

ACERO

L A T I N O A M E R I C A N O

Mayo · Junio de 2009
Número 514

La Siderurgia Latinoamericana: 50 años de transformaciones

*Crisis en la industria, Recursos Humanos
e iniciativas para el largo plazo*

*¿Cómo puede la mecánica computacional
ayudar a la siderurgia?*

*Walt Disney Concert Hall,
Los Ángeles - EE.UU.*

«Ingenio y plasticidad dan forma al ACERO»

¿Cómo puede la mecánica computacional ayudar a la siderurgia?

Por Marcela B. Goldschmit, Rita G. Toscano y Eduardo N. Dvorkin
SIM&TEC S.A., Buenos Aires, Argentina (www.simytec.com)

En el presente trabajo se comentan algunas simulaciones computacionales desarrolladas utilizando el método de elementos finitos, para aplicaciones de la industria siderúrgica.

Introducción

En la actualidad, para el diseño, desarrollo y optimización de procesos y productos, la industria siderúrgica usa simulaciones numéricas desarrolladas utilizando las herramientas de la mecánica computacional.

En el desarrollo de modelos computacionales se reconocen cuatro etapas diferenciadas:

- La **definición del fenómeno físico** a ser analizado y la identificación de sus aspectos más relevantes.
- La **formulación del modelo matemático**, usualmente en la forma de un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales (EDP) con la definición de sus correspondientes condiciones de borde y condiciones iniciales. Importantes decisiones sobre qué aspectos relevantes de la física deben ser considerados e incluidos en el modelo. En este nivel se introducen las hipótesis sobre respuesta de los materiales (relaciones constitutivas), descripción de la fricción, de las cargas externas, etc. Es indispensable que cuando se analice la respuesta proporcionada por un modelo, se compruebe la consistencia entre las predicciones del modelo y las hipótesis utilizadas.
- La **formulación del modelo numérico**. Generalmente, el sistema de EDP no puede ser integrado analíticamente

te y es necesario recurrir a un método numérico para obtener soluciones aproximadas.

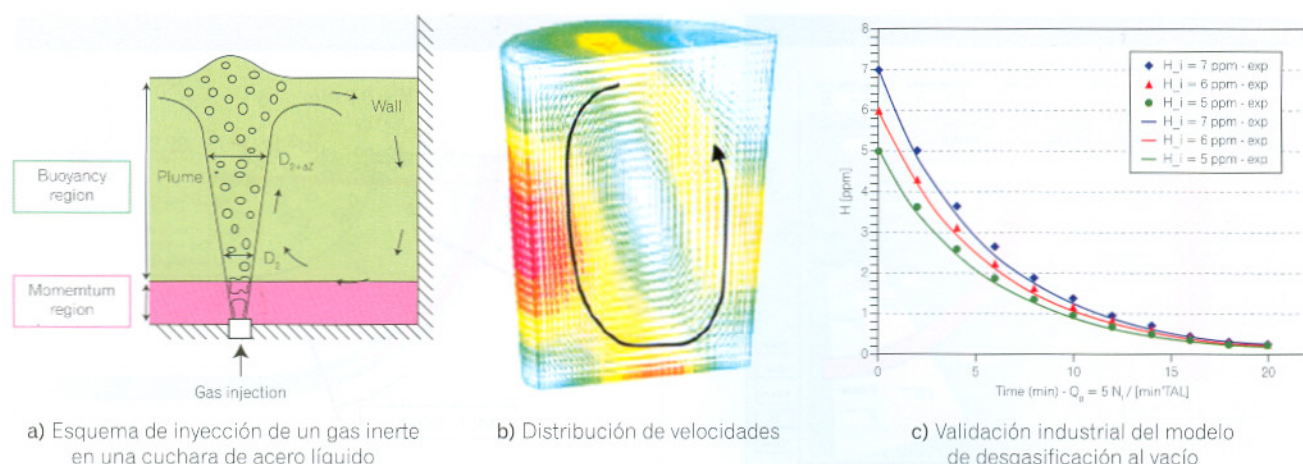
- La **verificación/validación de los resultados numéricos**. La verificación es un paso matemático en el que se comprueba que la solución numérica sea una solución lo suficientemente exacta del modelo matemático. La validación es un paso ingenieril en el que se comprueba que la solución numérica represente apropiadamente los aspectos relevantes del problema físico [1].

La calidad de los resultados numéricos depende de que el modelo numérico haya sido correctamente establecido y de la calidad de los datos de entrada. Una vez que se ha decidido sobre las relaciones constitutivas a utilizar, deben asignarse valores numéricos (datos de entrada) a las constantes de los materiales, para lo que deberá recurrirse a ensayos experimentales y a su interpretación vía análisis inversos.

Algunos ejemplos de datos de entrada que deben analizarse cuidadosamente usando técnicas de análisis inverso son:

- Propiedades mecánicas de los materiales: en nuestras publicaciones [2-4] se discute la evaluación de los parámetros de la relación constitutiva viscoplástica para un acero deformándose en caliente a partir de los resultados de ensayos de torsión en caliente.

Figura 1
TurFlow - Modelo fluidodinámico bifásico y de transferencia de masa en la metalurgia secundaria



- Propiedades térmicas de los materiales: en nuestra publicación [5], se discute la evaluación de los coeficientes de transferencia térmica agua-cobre a partir de termocuplas instaladas en el molde de una instalación de colada continua de acero.

