

Modelado termomecánico del proceso de *Friction stir welding* utilizando la geometría real de la herramienta

Diego Santiago · Guillermo Lombera · Santiago Urquiza · Carlos Agelet
de Saracibar · Michele Chiumenti

Recibido: Noviembre 2009, Aceptado: Noviembre 2010
©Universitat Polit  cnica de Catalunya, Barcelona, España 2010

Resumen En este trabajo se ha modelado el proceso de soldadura por fricción-agitación o *Friction Stir Welding* (FSW) incluyendo la geometría real de la herramienta. El problema mecánico se ha resuelto utilizando un modelo de Stokes para flujo viscoplástico con una ley constitutiva adecuada para el rango de velocidades de deformación inducidos en el proceso. El problema térmico se ha resuelto con un modelo de advección-difusión aplicando una formulación ALE. En ambos casos se han utilizado formulaciones de elementos finitos en su implementación.

Se ha resuelto un problema bidimensional y uno tridimensional de FSW bajo un conjunto de condiciones de proceso y con una geometría de herramienta particular. Los resultados obtenidos para el flujo del material alrededor de la herramienta se han contrastado con datos experimentales reportados en la bibliografía y obtenidos en idénticas condiciones a las aplicadas en la simulación. Se encontr   una buena correlación con los mismos.

Mediante el post-procesamiento de los datos del flujo del material con técnicas de visualización con trazadores se han podido reconocer los patrones reportados en la bibliografía mediante técnicas experimentales

Diego Santiago · Guillermo Lombera · Santiago Urquiza
Grupo de Ingeniería Asistido por Computadora
Universidad Nacional de Mar del Plata
J. B. Justo 4302, 7600 Mar del Plata, Argentina (CONICET)
e-mail: dsantiago@fimdp.edu.ar

Carlos Agelet de Saracibar · Michele Chiumenti
ETS Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, UPC
International Center for Numerical Methods in Engineering
(CIMNE)
Building C1, Campus Norte UPC, Jordi Girona 1-3, 08034 Barcelona, Spain
e-mail: agelet@cimne.upc.edu

de trazadores. Se destaca el potencial de estas técnicas de visualización para analizar la dinámica del flujo de material alrededor de la herramienta y, así, tener una mayor comprensión de los fenómenos involucrados en el proceso de FSW.

THERMOMECHANICAL MODELING OF *FRiction STIR WELDING PROCESS* USING A REAL TOOL GEOMETRY

Summary This work deals with the computational modeling of *Friction Stir Welding* (FSW) processes including the discretization of the tools. The mechanical problem has been solved using a Stokes viscoplastic flow model with a suitable constitutive law for the range of deformation rates induced in the process. The thermal problem has been solved using an advection-diffusion model using an ALE formulation. Finite element formulations have been implemented for both problems.

Two-dimensional and three-dimensional FSW problems have been solved under a number of particular process conditions and a particular tool geometry. Results obtained for the material flow around the tool have been compared with published experimental results, obtained under the same process conditions. A good correlation has been obtained between the numerical and the experimental results.

The patterns of the material flow reported in the references, which were obtained using experimental techniques with tracers, have been identified performing the post-process of the results obtained for the material flow using computational visualization techniques with tracers. The role played by those visualization techniques in the analysis of the material flow around the

tool, leading to a better understanding of the phenomena involved in the FSW process, is pointed out.

1. Introducción

La Soldadura por Fricción-Agitación (SFA) o *Friction Stir Welding* (FSW) es un proceso de soldadura en estado sólido. El proceso se ilustra en la Figura 1. El equipo de soldadura consta de una herramienta que gira y se desplaza sobre la unión de dos piezas restringidas. Parte de la herramienta se inserta dentro de las piezas a soldar (Perno). La unión se produce por el calentamiento por fricción que experimentan las piezas, induciendo un comportamiento pastoso/viscoso del material y el correspondiente flujo entre las piezas a unir.

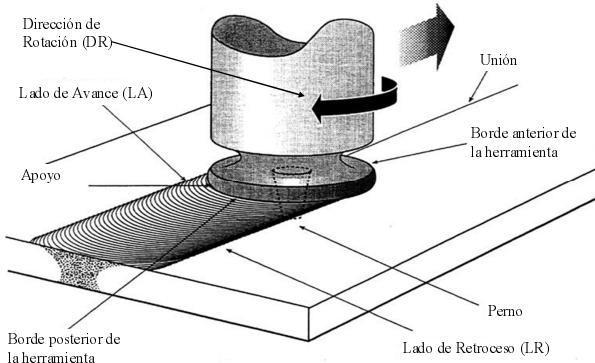


Figura 1. Esquema del proceso de FSW

Desde que el proceso de FSW fue patentado por *The Welding Institute* en 1991 [16], los mecanismos involucrados en el mismo siguen siendo tema de debate [1,6,10]. Particularmente, en este proceso de soldadura en estado sólido, además de las superficies de las piezas a unir, se genera la interfaz entre la herramienta y el material que la rodea. Así, para comprender el mecanismo por el cual se forma la soldadura en FSW es necesario comprender el rol de la herramienta. El análisis del flujo de material alrededor de la herramienta de FSW es determinante para comprender su rol en el proceso.

Los análisis de flujo de material en FSW reportados en la bibliografía se dividen en dos grupos: estudios experimentales con trazadores y modelos matemáticos.

El primer análisis experimental de flujo de material en FSW fue presentado por Colligan [4]. La técnica implementada consistía en colocar esferas de acero ubicadas en distintas posiciones de la unión en la dirección de soldadura. Una vez generada la soldadura, la posición de las esferas se revelaba con radiografías. Un resultado interesante de este trabajo fue que no todo el material

influenciado por el Perno de la herramienta es “agitado”, sino que gran parte del material se mueve como una simple extrusión.

Otra técnica experimental para visualizar el flujo de material en FSW es la de insertos marcadores. Esta técnica consiste en colocar insertos de un material disímil al material base en la región donde se realiza la soldadura. Posteriormente, las posiciones de los marcadores se revelan mediante distintas técnicas, como, por ejemplo, revelado químico [15], rayos X [4] o tomografía computarizada [13].

Recientemente, Kumar *et al.* [6] propuso una técnica para analizar la influencia de la herramienta en la formación de la unión por FSW mediante la visualización del flujo de material. Esta técnica consiste en hacer una soldadura manteniendo los parámetros del proceso fijos e incrementando la presión de la herramienta progresivamente sobre las piezas a unir. Posteriormente, analizando la formación de defectos y estructuras de tipo “anillos de cebolla” para distintas presiones de la herramienta, plantea un mecanismo de formación de la soldadura por FSW.

