicada a elevada temperatura. Demanda un

excesivo período de enfriamiento pudiendo presentar problemas de contracción. Este sistema crítico de masa, temperatura y tiempo de enfriamiento conforma un entorno de riesgo para su utilización como sistema de aplicación en zonas offshore.



Figura 2. Juntas colocadas.

PROPUESTA DE SOLUCIÓN A LA PROBLEMÁTICA PLANTEADA

Como se ha visto, los materiales de recubrimiento adquieren una importancia crucial desde la concepción singular de la complejidad de cada proyecto en particular, considerándose los de matriz polimérica de mayor relevancia debido fundamentalmente a su baja densidad y razonables temperaturas de proceso, permitiendo lograr considerables reducciones de los pesos estructurales sin disminuir de forma inabordable sus prestaciones mecánico - ambientales,

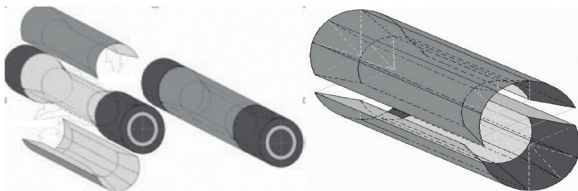


Figura 3. Vista de las medias cañas a incorporar.

La ingeniería ha encontrado en estos materiales la posibilidad de su utilización para el conformado de estructuras por lo general complejas y de elevada extensión imponiendo nuevas metodologías de desarrollo de uniones a través de un ensamblado fiable y competitivo de piezas para el proceso de manufactura de las mismas.

Luego, y al poder satisfacer en forma acabada con las normativas exigibles para el logro de estos objetivos adquieren definitivamente una especial relevancia fundamentalmente las matrices termoplásticas a partir de una microestructura formada por cadenas poliméricas lineales no entrelazadas permitiendo procesos de fabricación que no implican reacciones químicas de polimerización o curado, sino sólo transformaciones físicas: reblandecimiento o fusión durante el calentamiento y solidificación.

Considerando específicamente la metodología de revestimiento térmico de alto espesor de los espacios libres de recubrimiento primario necesarios para efectuar las uniones soldadas en las tuberías y, a partir de las restricciones mencionadas en la Sección 2, referida a la problemática planteada a partir del recubrimiento del cutback por medio de inyección de poliuretano o polipropileno, se procura la resolución tecnológica mediante un sistema basado en la incorporación de mediacañas de polipropileno previamente manufacturadas, tal como se observa en la Figura 3, ajustadas a las cavidades, efectuando su vinculación entre sí y al recubrimiento primario a través de un proceso de soldadura por resistencias (mallas) con las siguientes características: utilización del mismo tipo de poliolefinas en las juntas de los tubos de acero y revestimiento original de los mismos; manejo de pequeñas porciones de material a altas temperaturas; reducción de los intervalos asociados a la aplicación y enfriamiento permitiendo obtención de altos valores de

adherencia en las zonas de solapado (índice porcentual respecto del recubrimiento primario).

Al corresponderse con una etapa de un proceso continuo lo que se busca evitar, entre otras cuestiones de similar importancia, es que convierta propiamente la misma en la limitante de la operatoria global.

SOLDADURA DE TERMOPLÁSTICOS POR MEDIO DE RESISTENCIAS

La soldadura por resistencias, Offringa A. et al. (2011), Sierksma D.: (2012), Stavrov D. y Bersee H. (2011), Van Wijngaarden M. J. et al. (2010), Taylor N. y Davenport R. (1991), Dubé M. et al. (2009), Yousefpour A. et al. (2004), Ageorges C. y Ye I. (2002), Hou M. et al. (1999), basa su ventaja en la capacidad de fluir de los materiales termoplásticos cuando son sometidos a procesos térmicos – calentamiento a temperatura superior a la de fusión T_m – permitiendo el flujo del polímero y recuperar, una vez enfriados, sus propiedades iniciales. Esta propiedad permite 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 (autohesión).