En el presente trabajo se comentan algunas simulaciones computacionales desarrolladas utilizando el método de elementos finitos (MEF, [6]) para aplicaciones de la industria siderúrgica.

Ejemplos de modelado de procesos siderúrgicos

El objetivo de modelar procesos siderúrgicos es el de estudiar sus «ventanas tecnológicas»¹ y lograr optimizarlos, teniendo en cuenta la calidad del producto y su costo.

Metalurgia secundaria de aceros

Objetivo industrial: desarrollar un programa de elementos finitos para simular el flujo bifásico de fluidos con transferencia de masa (acero líquido + gas de inyección), para ser aplicado en el análisis de la metalurgia de cuchara con la finalidad de:

- Optimizar la posición de los inyectores de gas inerte, considerando su acción sobre el mezclado del acero en la cuchara.
- Optimizar el proceso de nitrogenación de aceros.
- Optimizar el proceso de desgasificación de aceros por vacío (desnitrogenación y deshidrodecanación).

En la **Figura 1** se muestra a) un esquema de inyección de un gas inerte (Ar) en una cuchara de acero líquido, b) la distribución de velocidades del acero líquido en la cuchara durante la inyección de Ar, y c) la validación industrial del modelo de deshidrogenación al vacío realizada con el programa de elementos finitos TurFlow [7-9].

Colada continua de planchones o redondos de acero

Objetivo industrial: desarrollar un programa de elementos finitos para ser utilizado como herramienta de la ingeniería de proceso. Especificando la composición química del acero, la geometría de la instalación, la temperatura en el distribuidor, la velocidad de colada y los flujos de agua en los enfriamientos, se obtiene un mapa de temperaturas y la distribución de las zonas sólida, líquida y pastosa.

En la **Figura 2** se muestran pantallas típicas de datos de entrada y resultados de la distribución de fases obtenidas con el programa de elementos finitos CCAST [5,10].

Laminación en caliente de chapas

Objetivos industriales:

- Analizar la calidad dimensional y la planitud de los productos laminados, simulando el efecto de las diversas estrategias de laminación sobre la forma y el perfil de las chapas laminadas.
- Analizar el «hueso de perro» introducido por los rodillos de laminación vertical («edgers»).

Los siguientes resultados numéricos fueron obtenidos utilizando el programa de elementos finitos rígido-viscoplastico METFOR [2-4, 11-17].

Análisis de forma y perfil

En la **Figura 3** se esquematiza el proceso de simulación de METFOR, el cual incorpora el calentamiento de los rodillos en contacto con el planchón recalentado, la corona térmica que se desarrolla en los rodillos y la deformación de los rodillos por flexión más aplastamiento.

En la **Figura 4** se muestran los resultados de una validación desarrollada sobre una jaula desbastadora en un tren de laminación en caliente.

Análisis de laminación vertical

En las **Figuras 5 y 6** se presenta el resultado de la simulación de la formación del «hueso de perro» desarrollada con el programa METFOR y la validación industrial del modelo.

Modelado del proceso Mannesmann

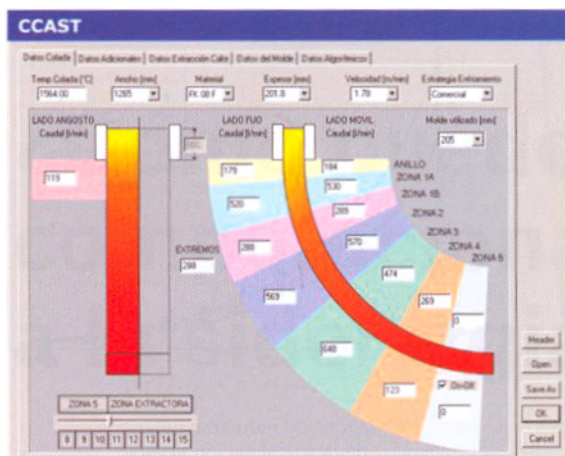
Objetivos industriales:

- Optimizar las herramientas: rodillos, punta y lineales (**Figura 6**) para lograr mejores tolerancias dimensionales.
- Evitar roturas.

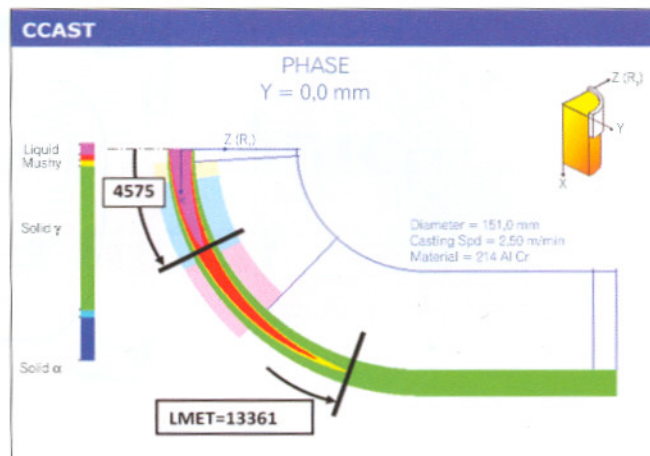
En la **Figura 7** se esquematiza el proceso Mannesmann, por el cual las barras redondas de colada continua se convierten en los «forados» que luego serán laminados para producir tubos de acero sin costura. Es importante tener en cuenta que la punta no produce el agujero central sino que guía el flujo plástico a partir

¹ Lugar geométrico en el espacio de las variables que controlan el proceso, en donde éste produce resultados dentro de especificaciones.