En la bibliografía existen pocos trabajos de modelado que analizan el flujo de material alrededor de la herramienta. El primer trabajo de simulación en este sentido fue propuesto por Xu *et al.* [17], donde resuelve un caso bidimensional de FSW con un modelo de material elastoplástico a través de una formulación de elementos finitos euleriana-lagrangiana arbitraria (“Arbitrary Lagrangian-Eulerian” (ALE)). Si bien este trabajo es de carácter cualitativo, señala el potencial de las herramientas de simulación para el análisis del flujo de material en FSW. Posteriormente se presentaron trabajos de simulación más sofisticados. Santiago *et al.* [12] resolvió un problema tridimensional en estado estacionario con un modelo de flujo viscoso termomecánicamente acoplado, en el cual, la geometría del Perno roscado de la herramienta se representó de manera simplificada. Por otro lado, Colegrove *et al.* [3] implementó un modelo similar al mencionado anteriormente, pero considerando la geometría de una herramienta roscada. Este último resolvió un problema cuasi-estático del flujo, es decir, la solución representa un “instante” del flujo alrededor de la herramienta para una posición fija de la misma.

En este trabajo se resuelve un problema termomecánico acoplado en dos pasos. Por un lado, se resuelve la parte mecánica como un problema de Stokes con un modelo de flujo viscoplástico y, luego, el problema térmico de advección-difusión con una descripción ALE. El problema se resuelve como una sucesión de estados estacionarios para distintas posiciones de la herramienta durante un giro de la misma. De esta manera se obtiene

una solución cíclica del proceso para cada vuelta de la herramienta. El flujo de material se analiza mediante la visualización de trazadores que atraviesan la región de deformación plástica y se contrasta con trabajos experimentales, obtenidos de la bibliografía, realizados bajo las mismas condiciones de proceso.

2. Ecuaciones de gobierno

2.1. Modelo mecánico

Despreciando las fuerzas iniciales y de volumen, las ecuaciones de equilibrio en un volumen de material Ω con una frontera $\partial\Omega$ se pueden escribir de la siguiente manera (Zienkiewicz *et al.*) [18]:

$$\nabla \cdot \sigma = 0 \text{ en } \Omega \quad (1)$$

donde σ es el tensor de tensiones de Cauchy. Las componentes del vector tracción T_i^o se pueden describir en una porción de la frontera $\partial\Omega_t$ (condiciones de Neumann), mientras las componentes de la velocidad u_i^o se pueden especificar en el resto de la superficie $\partial\Omega_u$ (condiciones de Dirichlet). Esto se puede expresar como:

$$\begin{aligned} (\sigma \mathbf{n}) \cdot e_i &= T_i^o \text{ en } \partial\Omega_{ti}, i = 1, \dots, NDim \\ \mathbf{u} \cdot e_i &= u_i^o \text{ en } \partial\Omega_{ui}, i = 1, \dots, NDim \end{aligned} \quad (2)$$

donde $\partial\Omega = \partial\Omega_t \cup \partial\Omega_u$ y $\partial\Omega_t \cap \partial\Omega_u = \emptyset$, \mathbf{n} es la normal unitaria externa en el contorno $\partial\Omega$, e_i es el vector unitario en un sistema de coordenadas cartesianas tridimensional y \mathbf{u} el vector velocidad. El vector de velocidad de deformación está relacionado con la parte simétrica del gradiente espacial del campo de velocidades de acuerdo con:

$$\mathbf{D} = \frac{\nabla \mathbf{u}^T + \nabla \mathbf{u}}{2} \quad (3)$$

Suponiendo que el material es incompresible, la ecuación de continuidad, que se debe cumplir en todo el dominio Ω , se escribe como:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4)$$

Si se adopta una formulación de flujo para modelar las grandes deformaciones plásticas involucradas en el proceso de stir-welding, el tensor desviador de tensiones \mathbf{S} se puede relacionar con el tensor de velocidades de deformación \mathbf{D} –que es en realidad un desviador en virtud de la hipótesis de incompresibilidad– con la siguiente relación:

$$\mathbf{S} = 2\mu\mathbf{D}, \quad \mathbf{S} = \sigma - p\mathbf{I} \quad (5)$$

$$\mu = \frac{\sigma_e}{3\epsilon_e}$$

donde μ es la viscosidad efectiva del material y p la presión media. Además, σ_e es la tensión efectiva, relacionada con el segundo invariante de la tensión desviadora, y ϵ_e es la velocidad de deformación efectiva, relacionada con el segundo invariante de la velocidad de deformación, y se pueden escribir como:

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 &= \frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S} \\ \epsilon_e^2 &= \frac{2}{3} \mathbf{D} : \mathbf{D} \end{aligned} \quad (6)$$

En este trabajo se asumió un material viscoplastico y rígido donde la tensión efectiva depende de la velocidad de deformación y de la temperatura mediante la siguiente relación [14]:

$$\sigma_e = \frac{1}{\alpha} \arg Sh \left[\left(\frac{Z}{A} \right)^{1/n} \right], \text{ con } Z = \epsilon_e \exp \left(\frac{Q}{RT} \right) \quad (7)$$

donde α , Q , A y n son constantes del material (ver Tabla 1), R es la constante universal de los gases y T la temperatura absoluta. Las constantes del material se pueden determinar usando ensayos de compresión estándar. El modelo mecánico se completa con las condiciones de contorno apropiadas.

Tabla 1. Parámetros de la ley de viscosidad

Material	A	α [mm ² N ⁻¹]	N	H [J mol ⁻¹]
Alloys 1S	$0.224 \cdot 10^{13}$	0.052	4.54	177876.4

2.2. Modelo térmico

La distribución de temperaturas se obtiene resolviendo la ecuación de balance de calor:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_{ref} \nabla \theta \right) = \nabla (k \nabla \theta) + \gamma \quad (8)$$

donde ρ es la densidad, C_p la capacidad calorífica, k la conductividad térmica, θ la temperatura, u_{ref} es la velocidad del material respecto al sistema de referencia y γ la tasa de generación de calor interna por disipación de la potencia viscoplastica. Se asume que alrededor del 90 % de la potencia plástica se convierte en calor [1]. El término de tasa de generación de calor por trabajado mecánico se puede expresar como el producto contraído de la tensión con la velocidad de deformación, como sigue:

$$\gamma = \eta \mathbf{S} : \mathbf{D} \quad (9)$$

con η fracción de potencia que no es absorbida en defectos microestructurales.