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

a) las condiciones de contorno: material de los sustratos, preparación superficial, mallas resistivas, operatoria de inclusión en la interfaz, dimensiones de la zona a soldar, metodología para la aplicación de la corriente eléctrica, metodología para la aplicación de la presión.

b) los parámetros del proceso: que permiten modificar la calidad final de la unión y su rango de variación

queda determinado por las condiciones de contorno: intensidad de corriente (temperatura del proceso), presión de consolidación, tiempo de soldadura.

En síntesis la soldadura se caracteriza, a partir de un ciclo T-t-P, por utilizar una corriente eléctrica para calentar un implante resistivo situado en la interfaz de los elementos a unir. Por efecto Joule la temperatura se eleva fundiendo el polímero circundante.

Las mallas en general son metálicas fundamentalmente de acero inoxidable, cobre o aluminio considerando para su uso factores asociados a la resistividad inherente de cada uno de estos materiales, sus propiedades mecánicas y de resistencia ambiental.

Propiedades que deben cumplir: permitir la difusión de las cadenas poliméricas de los sustratos para efectivizar la unión y lograr homogeneidad en el calentamiento, tratando de minimizar la cantidad de material metálico presente en la interfaz sin desmerecer la homogeneidad en el calentamiento, Yousefpour A. et al. (2004), Hou M. et al. (1999). Por lo tanto se trata de buscar 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.

La Figura 4 muestra un esquema de funcionamiento del proceso considerando los elementos fundamentales que conforman el sistema.

Las mallas deben estar aisladas para lograr homogeneidad en la distribución de la temperatura, Dubé M. et al. (2008). La resistividad no resulta homogénea en el sentido longitudinal de los hilos debido a una gradual modificación en el mecanismo de transferencia de calor, lo cual se traduce en gradientes de temperatura provocados por las diferentes condiciones de contorno punto a punto del elemento calefactor. Por lo tanto, la resistencia podría ser esquematizada como

un conjunto de pequeñas resistencias eléctricas en serie, cuyas resistencias se modifican como consecuencia de la variación en las condiciones de contorno. Cuando el polímero empieza a fluir comienza también a expulsar gradualmente el aire de la interfaz homogeneizando así el contorno que rodea la malla.

El número de puntos calientes relacionados con las zonas de la malla directamente en contacto con el aire disminuye con el tiempo del proceso. La gradual disminución de esos puntos calientes y el incremento de la temperatura debido al efecto Joule resultan en una región casi constante de resistencia en la evolución eléctrico-térmica de la malla metálica. Una vez soldados los materiales la malla metálica se encuentra completamente impregnada y circundada por el mismo componente característico de la matriz. Como resultado se obtiene un mecanismo de transferencia de calor homogéneo que da lugar a una funcionalidad evolutiva lineal entre resistencia y temperatura del elemento calefactor.

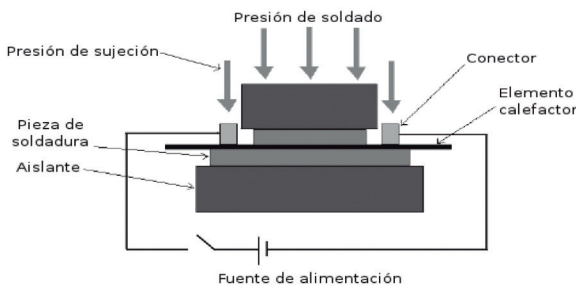


Figura 4. Esquema de funcionamiento.

ESQUEMA GLOBAL DE LOS PROCEDIMIENTOS A SEGUIR PARA LA CONCRECIÓN DEL PROYECTO

El esquema de abordaje a la problemática incluye tres grandes bloques: El proceso de transferencia de calor, el

mecanismo de consolidación y la etapa de enfriamiento – recristalización tal como se observa en la figura 5.