Figura 2
CCAST - Modelo térmico de instalaciones de colada continua



a) Entrada de datos de una colada continua de planchones



b) Resultados de la distribución de fases del acero de una colada continua de redondos

Figura 3
Esquema de simulación de METFOR

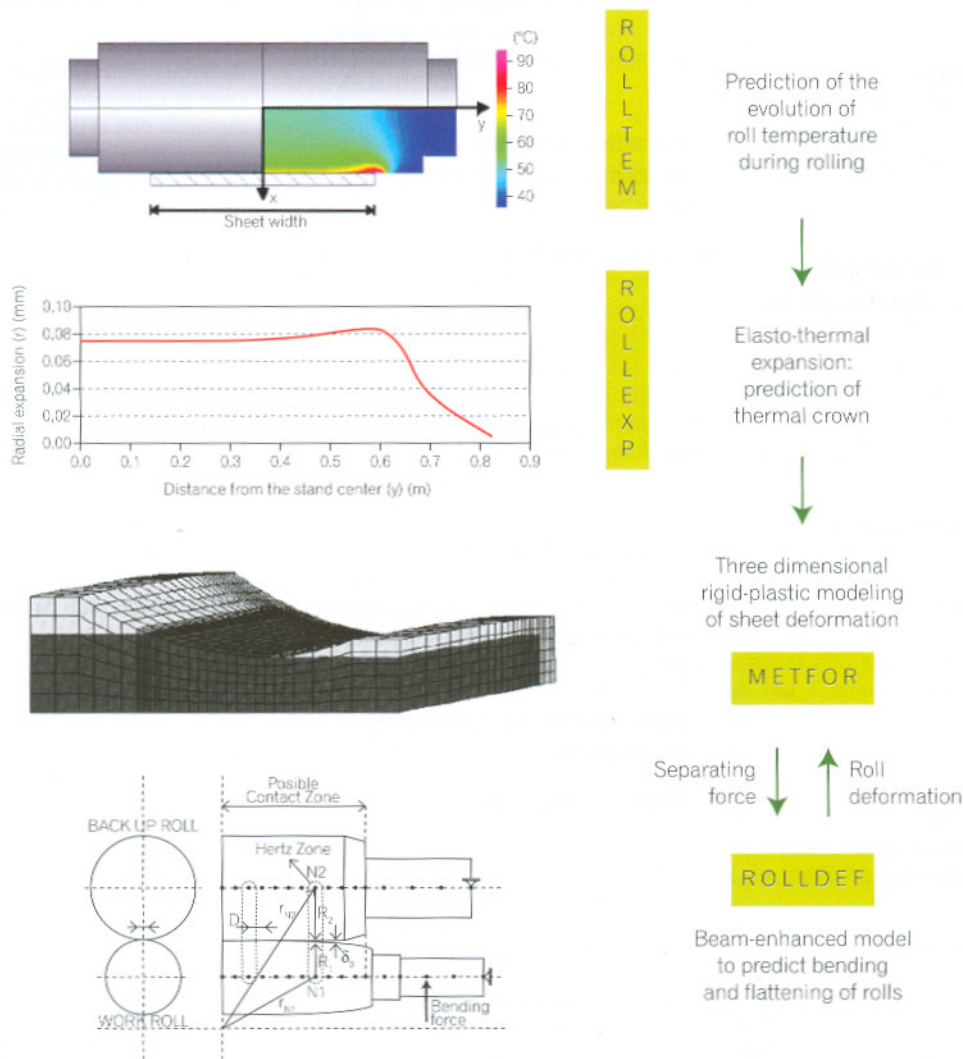


Figura 4
Validación comparando espesores medidos y resultados de la simulación en una jaula desbastadora