Además se adoptaron las propiedades del aluminio puro, tanto para los parámetros mecánicos como para la conductividad y el calor específico dependientes de la temperatura. Los flujos q^o se pueden prescribir en una porción del contorno $\partial\Omega_q$, mientras que la temperatura θ^o se puede especificar en el resto de la superficie $\partial\Omega_\theta$. Esto se puede expresar como:

$$k\nabla\theta \cdot \mathbf{n} = q^o \text{ en } \partial\Omega_q, \quad \theta = \theta^o \text{ en } \partial\Omega_\theta \quad (10)$$

donde $\partial\Omega = \partial\Omega_q + \partial\Omega_\theta$ y \mathbf{n} es la normal unitaria externa en el contorno $\partial\Omega$. La contribución de q^o se debe al enfriamiento de la superficie por convección y a la transmisión de calor por contacto en las interfaces “placas-herramienta” y “placas-base”.

3. Modelado Numéricico

3.1. Campo de velocidades y presiones

Se utilizó una formulación mixta de elementos finitos con un esquema tipo $\varepsilon - \varepsilon$ para flujo incompresible con el agregado de pseudo-compresibilidad artificial implementado en forma monolítica (es decir, las incógnitas de velocidades y presiones se resuelven en un solo paso). Se usaron elementos tipo P2-P1 con interpolaciones cuadráticas para las velocidades y lineales para las presiones, cumpliendo con la condición de estabilidad de LBB.

El algoritmo de resolución del campo de velocidades consiste en la iteración por reemplazos sucesivos para adaptar no-linealmente los valores de viscosidad de acuerdo a las velocidades de deformación obtenidas en la iteración anterior. Las ecuaciones discretas son obtenidas a partir de la formulación clásica del problema de Stokes para flujos totalmente viscosos incompresibles y de acuerdo a las interpolaciones antes mencionadas, con el agregado de pseudo-compresibilidad artificial del tipo de Chorin [2].

La formulación antes descrita resulta en el siguiente sistema de ecuaciones no-lineales del elemento:

$$\begin{pmatrix} A_{ij}^{uu} & A_{ij}^{up} \\ A_{ij}^{pu} & A_{ij}^{pp} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_j^{(it+1)} \\ P_j^{(it+1)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_i^u \\ B_i^p \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$A_{ij}^{uu} = \mu_e^{(it)} \int_{\Omega_e} \frac{\partial\Phi_j^r}{\partial x_m} \frac{\partial\Phi_i^k}{\partial x_m} d\Omega \quad (12)$$

$$A_{ij}^{up} = - \int_{\Omega_e} \Phi_j \frac{\partial\Phi_i^k}{\partial x_k} d\Omega \quad (13)$$

$$B_i^u = \int_{\Gamma_e} \sigma_{mk} n_m \Phi_i^k d\Gamma \quad (14)$$

$$A_{ij}^{pu} = \int_{\Omega_e} \frac{\partial\Phi_j^k}{\partial x_k} \Phi_i d\Omega \quad (15)$$

$$A_{ij}^{pp} = \frac{1}{\beta} \int_{\Omega_e} \Phi_j \Phi_i d\Omega \quad (16)$$

$$B_i^p = \left[\frac{1}{\beta} \int_{\Omega_e} \Phi_j \Phi_i d\Omega \right] P_j^{(it)} \quad (17)$$

donde $U_j^{(it)}$ y $P_j^{(it)}$ son las incógnitas nodales de velocidades y presiones, respectivamente, para el nodo j -ésimo en la iteración it , Φ_i^k es la función de forma cuadrática asociada a la componente k del vector incógnita de velocidades del nodo i , Φ_i es la función de forma lineal asociada a la incógnita de presión del nodo i , $\mu_e^{(it)}$ es la viscosidad efectiva evaluada en el elemento con velocidades y temperaturas evaluadas en it , Ω_e es el dominio del elemento, Γ_e es el contorno del elemento y β es el coeficiente de pseudo-compresibilidad artificial.

El sistema de ecuaciones lineales para cada iteración es resuelto por el método de gradientes conjugados cuadrados con un precondicionador de factorización incompleta de tipo LU de acuerdo con el esquema propuesto por Saad [9] en SparseKit.

3.2. Campo de temperaturas

Para resolver el campo de temperaturas, la ec.(8) se discretizó con una interpolación lineal en el tiempo y un esquema de integración totalmente implícito, asumiendo una descripción espacial lagrangiana-euleriana arbitraria (ALE). Así, se obtiene la siguiente expresión:

$$\rho Cp \left[\frac{\theta^{(n+1)} - \theta^{(n)}}{\Delta t} + (u - u_{red}) \nabla \theta^{(n+1)} \right] = \nabla (k \nabla \theta^{(n+1)}) + \gamma \quad (18)$$

donde u_{red} es la velocidad de la malla y Δt el paso de tiempo. La ec.(18) se dividió en dos pasos. En el primer paso se plantea el problema sin considerar el transporte asociado al movimiento de la malla (ec.(19)), que se aplica en el segundo paso (ec.(20))

$$\rho Cp \left(\frac{\theta^* - \theta^{(n)}}{\Delta t} + u \nabla \theta^* \right) = \nabla (k \nabla \theta^*) + \gamma \quad (19)$$

$$\rho Cp \left(\frac{\theta^{(n+1)} - \theta^*}{\Delta t} - u_{red} \nabla \theta^{(n+1)} \right) = 0 \quad (20)$$

A este esquema se le aplicó una formulación de elementos finitos para problemas de advección-difusión con estabilización tipo *Streamline-Upwinding Petrov-Galerkin* (SUPG). Se utilizaron elementos con interpolación cuadrática. De esta forma, a partir de la ec.(19), se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C_{ij}^1 \Theta_j^* = D_i^1 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} C_{ij}^1 &= \rho C_p \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega_e} \Phi_j \psi_i d\Omega + \rho C_p \int_{\Omega_e} u \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_m} \psi_i d\Omega \\ &\quad + k \int_{\Omega_e} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_m} \frac{\partial \Phi_i}{\partial x_m} d\Omega \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} D_i^1 &= \left[\rho C_p \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega_e} \Phi_j \psi_i d\Omega \right] \Theta_j^n \\ &\quad + \int_{\Gamma_e} q_m \Phi_i d\Gamma - \int_{\Omega_e} \rho \gamma \psi_i d\Omega \end{aligned} \quad (23)$$

y para la ec.(20) se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones:

$$C_{ij}^2 \Theta_j^{(n+1)} = D_i^2 \quad (24)$$

$$C_{ij}^2 = \rho C_p \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega_e} \Phi_j \psi_i d\Omega - \rho C_p \int_{\Omega_e} u_{red} \frac{\partial \Phi_j}{\partial x_m} \psi_i d\Omega \quad (25)$$

$$D_i^2 = \left[\rho C_p \frac{1}{\Delta t} \int_{\Omega_e} \Phi_j \psi_i d\Omega \right] \Theta_j^* \quad (26)$$

donde Θ_j^n es la incógnita de temperatura asociada al nodo j en el paso de tiempo n -ésimo y ψ_i es la función de peso que incluye los términos de estabilización (SUPG) asociada al nodo i .