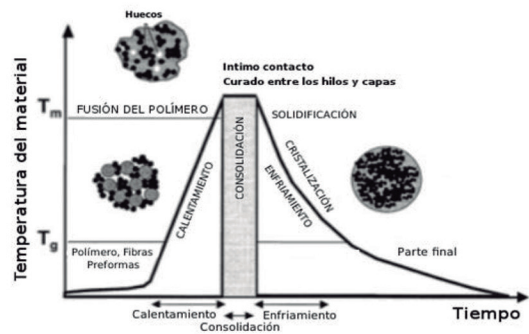


Figura 5. Esquema global de los procedimientos a seguir para la concreción del proyecto.

Cabe también considerar en primera instancia la preparación superficial de las caras a soldar. En principio, la calidad de las uniones soldadas solamente se ve afectada (en cuanto a su preparación) cuando la transferencia de agentes desmoldantes a la interfaz de unión es apreciable, Stavrov D. y Bersee H. (2005). Luego se puede optar por una limpieza con acetona de las superficies en contacto, considerando que los fenómenos experimentales irán indicando las distintas pautas a ser consideradas al respecto.

Proceso de Transferencia de Calor

El perfil de densidad de corriente aplicado a la malla es la variable que para unas condiciones de contorno dadas determina la evolución temporal de la temperatura en la interfaz de soldadura. El calor puede ser generado a partir de la aplicación de una potencia constante – perfil creciente de temperatura hasta desconexión de la fuente – o de una potencia que se modifica gradualmente para conseguir una región de temperatura constante, considerando una etapa inicial de calentamiento rápido seguida de una meseta con

intensidad de corriente variable. Esta segunda opción resulta ser la viable para evitar sobrecalentamientos y por ende envejecimiento en la zona de unión. El tiempo de calentamiento se convierte en parámetro fundamental pudiendo ser controlado determinando, conjuntamente con el tiempo de enfriamiento, en definitiva la calidad final del proceso de soldadura, Stavrov D. y Bersee H. (2003).

Como primera condición necesaria, conocidas la intensidad y la tensión, debe resultar posible correlacionar y caracterizar la vinculación existente entre la resistencia de las mallas, su temperatura a partir del material seleccionado y el gradiente de temperaturas en la interfaz a soldar.

Unificando criterios de circulación de corriente y máxima homogeneidad considerando el área total de la malla resistiva, se inducirá a la utilización de ambos sentidos de circulación para lo cual resultará necesario contar con una malla conformada con hilos metálicos aislados. La idea inicial, dada la temperatura de utilización de la malla, consiste en utilizar alambres de cobre recubiertos. El recubrimiento se conforma de un primer espesor de anclaje conformado por poliéster imida, el cual y para obtener las propiedades térmicas se recubre con un compuesto del tipo de la poliamida imida. La poliamida-imida (PAI) es un polímero termoplástico amorfo que tiene excepcionales propiedades de resistencia mecánica, térmica y química. Sus dimensiones se asocian en principio a los siguientes valores: diámetro de hilos: 0.35 mm, abertura: 1.80mm, espesor de malla: 0.70 mm, área abierta: 75%.

Al establecerse una geometría compleja no plana (Figura 3) debe efectuarse el diseño del equipamiento específico para el tejido de las mallas tanto en su faz plana (incluida la circular) y la correspondiente a la zona tronco-cónica de las mediacañas. Al ir insertadas

dentro de las mismas mediacañas deben ser fabricadas observando la geometría (con las tolerancias dimensionales ajustadas) para la cual fue dispuesta su ubicación.

En su conjunto el proceso de transferencia de calor incluirá el desarrollo del dispositivo para la aplicación de corriente sobre el agente resistivo, determinación de la temperatura en la interfaz de soldadura, determinación del perfil de intensidad – tiempo para las etapas de calentamiento y meseta, requisitos de potencia necesarios para las distintas etapas de calentamiento y meseta, determinación de los gradientes térmicos en la zona de soldadura, interpretación del proceso y su caracterización a través de MEF.

Este paso será fundamental porque una vez establecido el vínculo entre la intensidad de corriente y la temperatura permitirá diseñar la fuente generadora de potencia y formular el número de circuitos en que será subdividido el futuro sistema de las mediacañas.