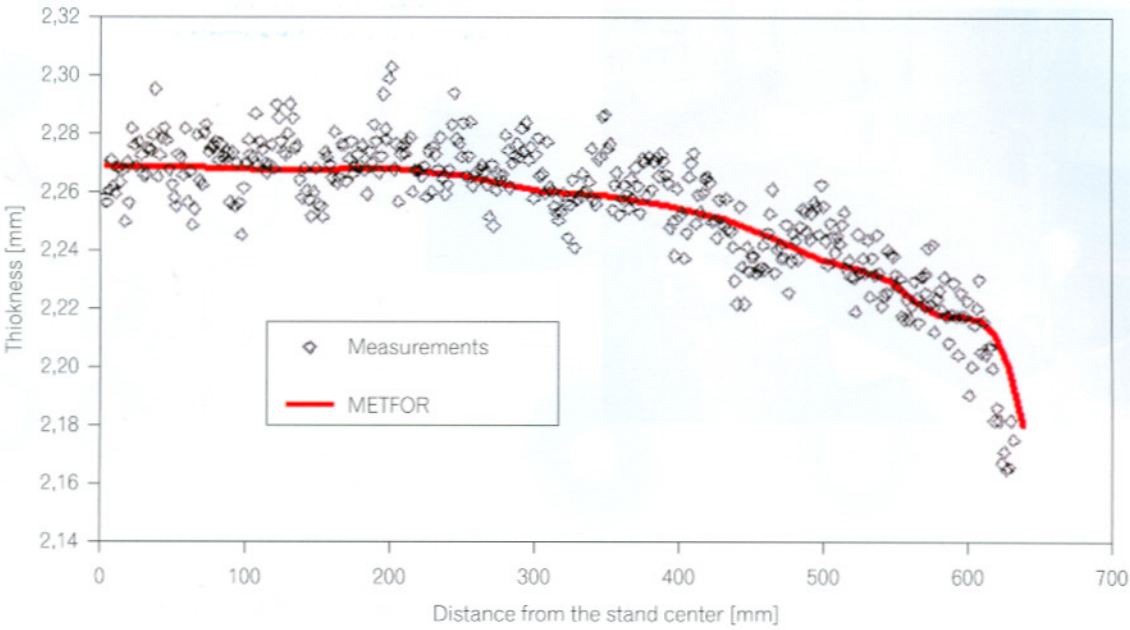


Figura 5
Formación del «hueso de perro» en los «edgers»

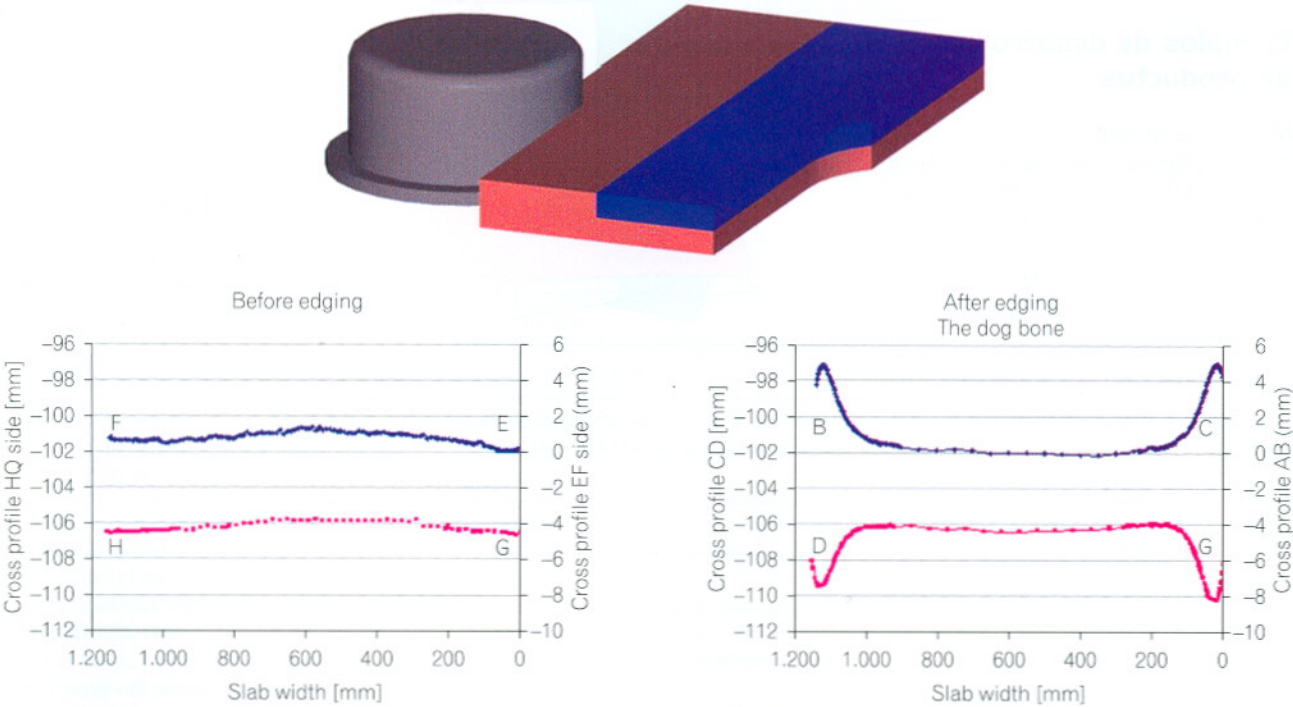
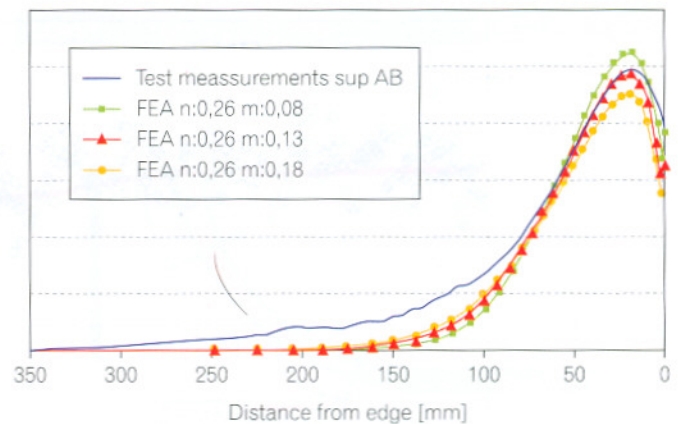


Figura 6
Validación del modelo de «edgers»



a) Mediciones de laboratorio



b) Valores medidos vs. valores numéricos para varios conjuntos de parámetros materiales

de dicho agujero. La cavitación central es consecuencia de tensiones de tracción que aparecen en el centro del redondo comprimido entre rodillos.