3.3. Cálculo de trazadores

Los trazadores se calcularon a partir del post-procesamiento del campo de velocidades obtenido según se describió en los puntos 3.1 y 3.2. La trayectoria de los trazadores se estima al integrar la siguiente ecuación diferencial ordinaria (EDO):

$$\frac{D(x_{tr}(t))}{Dt} = u(x_{tr}(t), t) \quad (27)$$

con condiciones iniciales $x_{tr} = x_{tr}0; t = t_0$

donde $x_{tr}(t)$ es la posición del trazador en el tiempo t , $u(x_{tr}(t), t)$ es la velocidad del trazador en su posición $(x_{tr}(t))$ y en el tiempo t . La velocidad $u(x, t)$ se obtuvo interpolando los valores de velocidades nodales (U) (interpolación espacial de elementos finitos cuadrática) y una interpolación lineal en el tiempo t (usando las soluciones del campo de velocidades en el tiempo t_n (U^n) y en el paso de tiempo siguiente t_{n+1} (U^{n+1}) (ec.(28)). A su vez, las posiciones nodales (X) varían entre cada paso de tiempo debido a que la malla rota solidaria con la herramienta, haciendo que cada campo de velocidades U^n y U^{n+1} tenga asociadas las coordenadas nodales X^n y X^{n+1} , respectivamente

$$\begin{aligned} U(t) &= (1 - \theta_t) U^n + \theta_t U^{n+1} \\ X(t) &= (1 - \theta_t) X^n + \theta_t X^{n+1} \end{aligned} \quad (28)$$

con $\theta_t = \left(\frac{t - t_n}{t_{n+1} - t_n} \right)$ si $t_n < t < t_{n+1}$

La ec.(27) se integró con un esquema de Runge-Kutta de cuarto orden explícito e incrementos de tiempo que no superaran un número de Courant (Co) de 0.5 en cada elemento, a fin de mantener la estabilidad del algoritmo (ec.(29)). Se implementó de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} x_{RK_0} &= x_{tr}(t_{sp}) \\ u_{RK_0} &= u(x_{RK_0}, t_{sp}) \\ x_{RK_1} &= x_{RK_0} + \frac{1}{2} \Delta t_{sp} x_{RK_0} \\ u_{RK_1} &= u(x_{RK_1}, t_{sp} + \frac{1}{2} \Delta t_{sp}) \\ x_{RK_2} &= x_{RK_0} + \frac{1}{2} \Delta t_{sp} x_{RK_1} \\ u_{RK_2} &= u(x_{RK_2}, t_{sp} + \frac{1}{2} \Delta t_{sp}) \\ x_{RK_3} &= x_{RK_0} + \Delta t_{sp} x_{RK_2} \\ u_{RK_3} &= u(x_{RK_3}, t_{sp} + \Delta t_{sp}) \\ x_{tr}(t_{sp} + \Delta t_{sp}) &= x_{tr}(t_{sp}) + \\ &\quad \frac{1}{6} \Delta t_{sp} (u_{RK_0} + 2(u_{RK_1} + u_{RK_2}) + u_{RK_3}) \\ u_{tr} &= u(x_{tr}(t_{sp} + \Delta t_{sp}), t_{sp} + \Delta t_{sp}) \end{aligned}$$

con

$$\Delta t_{sp} < 0,5 \frac{h_e}{u_{tr}}; \Delta t_{sp} \leq (t_{n+1} - t_{sp}); t_n < t_{sp} < t_{n+1} \quad (29)$$

donde Δt_{sp} es el incremento de tiempo que avanza el trazador (limitado por la condición de $Co < 0.5$), h_e es el tamaño del elemento que contiene al trazador, u_{tr} es la velocidad del trazador luego del incremento de tiempo, t_{sp} es un tiempo intermedio entre t_n y t_{n+1} en el que se encuentra el trazador, y $x_{tr}(t_{sp})$ y $x_{tr}(t_{sp} + \Delta t_{sp})$ son las posiciones antes y después del incremento de tiempo Δt_{sp} del trazador, respectivamente. De esta forma, si bien en un trazador se podrían calcular varias posiciones $x_{tr}(t)$ (intermedias entre $x_{tr}(t_n)$ y $x_{tr}(t_{n+1})$), para la visualización solo se guardan las correspondientes a las soluciones del campo de velocidades en t_n y t_{n+1} .

4. Descripción del modelo

La estrategia de la simulación se basa en la utilización de un dominio circular alrededor de la herramienta. Así, se puede generar una malla que se asocia a la herramienta y rota con su velocidad de giro Wr , sin que varíe la posición del la frontera donde se impone la velocidad de soldadura Vw , considerando un sistema de referencias fijo en el eje de la herramienta (Figura 2). Por lo tanto, para cada ángulo α de rotación de la malla, las condiciones de contorno se mantienen fijas en el espacio, pero cambian los nodos de la malla donde se imponen Vw y θ_0 (temperatura ambiente). En la superficie de la herramienta se imponen condiciones de adherencia ($Vt = Wr * R$, siendo R la distancia al centro