Conviene hacer notar aquí que las propiedades de los polímeros son muy sensibles al cambio en la temperatura y que la operación de soldadura requiere un considerable salto térmico – T_m -. Las propiedades térmicas no pueden ser asumidas como constantes durante el proceso; por lo tanto con el fin de determinar el campo de las temperaturas con precisión se deben utilizar las propiedades del material como dependientes de la misma. Luego el análisis térmico transitorio se convierte en no lineal (conductividad térmica variable) con lo cual no se puede aplicar un método analítico para resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el sistema en estudio, cuestión a resolver por MEF, implementándose un modelo numérico de transitorio más un algoritmo computacional que permitan la optimización del proceso a través de la obtención de un conjunto único y físicamente aplicable de valores de las variables relevantes del proceso, Ageorges C. et al. (2000).

La ecuación de Poisson gobierna el proceso “de acuerdo a la Ecuación (1)”

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

Siendo: ρ la densidad, c el calor específico, k la conductividad y q una fuente volumétrica dependiente del tiempo.

Debido a la no linealidad explicitada se emplea el esquema implícito de Crank Nicolson “de acuerdo a la Ecuación (2)” para resolver el problema de conducción de calor transitoria. La ecuación de diferencias finitas resultante puede expresarse como:

$$\frac{1}{2} \left[\frac{\left(k_{i-1} + \frac{k_i}{2} \right) (T_{i-1}^{n+1} - T_i^{n+1}) - \left(k_i + \frac{k_{i+1}}{2} \right) (T_i^{n+1} - T_{i+1}^{n+1})}{(\Delta x)^2} \right] + \dot{q} = \rho_i c_i \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \tag{2}$$

Donde: $(i-1)$, (i) e $(i+1)$ representan los puntos nodales en la dirección; (n) y $(n+1)$ representan las condiciones a tiempo (t) y $(t+\Delta t)$; Δx representa la longitud del paso y Δt el incremento del tiempo.

El calor generado eléctricamente q se relaciona con la resistencia, R , de la malla calefactora, variable fundamental para el proceso de soldadura y definida “de acuerdo a la Ecuación (3)”:

$$R = \gamma \frac{1}{w} \tag{3}$$

Siendo γ la resistividad; l y w los factores geométricos de la malla. A su vez la Potencia eléctrica “de acuerdo a la Ecuación (4)”:

$$P = U * I = I^2 * R \tag{4}$$

Donde U es la tensión, I la corriente y R la resistencia. Luego la generación volumétrica de calor se

expresa “de acuerdo a la Ecuación (5)”:

$$\dot{q}_{elec} = \frac{P}{V} = \frac{I^2 R}{V} = \left(\frac{I}{w} \right)^2 \frac{\gamma}{h} \tag{5}$$

Siendo V el volumen de la malla.

Mecanismo de Consolidación

Como primera aproximación y a partir de conceptos basados en fenómenos transitorios y no isotérmicos, se define la consolidación a partir de una etapa crítica y pseudo-secuencial de procesos que consisten en: el íntimo contacto y la autohesión constituyendo en definitiva la etapa de curado en la cual deben poder llegar a definirse los parámetros fundamentales que la gobiernan: el grado de íntimo contacto, el tiempo para alcanzarlo, el grado de unión y el tiempo para alcanzar la plena unión.

Se la denomina pseudo-secuencial dado que si bien para el mero acto de descripción del proceso de curado el contacto íntimo y la autohesión en apariencia suceden en forma consecutiva, los dos mecanismos de hecho ocurren simultáneamente.