En nuestra Ref. [4] se discuten los detalles de la simulación desarrollada utilizando METFOR. Algunos resultados de la validación industrial del modelo son mostrados en la **Figura 8**.

Ejemplos de desarrollo de productos

Mantener la competitividad internacional de una empresa siderúrgica, involucra evolucionar permanentemente en la cartera de productos ofrecidos. El modelado del comportamiento en servicio de los nuevos productos, sirve para acelerar el proceso de desarrollo y dar más confiabilidad a sus resultados.

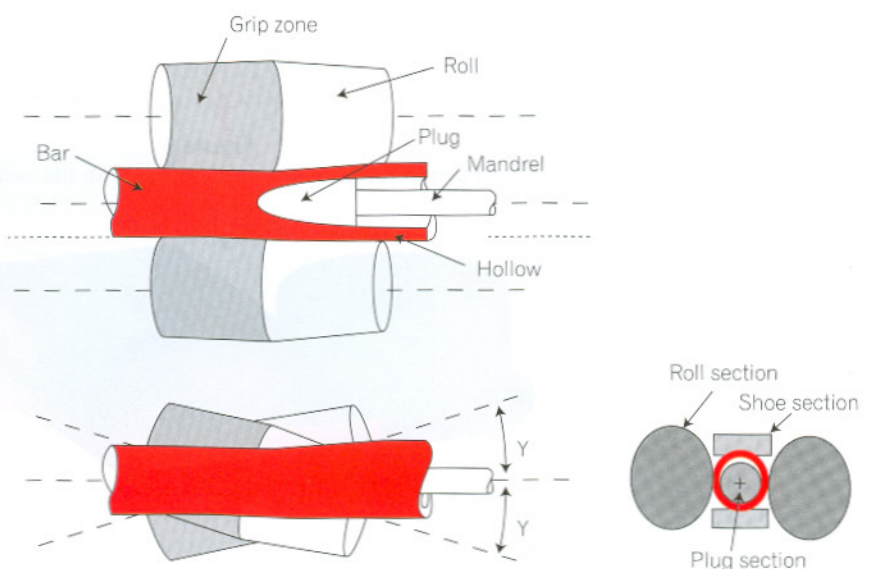
Desarrollo de conexiones roscadas para tubos petroleros

Objetivo industrial:

- Diseñar una conexión roscada para tubos petroleros con igual resistencia mecánica a la de los tubos que une.
- Diseñar una conexión roscada para tubos petroleros impermeable al pasaje de gas.

Para desarrollar los modelos que simulan el comportamiento de las conexiones roscadas de tubos petroleros en condi-

Figura 7
Esquema del proceso Mannesmann



ciones de servicio, se utilizó el *software* de elementos finitos ADINA [18].

En la **Figura 9** se presentan los resultados de la simulación de un ensayo de tracción y en la **Figura 10** se muestra la distribución de las tensiones de contacto que proveen la sellabilidad en un sello metal-metal, considerando dos posibles diseños del mismo [3].

Desarrollo de tubos para ductos submarinos

Objetivo industrial: Desarrollar un modelo del comportamiento del tubo a gran

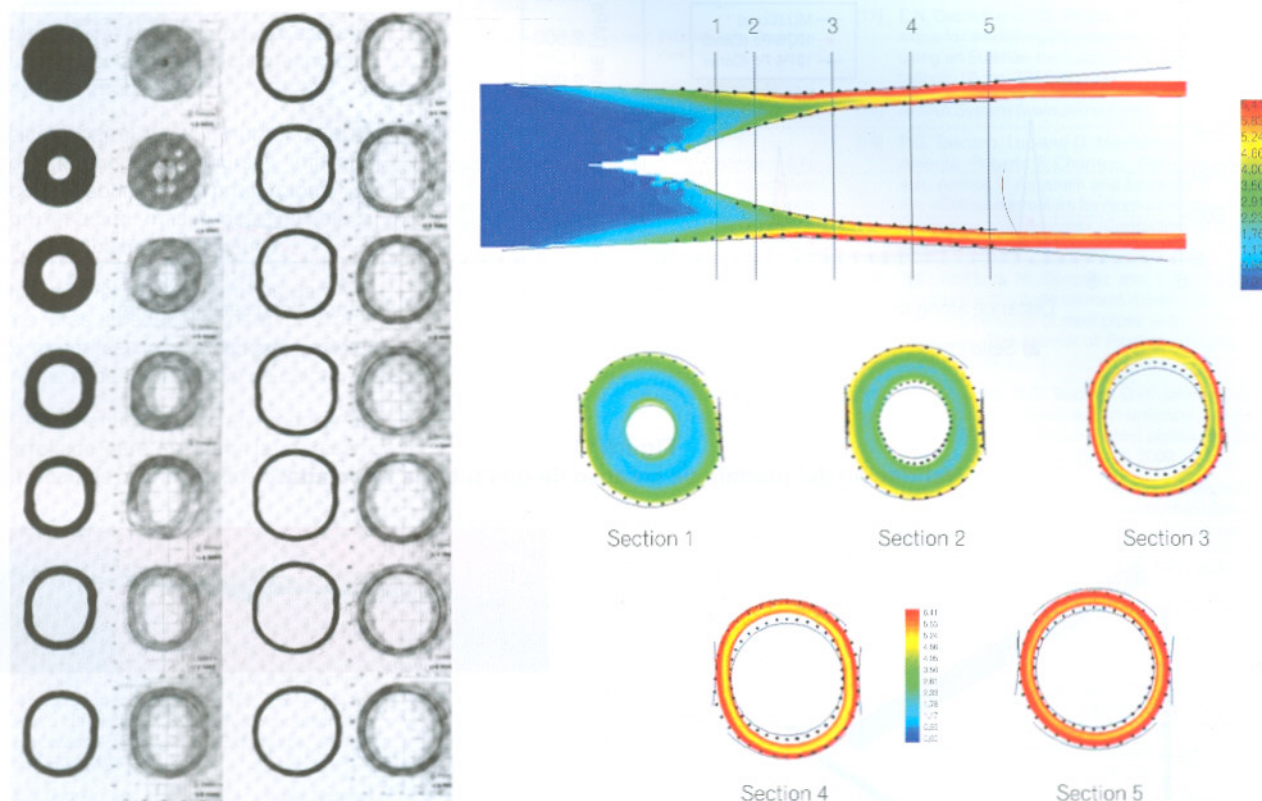
profundidad para investigar el efecto sobre su resistencia al colapso de propiedades mecánicas, tolerancias dimensionales y tensiones residuales.