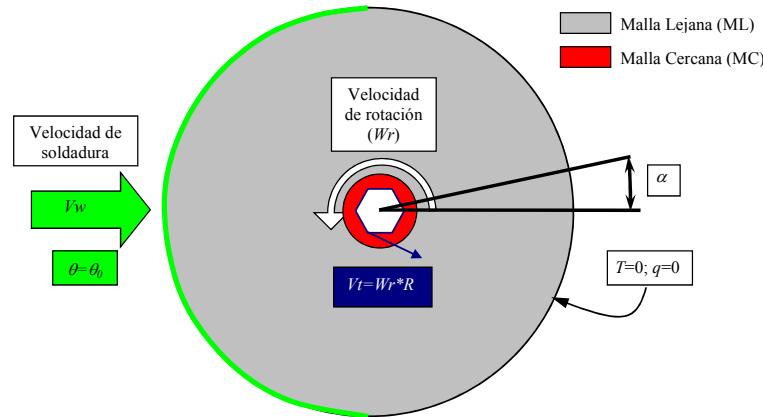


Figura 2. Condiciones de contorno de velocidad (V_w y V_t) en función de la posición de la malla (α)

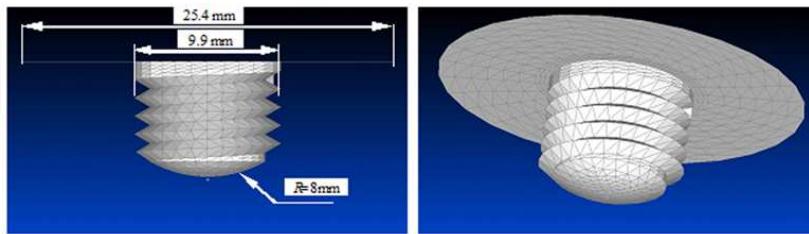


Figura 3. Geometría de la herramienta y malla de la superficie

de rotación) y en la salida del dominio, condiciones de tracción (T) y flujo térmico (q) nulas.

Para resolver la parte térmica de este problema se decidió dividir la malla en dos regiones, la Malla Cercana a la herramienta (MC) y la Malla Lejana a la herramienta (ML). La MC no es estructurada y se resuelven los sistemas de ecuaciones (21) y (24). En cambio, la ML tiene la característica de ser estructurada angularmente (en la dirección de α) de forma tal que se cumple $C_o = \Delta t \cdot u_{red} / h_e = 1$ para todos los nodos de la ML. De esta forma, en la ML se resuelve el sistema de ecuaciones (21) y la ec.(20) se resuelve como un transporte exacto entre pares de nodos de la ML, evitando tener que resolver el sistema de ecuaciones 24.

La estrategia implementada para resolver la parte térmica del problema está orientada a evitar la elevada difusividad artificial introducida por los valores de u_{red} en la ML, ya que en esta zona $u_{red} \gg V_w$.

5. Resultados

En este trabajo se resolvieron dos casos, uno bidimensional y el otro tridimensional, con iguales condiciones de procesamiento y geometría de herramienta.

Con el objetivo de verificar la similitud de los resultados obtenidos, se decidió modelar un caso en base a las condiciones de procesamiento y geometría de herramienta descritas en el trabajo de Seidel y Reynolds [15],

donde se presentan resultados experimentales de visualización con trazadores. En dicho trabajo se utilizó una herramienta con un Apoyo ("Shoulder") de 25.4 mm, un Perno ("Pin") roscado de 9.9 mm de diámetro, 1.25 mm/vuelta de paso de rosca, 7.9 mm de altura y la punta del Perno termina en forma esférica con un radio de 8 mm. En la Figura 3 se muestra un detalle de la malla de elementos finitos tridimensional y las dimensiones de la herramienta. Los parámetros del proceso son velocidad de soldadura $V_w = 5.0833$ mm/seg, velocidad de giro $Wr = 500$ RPM y temperatura ambiente $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$. El material de soldadura son placas de aluminio AA2195-T8 de 8.1 mm de espesor.

5.1. Caso 2D

Se resolvió un caso bidimensional del problema en forma simplificada para analizar el potencial de la visualización con trazadores en reproducir los patrones de flujo de material reportados experimentalmente.

Para obtener la geometría, se consideró un corte transversal del Perno roscado en forma perpendicular al eje del mismo. De esta forma se obtuvo la silueta mostrada en la Figura 4, en la que con línea punteada se representa el diámetro externo del Perno de la herramienta (9.9 mm).

Los parámetros y condiciones de contorno del modelo se aplicaron siguiendo el procedimiento descrito en

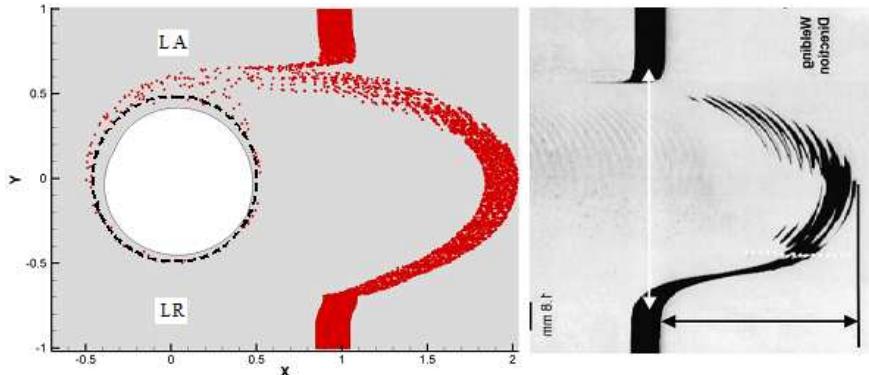


Figura 4. Resultado de la visualización con trazadores de la simulación (izquierda) y de técnicas experimentales (a 4.1 mm del fondo de la placa) reportado por Reynolds [8].

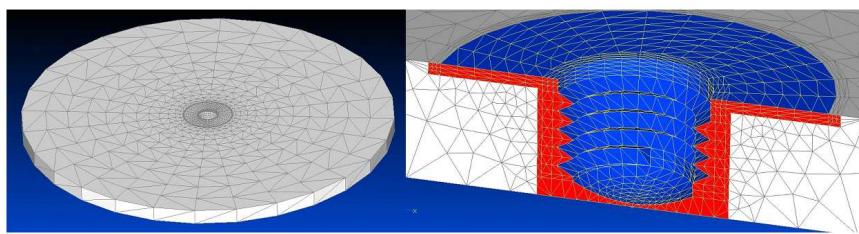


Figura 5. Malla de elementos finitos del caso tridimensional (izq) y detalle de la misma donde se exhibe la MC en rojo y la ML en blanco (der)

el punto 4 y 5 de este trabajo. De esta forma, se construyó un caso con una malla de 2800 elementos triangulares cuadráticos y 5900 nodos, aproximadamente.