El grado de contacto íntimo evalúa la relación del área de contacto con el área de la superficie total. El grupo de trabajo de Ageorges C. et al. (1998), uno de los que más desarrollos ha logrado en esta temática, ha basado fundamentalmente su trabajo en la demostración de la inexistencia de grandes diferencias en los resultados globales del proceso si no se tiene en cuenta la rugosidad asociada a las interfaces de contacto. La base de esta afirmación se sustenta en que una vez que las superficies se ponen en contacto íntimo todas las barreras físicas existentes entre ellas desaparecen y las moléculas son libres de moverse a través de la interfaz en un proceso de interdifusión

también conocido como autohesión, el cual avanza a un ritmo mucho más rápido que el de contacto íntimo

Para efectuar el contacto íntimo y en última instancia la autohesión se debe aplicar una presión de consolidación a partir de un desplazamiento constante del actuador posibilitando controlar el espesor final de la unión a partir de valores de presión no constantes o en su defecto aplicarla a presión constante, obteniendo un control óptimo de la consolidación aunque no del espesor.

El proceso final puede resumirse: en la coexistencia inicial de dos interfaces distintas, en un estado no isotérmico, un contacto íntimo entre las dos superficies permite que las barreras potenciales asociadas a la falta de homogeneidad de la interfaz puedan desaparecer y posibiliten el libre movimiento de las cadenas moleculares a través de la interfaz. Esta explicación toma su basamento en la teoría de reptación a partir de la cual una cadena de polímero se limita a un tubo que tiene una forma similar a la configuración azar-tubo de la cadena. El tubo en realidad representa las restricciones al movimiento lateral de los monómeros impuestas por cadenas vecinas a través de enredos, presentando a su vez las cadenas movimientos brownianos de ida y vuelta en el tubo. Luego, debido a que los extremos de la cadena son libres en cualquier dirección de alejamiento del tubo, la memoria de la posición inicial del tubo en el espacio se pierde gradualmente y cuando el tiempo de reptación ha transcurrido, la cadena ha escapado y olvidado su configuración inicial.

El grado de contacto íntimo D_{ic} resulta “de acuerdo a la Ecuación (6)”:

$$D_{ic} = \frac{1}{w_0 + b_0} \left[1 + \frac{5P_{app}}{\mu_{mf}} \left(1 + \frac{w_0}{b_0} \right) \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^2 t \right]^{1/5} \quad (6)$$

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 y w_0 se corresponden con los parámetros de un elemento rectangular simplificado y t el tiempo al cual la presión es aplicada.

Proceso de Enfriamiento – Cristalización

Finalmente durante la etapa de enfriamiento tiene lugar la re solidificación de la resina resultando importante mantener la presión de consolidación al menos hasta que la matriz haya adquirido suficiente resistencia y rigidez.

Adquiere especial interés en estructuras semicristalinas porque en el curso de la misma tiene lugar una recristalización que les permite obtener su estructura final, proceso que depende fuertemente de la velocidad de enfriamiento de tal forma que a enfriamientos lentos le corresponden grados de cristalinidad elevados y a enfriamientos rápidos, grados bajos o inexistentes.

Se debe considerar que en los termoplásticos semicristalinos la cristalinidad tiene íntima y estrecha vinculación con las propiedades mecánicas, de fractura y es la principal responsable de proporcionarles resistencia ambiental, siendo que la microestructura, en cuanto al tipo, forma y tamaño de las estructuras cristalinas se encuentra definida por las condiciones asociadas al procesamiento.

Diferentes modelos han sido desarrollados para la evaluación del nivel de cristalinidad en polímeros termoplásticos semicristalinos, basándose en los principios de nucleación y crecimiento.

Se ha logrado demostrar una drástica caída en la cristalinidad de la interfaz a niveles bajos de potencia debido principalmente al hecho de que a esos valores los cristales existentes en el polímero no llegan a

fundirse completamente y los núcleos restantes restringen el alcance de la nucleación que ocurre en el enfriamiento. Evaluados los calores latentes debidos a la cristalización y a la fusión se llega a la conclusión que son muy pequeños y prácticamente pueden ser despreciados. Este hecho puede atribuirse a que una muy pequeña porción de material es sometida a una fase de transformación. Para materiales compuestos los estudios en general refieren que a potencias normales (30 a 120 KW/m²) los tiempos de enfriamiento han sido lo suficientemente bajos como para obtener altos valores de cristalinidad finales pudiendo proporcionar un comportamiento mecánico – ambiental absolutamente apto del material luego de la fusión. Se aprecia asimismo que tanto el tiempo de fusión como el de vinculación son significativamente más cortos en el rango de nivel de alta potencia que en el de baja, el tiempo de enfriamiento aumenta con el aumento del nivel de potencia. Luego, el tiempo de procesamiento disminuye ligeramente con el aumento del nivel de potencia. Con lo cual desde un punto de vista del tiempo de procesado global, a condición de que el nivel de potencia sea mayor a 50 kW/ m², no existe una verdadera razón que pudiese presentar ventajas en cuanto a seleccionar altos niveles de potencia, Yousefpour A. et al. (2004).