Para investigar la resistencia al colapso de tubos a ser utilizados en la fabricación de tuberías submarinas, se utilizó el *software* de elementos finitos ADINA [18] y los resultados numéricos fueron sometidos a una extensa validación experimental [3, 19-24].

En la **Figura 11** se muestran los resultados obtenidos durante la validación del modelo de colapso de un tubo reforzado.

Figura 8

Validación del modelo del proceso Mannesmann: comparación entre resultados de METFOR y secciones cortadas de un forado obtenido mediante la interrupción del proceso dentro del perforador



a) Secciones cortadas de un forado obtenido mediante la interrupción del proceso dentro del perforador

b) Los puntos representan valores medidos y las curvas resultados del modelo

Desarrollo de una nueva conexión roscada para varillas de bombeo

Objetivo industrial: Desarrollar una conexión innovativa para varillas de bombeo que supere la *performance* a fatiga de las varillas estándar API.

En la **Figura 12** se presentan los mapas de tensiones principales de tracción y de deformaciones plásticas acumuladas para ambas conexiones, siendo visible las mejores condiciones de trabajo de la nueva unión comparada con la unión API [3].

Conclusiones

Las simulaciones computacionales son una poderosa herramienta en la industria siderúrgica para optimizar y desarrollar procesos y productos.

Figura 9
Modelado del ensayo de tracción de una conexión roscada para tubos petroleros