Si bien en este modelo no se considera el flujo vertical que produce la rosca, los resultados muestran que la simulación con el post-procesamiento con trazadores puede revelar patrones característicos del flujo de material en FSW. En el lado de avance se observa un patrón de flujo tipo “aserrado”, que guarda una correlación cualitativa con los registros experimentales. Este resultado fue alentador y nos impulsó a construir un modelo tridimensional.

5.2. Caso 3D

Se resolvió un modelo tridimensional con las condiciones de procesamiento, geometría de herramienta y condiciones de contorno descritas en los puntos 4 y 5.

En la Figura 5 se muestra la malla de elementos finitos construida para este caso. Esta malla cuenta con 24200 tetraedros cuadráticos y 35700 nodos, aproximadamente. Se observa un detalle de la densificación de la malla en las zonas cercanas a la superficie de la herramienta, donde se generan los mayores gradientes de velocidades. La malla de tetraedros en blanco es la ML y los triángulos en azul representan la superficie de la he-

rramienta y la de tetraedros rojos que envuelven a la superficie de la herramienta es la MC.

A partir de este modelo se resolvieron cuatro casos con diferentes condiciones de contorno en el Apoyo de la herramienta. En el caso 1 se impuso la condición de adherencia (como se describió anteriormente en el punto 4). En el caso 4 se consideró deslizamiento en el Apoyo. Por otro lado, en el caso 2 y 3 se impuso la velocidad en los nodos del Apoyo con una condición intermedia entre deslizamiento y adherencia a través de la siguiente expresión:

$$\mathbf{v} = (1 - \delta) \mathbf{V}_w + \delta \mathbf{V}_t \quad (30)$$

donde δ es la fracción de adherencia y se obtiene con la ecuación empírica propuesta por Nandan *et al.* [7]:

$$\delta = \exp \left[-\frac{1}{\delta_0} \left(\frac{r - R_P}{R_S - R_P} \right) \right] \quad (31)$$

donde r es la distancia del nodo al eje de rotación de la herramienta, R_P es el radio del Perno y R_S es el radio del Apoyo. El parámetro δ_0 es un valor desconocido que representa la distribución de la adherencia en el Apoyo de la herramienta. De esta forma, para analizar la influencia de este parámetro en el flujo de material se propuso $\delta_0=0.4$ y $\delta_0=0.1$ en los casos 2 y 3, respectivamente.

En las Figuras 6, 7 y 8 se comparan los resultados de trazadores obtenidos en las simulaciones (figuras de

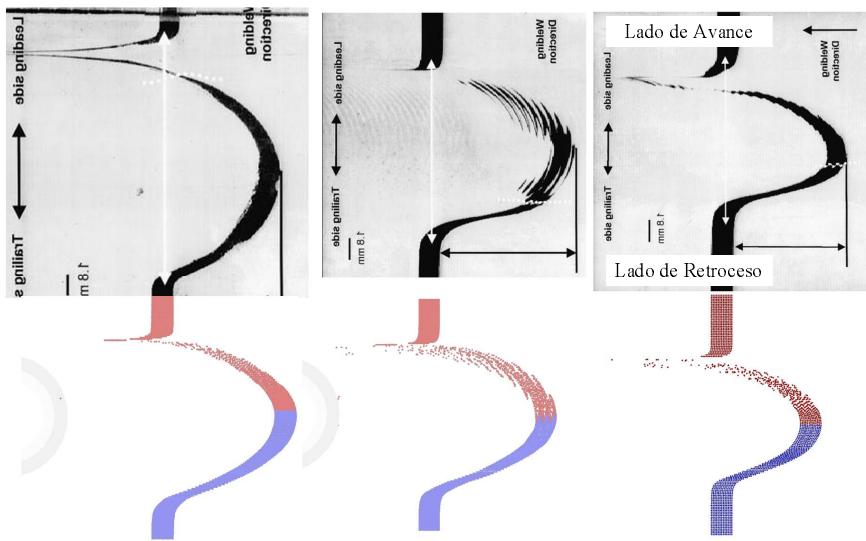


Figura 6. Resultados de la visualización con trazadores de la simulación (abajo) y de técnicas experimentales (arriba) reportado por Reynolds [8] en $Z=2\text{mm}$ (derecha), $Z=4.1\text{mm}$ (centro) y $Z=7.7\text{mm}$ (izquierda) para condición de deslizamiento del Apoyo (Caso 4)

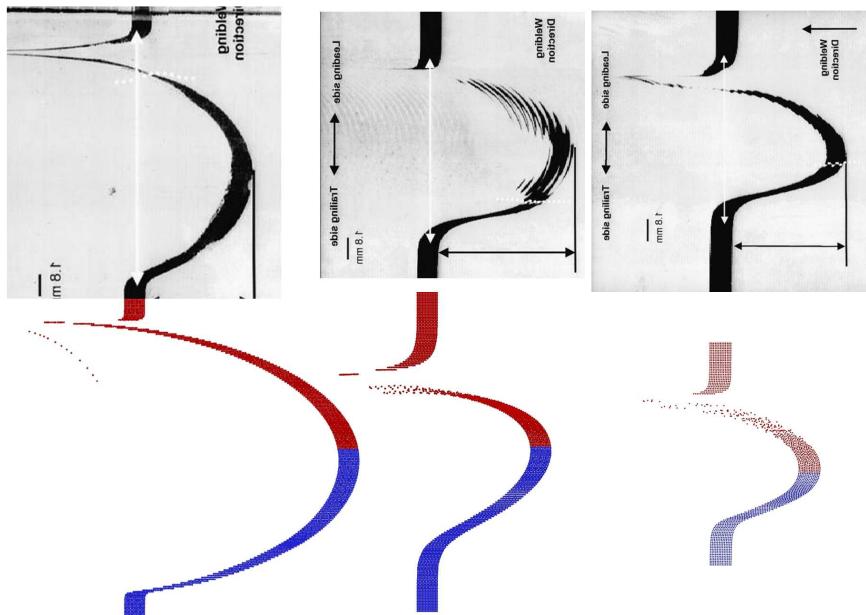


Figura 7. Resultados de la visualización con trazadores de la simulación (abajo) y de técnicas experimentales (arriba) reportado por Reynolds [8] en $Z=2\text{mm}$ (derecha), $Z=4.1\text{mm}$ (centro) y $Z=7.7\text{mm}$ (Izquierda) para $\delta_0=0.4$ (Caso 2)

abajo) con los trazadores experimentales (figuras de arriba) obtenidos por Reynolds [8]. La técnica utilizada por Reynolds consiste, básicamente, en colocar insertos de un material químicamente disímil al material base de soldadura, pero con propiedades mecánicas similares. De esta forma, después de realizar la soldadura se mecanizan las placas a distintas profundidades y con un revelado químico adecuado se obtiene la distribución de los trazadores en el espesor de las placas. La dimensión asociada al espesor en la simulación es el eje Z , donde

$Z=0$ es la parte inferior de las placas y $Z=8.1$ es la parte superior en contacto con el Apoyo de la herramienta. Estas figuras nos permiten hacer un análisis cualitativo del flujo de material y la influencia del Apoyo respecto del Perno de la herramienta a través del parámetro δ_0 asociado con la adherencia en el Apoyo.