Finalmente y considerando que la interfaz de soldadura que alcanza la temperatura de fusión no supera los 0.7 mm de espesor no se ha considerado necesario efectuar ninguna modelización para este proceso. Una vez establecidos los valores óptimos de la ventana de proceso, el trabajo experimental ha permitido verificar a través de los resultados de los ensayos de laboratorio que el enfriamiento no requiere ser controlado para obtener el máximo de eficiencia del sistema en estudio.

CONCLUSIONES

El proyecto se ha iniciado en Mayo 2014 y a fines del año 2015 se ha logrado efectuar el proceso de soldadura a escala real sobre un tubo de 508 mm. de longitud y 280 mm. de diámetro. Las fotos anexas a continuación – Figuras 6 a 11 – señalan la secuencia completa de las distintas etapas de desarrollo, desde una probeta de 40 mm. por 40 mm. hasta la escala real. El tubo ha sido enviado a una empresa de primer nivel del rubro fabricación tubos sin costura / revestimientos térmicos, para efectuar el ensayo de bending (doblado a un radio equivalente al utilizado según Figura 2) y su posterior destrucción parcial necesaria para ser sometido a ensayos mecánicos.

Cabe consignar que el proceso ha sido patentado a nombre de Juan Rukavina Mikusic (2010) el cual ha cedido el 50% de los derechos de propiedad a la UTN BA.

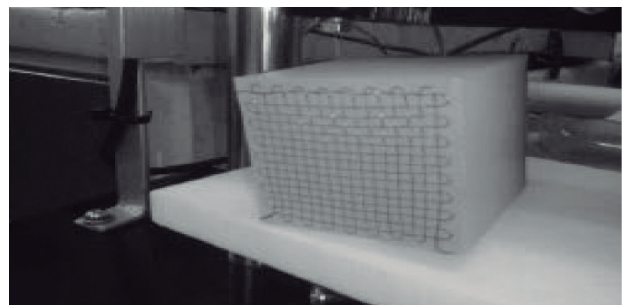


Figura 6. Probeta con malla insertada.



Figura 7. Interfaz de soldadura.

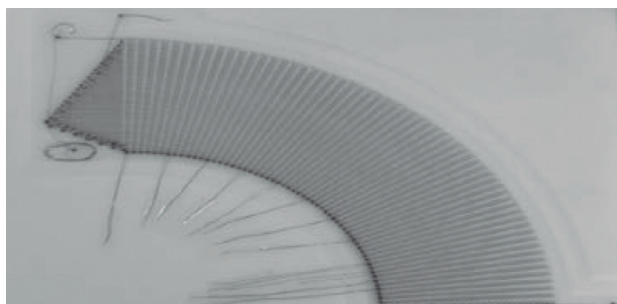


Figura 8. Malla zona troncocónica.



Figura 10. Encastre mediacañas sobre tubo.

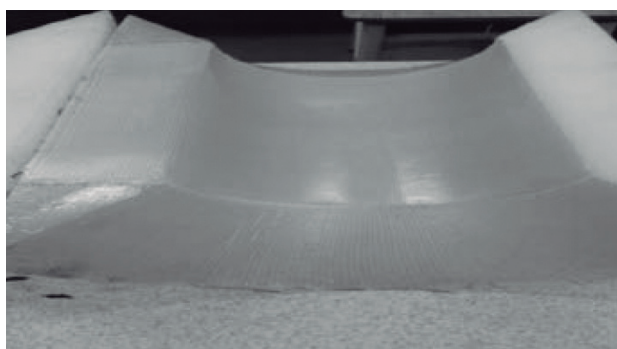


Figura 9. Inserción de malla en mediacaña.