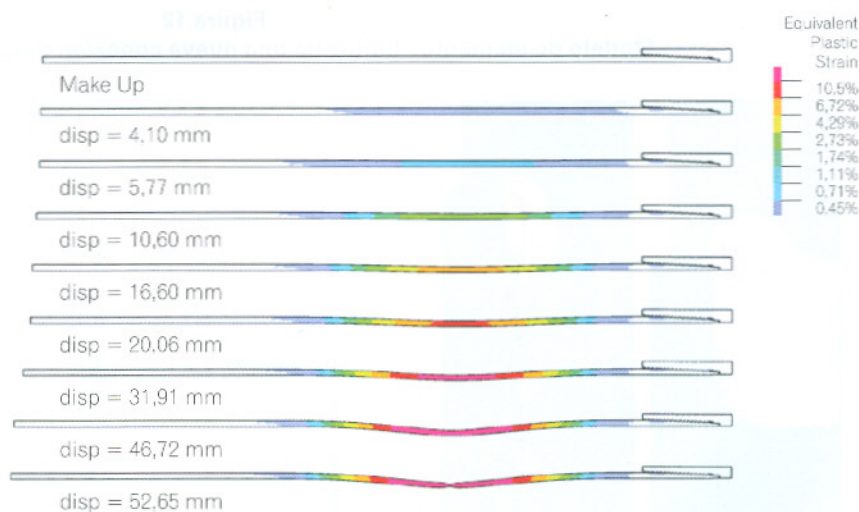


Figura 10
Modelado de las tensiones de contacto en sellos metal-metal

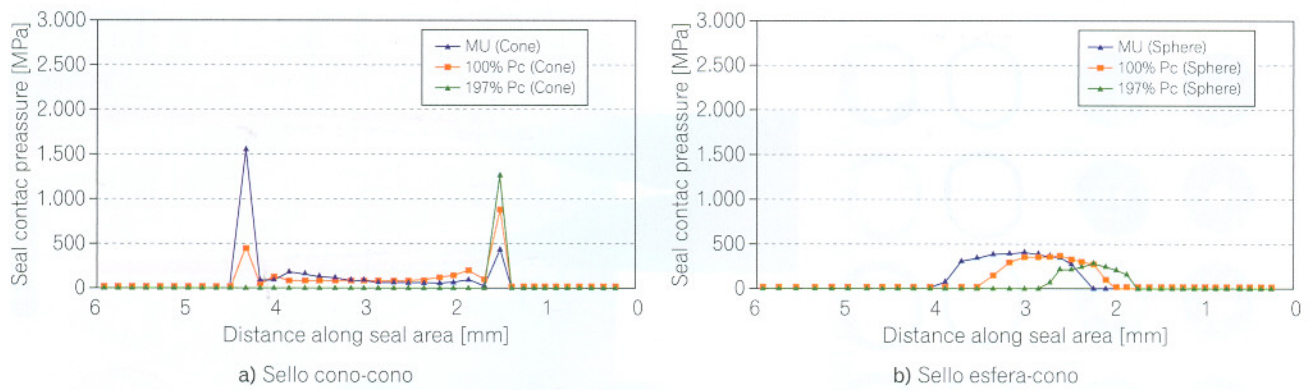
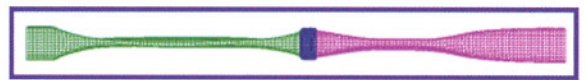
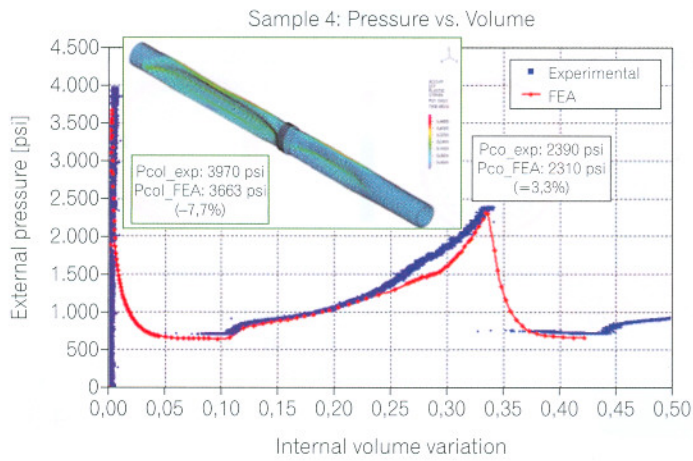


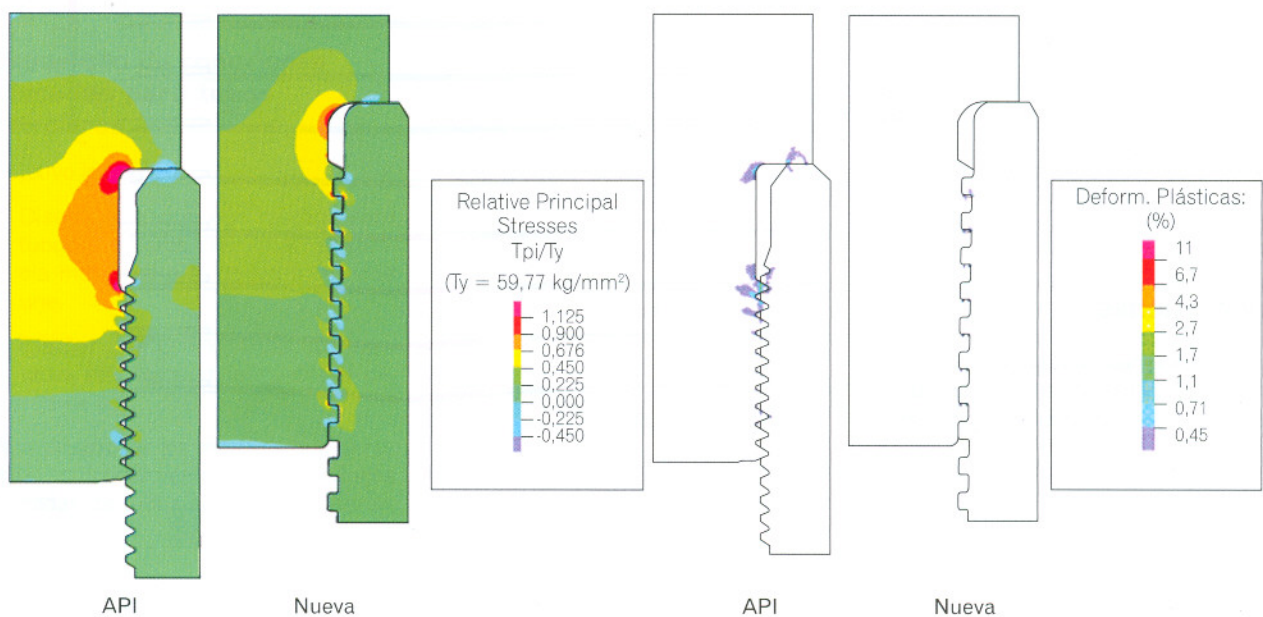
Figura 11
Validación del modelo de colapso de una tubería reforzada



a) Curvas presión vs. cambio de volumen

b) Tubo colapsado y modelo de tubo colapsado

Figura 12
Modelo de elementos finitos de una nueva conexión para varillas de bombeo



Si bien los paquetes de *software* comerciales son cada vez más potentes, queda en el analista:

- plantear un modelo matemático adecuado para el problema en estudio, que incorpore sus aspectos tecnológicos más importantes;
- seleccionar el modelo numérico que, considerando los recursos informáticos disponibles, proporcione la aproximación más exacta posible a dicho problema matemático;
- alimentar el modelo con los parámetros más adecuados para describir los materiales, procesos friccionales y procesos de intercambio de calor;
- y, finalmente, validar el modelo desarrollado para asegurar la representatividad de los resultados obtenidos.