En la Figura 9 se muestra el módulo de velocidad en un corte a través del eje de la herramienta para distintas condiciones de adherencia con el Apoyo.

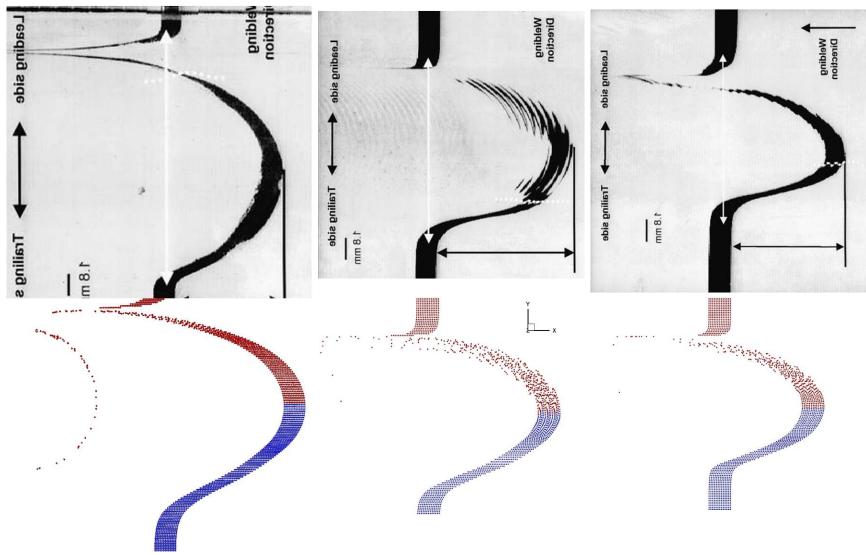


Figura 8. Resultados de la visualización con trazadores de la simulación (abajo) y de técnicas experimentales (arriba) reportado por Reynolds [8] en $Z=2\text{mm}$ (derecha), $Z=4.1\text{mm}$ (centro) y $Z=7.7\text{mm}$ (izquierda) para $\delta_0=0.1$ (Caso 3)

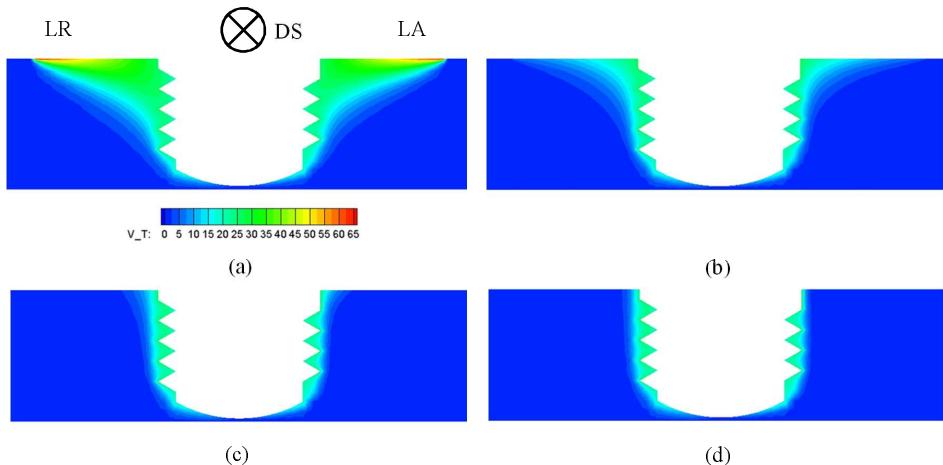


Figura 9. Modulo de velocidad en un corte en el eje de la herramienta y perpendicular a la velocidad de soldadura para el caso 1 (a), caso 2 (b), caso 3 (c) y caso 4 (d)

En la Figura 10 se muestra una vista en perspectiva del campo de temperaturas para los cuatro casos analizados. De la misma manera que en la Figura 9, los gráficos de esta figura se realizaron con el mismo rango de valores para que fueran comparables entre sí (temperaturas entre 0 y 500°C).

6. Análisis de los resultados y conclusiones

Comparando los trazadores en $Z=2\text{ mm}$ para los casos 2, 3 y 4 se observa que son muy similares entre sí, e incluso tiene una buena aproximación con el reportado experimentalmente. Por lo tanto, el flujo de material

en $Z=2\text{ mm}$ es poco sensible a las variaciones de la condición de adherencia en el Apoyo de la Herramienta.

Los trazadores en $Z=4.1\text{ mm}$ para los casos 3 y 4 son muy similares entre sí y guardan cierta verosimilitud al compararlos con los trazadores experimentales. Incluso estos casos reproducen el efecto de "aserrado" que se observa experimentalmente. Por otro lado, los trazadores en $Z=4.1\text{ mm}$ para el caso 2 no presentan el efecto de "aserrado" y son sensiblemente diferentes a los casos 3 y 4 debido al incremento del flujo de material alrededor de la herramienta inducido por la mayor adherencia con el Apoyo.

