

**Tesista:** Sebastián Pereyra

Ingeniero Mecánico. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata.

**Título al que aspira:** Doctor en Ciencia de Materiales, UNMdP

**Tema:** “Análisis computacional del proceso de soldadura por fricción”

**Director de tesis:** Dr. Guillermo A. Lombera

**Co-director de tesis:** Dr. Santiago A. Urquiza

**Lugar de Trabajo:** Grupo de Ingeniería Asistida por Computadora (GIAC)  
Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, UNMdP

**Fecha de Defensa:** 26 de noviembre de 2013

**Jurados:** Ing. Luis A. de Vedia (Universidad Nacional de San Martín - CNEA)  
Dr. Marcelo Vénere (Universidad Nacional del Centro)  
Dr. Anibal Cassanelli (Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata)

## **Resumen**

El proceso de soldadura Friction Stir Welding (FSW) es una técnica de unión de estado sólido patentada en el año 1991 por The Welding Institute (TWI). Actualmente se aplica con éxito en la unión de piezas, abarcando una gran variedad de materiales –Aleaciones de Aluminio, Aceros, etc.– en la industria aeronáutica, aeroespacial, naval, ferroviaria y automotriz. Por sus particularidades y su reciente aparición –en relación a otros procesos de unión–, existe un gran interés en comprender mejor el proceso de FSW con el fin de mejorar sus capacidades y ampliar su aplicación.

Durante el proceso, el material de las piezas es deformado plásticamente a altas temperaturas y grandes velocidades de deformación por una herramienta no consumible que gira y avanza a lo largo de la junta, sin aporte de material. El ciclo termomecánico que experimenta el material modifica la microestructura y, en consecuencia, las propiedades mecánicas de la unión.

En el presente trabajo se aborda el desarrollo de un modelo computacional con capacidad para analizar el efecto de cada variable que interviene en el proceso sobre el material. Se resuelve a través del Método de los Elementos Finitos (MEF) un modelo termomecánico acoplado. Dadas las grandes deformaciones del material, se emplea una formulación de flujo basada en una descripción Euleriana. Para el material de las piezas se considera un modelo rígido y viscoplástico. El modelo también incluye a la herramienta de soldadura y una placa de respaldo –característica inherente al proceso.

Por un lado, el modelo incluye algunos parámetros cuyos valores no son posibles de establecer en forma anticipada. Para encontrar el valor de esos parámetros se implementa una técnica de estimación de parámetros. Además, para conocer la influencia de cada parámetro sobre los resultados y asistir al procedimiento de estimación se realiza un análisis

de sensibilidad.

Por otro lado, el uso de una descripción Euleriana implica considerar un cálculo adicional para obtener la deformación del material. Es posible determinar una medida de la deformación calculando el tensor gradiente de deformación –una magnitud esencialmente Lagrangiana– a partir de los campos de velocidades, de acuerdo a la cinemática de los fluidos. Para resolver la ecuación de la evolución del tensor gradiente de deformación se implementa un esquema numérico, desarrollado a través del MEF.

Por último, la validez de los resultados del modelo se encuentra limitada por la disponibilidad de datos experimentales confiables. Entonces, se comparan datos de temperatura obtenidos en una probeta soldada por FSW, bajo condiciones experimentales conocidas, con resultados de temperatura del modelo.

Los resultados obtenidos indican que el modelo desarrollado (i) incluye la gran mayoría de las variables involucradas en el proceso –las variables de proceso, las propiedades de los materiales, etc.–, (ii) permite el cálculo de la temperatura, la velocidad de deformación y la deformación del material, y (iii) está respaldado por datos experimentales.

## **Abstract**

Friction Stir Welding (FSW) is a solid state joining technique patented in 1991 by The Welding Institute (TWI). Currently, the process is successfully applied to join pieces, covering a wide variety of materials –Aluminum Alloys, Steels, etc.– in aeronautic, aerospace, naval, rail, and automotive industries. Due to its distinctive features and novelty –compared to other joining processes–, there is great interest in better understanding the FSW process in order to improve its capabilities and extend its application.

During the process, the material is plastically deformed at high temperatures and high strain rates by a non-consumable tool that rotates and moves along the joint line. The welding occurs at a temperature below melting point of the material, without filler material. The thermomechanical cycle experienced by the material alters the microstructure, and thus mechanical properties, of the welded joint.

In the present work, the development of a computational model that enables analyze the effect of variables involved in the process on the material is addressed. A thermomechanical coupled model is solved by the Finite Element Method (FEM). A flow formulation based on the Eulerian description is used to deal with the large deformations of the material. A rigid-viscoplastic material model is considered for the welding pieces. The model also includes the welding tool and a backing plate –an inherent feature of the process.

On one hand, the model involves some parameters whose values are not possible to establish in advance. A parameter estimation technique is implemented to find the value of these parameters. Furthermore, a sensitivity analysis is performed to determine the influence of each parameter on the results and assist the estimation procedure.

Moreover, the use of an Eulerian description involves considering an additional method to compute the deformation of the material. According to the kinematics of fluid flow, it is possible to get a measure of the deformation from computing the deformation gradient tensor –an essentially Lagrangian quantity–, by means of velocity field. A numerical scheme, developed by the FEM, is implemented to solve the evolution equation of the deformation gradient tensor.

Finally, the validity of model results is limited by the availability of reliable experimental data. Therefore, temperature measurements from a test specimen welded by FSW, under

known experimental conditions, are compared with temperature results of the model.

The results show that the model (i) includes a great many variables involved in the process –process variables, materials properties, etc.–, enables calculating the temperature, strain rate and deformation of the material, (iii) and is supported by experimental data.