Referencias

- [1] E.N. Dvorkin, «Computational Mechanics: Bridging the Gap between Science and Technology», IACM-Expressions, 22, 2008.
- [2] E.N. Dvorkin, M.A. Cavaliere and M.B. Goldschmit, «Finite element models in the steel industry. Part I: simulation of flat product manufacturing processes», Computers & Structures, 81, pp. 559-573, 2003.
- [3] E.N. Dvorkin and R.G. Toscano, «Finite element models in the steel industry. Part II: analyses of tubular products performance», Computers & Structures, 81, pp. 575-594, 2003.
- [4] D.A. Berazategui, M.A. Cavaliere, L. Montelatici and E.N. Dvorkin «On the modeling of complex 3D bulk metal forming processes via the pseudo-concentrations technique. Application to the simulation of the Mannesmann piercing process», Int. J. Numerical Methods in Engng, 65, pp. 1113-1144, 2006.
- [5] M. González, M.B. Goldschmit, A.P. Assanelli, E. Fernández Berdaguer and E.N. Dvorkin, «Modeling of the solidification process in a continuous casting installation for steel slabs», Metallurgical and Materials Transactions, 34B, pp. 455-473, 2003.
- [6] K.J. Bathe, Finite Element Procedures, Prentice Hall, NJ, 1996.
- [7] M.B. Goldschmit y A.H. Coppola Owen, «Numerical modeling of gas stirred ladles», Ironmaking & Steelmaking, 28, 337-341, 2001.
- [8] M.B. Goldschmit, S.P. Ferro, R.J. Príncipe y A.H. Coppola Owen, «On the modeling of liquid steel processes», Latin American Applied Research, 32, 267-273, 2002.
- [9] G. Venturini and M. Goldschmit, «Gas-liquid reaction model in gas-stirred systems - Part 1: Numerical model», Metallurgical and Materials Transactions B, 38B, 461-475, 2007.
- [10] M. González, M. Goldschmit, R. Musante, R. Venica, G. Di Gresia y W. Balante, «Prediction of whale slab conditions using a heat transfer model of the steel slab continuous caster», 14th. Steelmaking Conference, San Nicolás, Argentina, 2003.
- [11] E.N. Dvorkin and R.G. Toscano, «A new rigid-viscoplastic model for simulating thermal strain effects in metal forming processes», Int. J. Numerical Methods in Engng, 58, pp. 1803-1816, 2003.
- [12] M.A. Cavaliere, M.B. Goldschmit and E.N. Dvorkin, «Finite element simulation of the steel plates hot rolling process», Int. J. Numerical Methods in Engng., 52, pp. 1411-1430, 2001.
- [13] M.A. Cavaliere, M.B. Goldschmit and E.N. Dvorkin, «Finite element analysis of steel rolling processes», Computers & Structures, 79, pp. 2075-2089, 2001.
- [14] E.N. Dvorkin, M.A. Cavaliere, M.B. Goldschmit and P.M. Amenta, «On the modeling of steel product rolling processes», Int. J. Forming Processes (ESAFORM), 1, pp. 211-242, 1998.
- [15] E.N. Dvorkin, M.B. Goldschmit, M.A. Cavaliere, P.M. Amenta, O. Marini and W. Stroppiana, «2D finite element parametric studies of the flat rolling process», J. of Materials Processing Technology, 68, pp. 99-107, 1997.
- [16] E.N. Dvorkin, M.A. Cavaliere and M.B. Goldschmit, «A three field element via augmented lagrangian for modelling bulk metal forming processes», Computational Mechanics, 17, pp. 2-9, 1995.
- [17] E.N. Dvorkin and E.G. Petöcz, «An effective technique for modelling 2d metal forming processes using an Eulerian formulation», Engng. Computations, 10, pp. 323-336, 1993.
- [18] ADINA System (www.adina.com)
- [19] R.G. Toscano, Luciano O. Mantovano, Pablo M. Amenta, Roberto F. Charreau, Daniel H. Johnson, Andrea P. Assanelli and Eduardo N. Dvorkin, «Collapse arrestors for deepwater pipelines. Cross-over mechanisms», Computers & Structures, 86, pp. 728-743, 2008.
- [20] R.G. Toscano, M. Gonzalez and E.N. Dvorkin, «Validation of a finite element model that simulates the behavior of steel pipes under external pressure», The Journal of Pipeline Integrity, 2, pp. 74-84, 2003.
- [21] A.P. Assanelli, R.G. Toscano, D.H. Johnson and E.N. Dvorkin, «Experimental/numerical analysis of the collapse behavior of steel pipes», Engng. Computations, 17, pp. 459-486, 2000.
- [22] R.G. Toscano and E.N. Dvorkin, «Deepwater pipelines: reliability of finite element models in the prediction of collapse and collapse propagation loads», 6th International Pipeline Conference, IPC2006-10150, Calgary, Alberta, Canada, September 2006.
- [23] R.G. Toscano, L.O. Mantovano, P. Amenta, R. Charreau, D. Johnson, A. Assanelli and E.N. Dvorkin, «Collapse arrestors for deepwater pipelines: finite element models and experimental validations for different cross-over mechanisms», Proceedings OMAE 2006 - 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Hamburgo, 2006.
- [24] R.G. Toscano, C. Timms, E.N. Dvorkin and D. De-Geer, «Determination of the collapse and propagation pressure of ultra-deepwater pipelines», Proceedings OMAE 2003 - 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2003. 