Figura 11. Junta soldada escala real.

REFERENCIAS

- Offringa A., Myers D., Buitenhuis A. (2011) Fokker Special Products, (NL), Airbus UK (UK), Fokker Aerostructures, (NL). Web: <http://www.tudelft.nl/>
- Sierksma D.: (2012) Delft University of Technology, NL. Web: <http://www.tudelft.nl/>
- Stavrov D., Bersee H. (2011) Design and Production of Composite Structures, Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, Kluyverweg 1, 2629 HS Delft. Web: <http://www.tudelft.nl/>
- Van Wijngaarden M. J. et al. (2010) Delft University of Technology, NL. Web: <http://www.tudelft.nl/>
- Taylor N., Davenport R. (1991) Resistive impact welding of thermoplastic composite materials. Antec. Conference Proceedings Montreal 5th – 9th May 1991, p. 2038 - 41 012 SPE, Welding Institute, European Community, UK, Western Europe.
- Dubé M., Hubert P., Denault J. (2009) Mc Gill University, Quebec, Canadá. <https://www.mcgill.ca/>
- Yousefpour A., Hojjati M., Immariageon J. (2004) Fusion bonding / welding of thermoplastic composites, Journal of Thermoplastic Composite Materials, Vol. 17, N° 4, pp. 303 - 341.
- Ageorges C., Ye L., Mai Y. W., Hou M. (2002) Simulation of impulse resistance welding for thermoplastic matrix composites, Applied Composite Materials, Vol. 8, N° 2, pp. 133 - 147.
- Hou M., Yang M., Beehag M., Mai Y., Ye L. (1999) Resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastic composite using alternative heating element, Composite Structures, N° 47, pp. 667 - 672.
- Yousefpour A., Simard M., Ochteau M., Laramée M., Hojjati M. (2004) Effects of the mesh size on resistance welding of thermoplastic composites using metal mesh heating elements, Proceedings of the 25th International SAMPE Europe Conference, pp. 61- 66.
- Hou M., Ye L., Mai Y. (1999) An experimental study of resistance welding of carbon fiber reinforced polyetherimide (CF Fabric/PEI) composite material, Applied composite materials, n° 6, 35 - 49.
- Dubé M., Hubert P., Yousefpour A. Denault J. (2008) Current leakage prevention in resistance welding of carbon fibre reinforced thermoplastics, Composites Science and Technology, 68, 1579 - 1587.
- Stavrov D., Bersee H. (2005) Resistance welding of thermoplastic composites: An overview. In Composites: Part A), volume 35, pp. 39- 54.
- Stavrov D., Bersee H. (2003) ASME Summer heat transfer conference proceedings, 47222.
- Ageorges C., Ye L., Hou M. (2000) Experimental investigation of the resistance welding for thermoplastic matrix composites: Part I: heating element and heat transfer, Composites Science and Technology, N° 60, pp. 027 - 103.
- Ageorges C., Ye L., Hou M. (1998) Characteristics of resistance welding of lap shear coupons. Part II Consolidation, Composites, n° 29, pp. 911 - 919.
- Yousefpour A. Simard M., Ochteau M., Laramée M., Hojjati M. (2004) Effects of the mesh size on resistance welding of thermoplastic composites using metal mesh heating elements. In Proceedings of the 25th International SAMPE Europe conference, pages 61- 66.
- Rukavina Mikusic Juan (2010) Patente de Invención N° AR 071492B1, "Método para el revestimiento térmico de alto espesor de juntas por medio de electrofusión en ductos utilizados en conducción de fluidos construidos con tubos de acero revestidos externamente con poliolefinas", Patente internacional PCT/BR 2010/000136 concedida en Argentina, USA (13/265428 - P74137USO) y en proceso de concesión en Brasil.