Para los trazadores en $Z=7.7\text{ mm}$ los casos 2, 3 y 4 difieren notablemente unos de otros, poniendo en evidencia que el flujo de material en esta zona está domi-

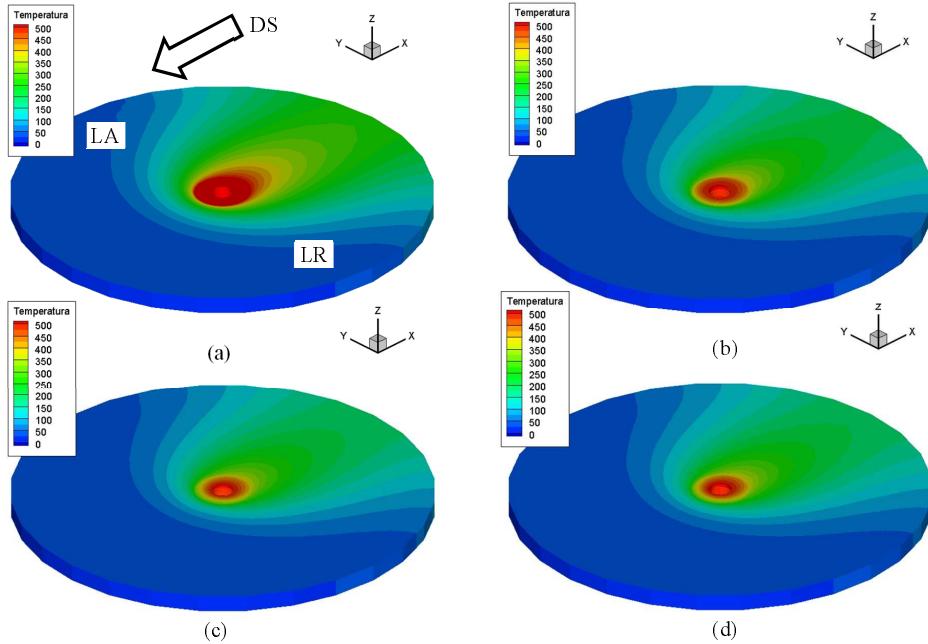


Figura 10. Temperatura($^{\circ}\text{C}$) en una vista general en perspectiva del dominio modelado para los casos 1 (a), 2 (b), 3 (c) y 4 (d)

nado por el Apoyo de la herramienta. El caso 3 es el que mejor se aproxima a los trazadores experimentales en $Z=7.7$ mm, pero sin ser tan buena como en $Z=4.1$ mm y $Z=2$ mm.

En la Figura 8 se observa que los patrones en los trazadores para el caso 3 ($\delta_0=0.1$) tienen una mejor aproximación a los que exhiben los casos 2 y 4. Podríamos decir que para la ley de pared definida con las ec. (27) y (28), el parámetro $\delta_0=0.1$ es el que mejor describe el flujo de material alrededor de la herramienta. Sin embargo, este es un parámetro que se podría ajustar con métodos de optimización, mejorando la aproximación.

En la Figura 9 se observa claramente como el incremento en la adherencia en el modelo induce un mayor flujo de material alrededor de la herramienta, alcanzando mayores profundidades en el espesor del material y solapando el efecto del Perno.

Respecto a la parte térmica, el aumento de adherencia induce una ampliación en la zona de deformación plástica, generando en consecuencia una mayor generación de calor por disipación viscosa. Este comportamiento es congruente con las distribuciones de temperaturas que se presentan en la Figura 10, donde las temperaturas promedio son mayores en los casos con mayor adherencia con el Apoyo. La mayor diferencia se observa entre el caso 1 y 4, donde la diferencia entre las temperaturas máximas fue de 70°C , aproximadamente, en la zona del Apoyo.

Finalmente, la implementación de un modelo termomecánicamente acoplado, con herramientas no-axisimé-

tricas, resulta apto para resolver problemas de FSW. Las técnicas de visualización con trazadores implementadas, demuestran un gran potencial para verificar y validar los patrones de flujo de material alrededor de la herramienta. Se pudieron reconocer estructuras de flujo de material reportadas experimentalmente como el “aserrado” inducido por la rosca del Perno.

Referencias

1. Abergast W.J. (2005) Using process forces as a statistical process control tool for friction stir welding. *Proceedings of 2005 TMS Annual Meeting*, San Francisco, CA, pp. 193-205. Feb. 13-17.
2. Chorin A.J. (1968) *Mathematics of Computation*. 22:745-762.
3. Colegate P.A., Sherclif H. R. (2005) 3-Dimensional CDF modelling of flow round a threaded friction stir welding tool profile. *Journal of Material Processing Technology*. 169:320-327.
4. Colligan K. (1999) Material flow behavior during friction stir welding of aluminum. *Welding Research Supplement*, July. pp. 229-237.
5. Guerra M., Schimidt C., McClure J.C., Murr L.E., Nunes A.C. (2003) Flow patterns during friction stir welding. *Materials Characterizations*. 49:95-101.
6. Kumar K., Satish V. Kailas. (2008) The role of friction stir welding tool on material flow and weld formation. *Materials Science and Engineering A*. 485:367-374.
7. Nandan R., Roy G.G., Lienert T.J., Debroy T. (2006) Three-dimensional heat and material flow during friction stir welding of mild steel. *Acta Materialia*. Artículo en prensa.
8. Reynolds A.P. (2000) Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. *Science and Technology of Welding and Joining*. 5(2):120-124.

9. Saad Y. (1994) SPARSEKIT: a basic tool kit for sparse matrix computation (version2). University of Illinois. <http://www-users.cs.umn.edu/~saad/software/SPARSKIT/sparskit.html>.
10. Sanders J. (2005) Understanding the material flow path of friction stir welding process, M.Sc.Thesis, Mississippi State University, Department of Mechanical Engineering, December.
11. Santiago D., Lombera G., Urquiza S., Cassanelli A., de Vedia L.A. (2004) Numerical modeling of joints welded by “friction stir welding” process, *Materials Research*. 7:569-574.
12. Santiago D., Lombera G., Cassanelli A., Urquiza S., de Vedia L.A. (2005) Análisis térmico en soldadura por fricción. *Mecánica Computacional* 24:2781-2793.
13. Schmidt H.N.B., Dickerson T.L., Hattel J.H. (2006) Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3. *Acta Materialia*. 54:1199-1209.
14. Sheppard T., Wright D. S. (1979) Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminum alloys at elevated temperatures. *Metals Technology*. June p. 215.
15. Seidel T.U., Reynolds A.P., (2001) Visualization of the material flow in AA2195 Friction Stir Welds using a marker insert technique. *Metallurgical and Materials Transaction A*. 32:2879-2884.
16. Thomas M.W., Nicholas J., Needham J.C., Murch M.G. Tem-plesmith P., Dawes C.J. (1991) *Friction Stir Butt welding*. GB Patent Application No.9125978.8 Dec.
17. Xu S., Deng X., Reynolds A.P., Seidel T. U. (2001) Finite element simulation of material flow in friction stir welding. *Science and Technology of Welding and Joining*. 6(3): 191-193.
18. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Nithiarasu P. (2005) *The finite element method for fluid dynamics*. 6° Ed. Butterworth-Heinemann.