

## APLICACIONES DE MECANICA COMPUTACIONAL EN LA INDUSTRIA SIDERO-METALURGICA

E.N. DVORKIN  
A.P. ASSANELLI  
M.A. CRUCHAGA  
M.B. GOLDSCHMIT  
E.G. PETÖCZ  
y  
R.A. RADOVITZKY

*Centro de Investigación Industrial (CINI), FUDETEC,  
Av. Córdoba 320, Buenos Aires, Argentina.*

### RESUMEN

En el presente trabajo se presentan aplicaciones de Mecánica Computacional en el ámbito de la industria sidero-metalúrgica.

Las aplicaciones que se presentan pueden ser divididas en: análisis de procesos de fabricación y análisis de la performance en servicio de productos siderúrgicos. En el primer caso el objetivo del modelado computacional es la optimización de procesos productivos y, en el segundo caso, el objetivo es la evaluación de la prestación que puede esperarse de diversos productos siderúrgicos, en particular se ha analizado la performance de tubos de acero sin costura para aplicaciones petroleras.

### SUMMARY

In the present paper we comment on some Computational Mechanics applications in the siderurgical and metallurgical industries.

The applications we present can be classified as: analyses of manufacturing processes and analyses of service performance of steel products. For the first group the objective of the computational modelling is to optimize the processes, for the second group the objective is to evaluate the performance that can be expected from different products, in particular we have considered the performance of seamless steel tubes in the oil industry (oil country tubular goods).

Recibido: Noviembre 1991

## INTRODUCCION

Las industrias sidero-metalúrgicas, sobre todo a partir de la incorporación exitosa de los mini-mills al mapa productivo siderúrgico, están pasando por un proceso de sostenido crecimiento tecnológico. El objetivo de los nuevos desarrollos tecnológicos es, por un lado el de aumentar la eficiencia de los procesos de fabricación en lo que hace al uso de recursos (reciclados internos de material, consumo de energía, etc.) y, por otro lado es el de fabricar productos de creciente confiabilidad.

Para optimizar la utilización de recursos en los procesos productivos es necesario un profundo conocimiento de los mismos y de su sensibilidad a las variaciones de los diferentes parámetros de control. En este sentido el modelado computacional de dichos procesos brinda la posibilidad de realizar análisis paramétricos aislando la acción individual de cada una de las variables que gobiernan un determinado proceso.

Para obtener productos de elevada confiabilidad es necesario poder estudiar la performance en servicio de diferentes productos siderúrgicos a través de los estados de sollicitaciones (termo-mecánicas) que surgen de la utilización de dichos productos en aplicaciones específicas.

En la última década el desarrollo del método de los elementos finitos<sup>1,2</sup> aplicado a problemas no-lineales de mecánica del continuo hace que este sea la herramienta preferentemente usada en el ámbito ingenieril para el tipo de aplicaciones industriales arriba descritas.

Es importante hacer notar que, para poder utilizar una formulación de elementos finitos para problemas no-lineales, como una herramienta ingenieril confiable es necesario que esta formulación cumpla con los siguientes criterios<sup>3-7</sup>:

- La formulación debe estar firmemente basada en los conceptos de la Mecánica del Continuo con hipótesis de discretización "limpias" para problemas lineales y no-lineales que no incluyan, por ejemplo, factores numéricos ajustables.
- La formulación debe satisfacer el Patch Test de Irons<sup>8</sup>.
- La capacidad predictiva de los elementos debe ser alta y debe deteriorarse lo mínimo posible cuando la geometría de los mismos se distorsiona y cuando varían las propiedades de los materiales (por ejemplo, los elementos no deben sufrir de bloqueo en regímenes de plasticidad).

## ANALISIS DE PROCESOS PRODUCTIVOS

Como se explicara anteriormente, con el objeto de estudiar la influencia de diversas variables operativas en los resultados de procesos productivos utilizados en las industrias siderúrgicas y metalúrgicas, se ha procedido a modelar utilizando el Método de los Elementos Finitos algunos procesos cuyos modelos se describen brevemente en la presente sección y que son:

1. Colada continua de acero.
2. Perforación Mannesmann.
3. Tratamiento térmico de tubos de acero sin costura.
4. Enderezado de tubos de acero sin costura.

- 5. Procesos de forja.
- 6. Soldadura de chapa.

**Colada continua de acero**

Se ha trabajado utilizando el sistema ADINA (ADINA, ADINA-T, ADINA-IN, ADINA-PLOT)<sup>9</sup> en el modelado de la colada continua de redondos de la planta de tubos de acero sin costura de Siderca (Campana, Argentina).

En la Figura 1 se muestra un esquema de la colada continua.

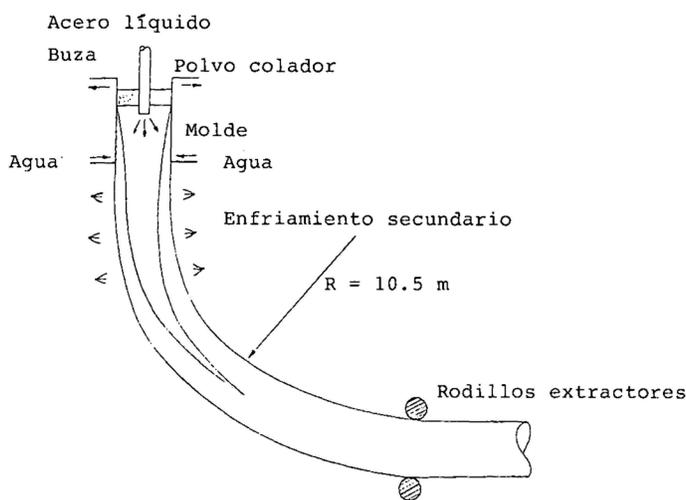


Figura 1. Esquema de la Colada Continua de SIDERCA.

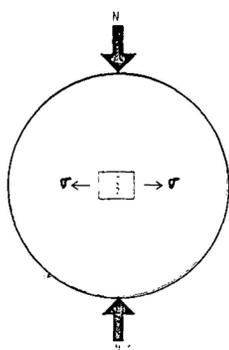


Figura 2. Esquema de la fisuración central en un redondo de colada continua bajo los rodillos extractores.

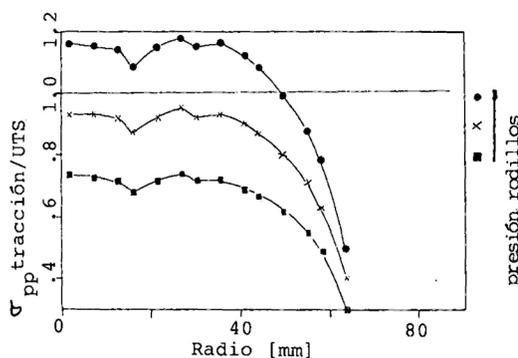


Figura 3. Tensiones principales de tracción en redondos de colada continua, bajo rodillos extractores.

En la Figura 2 se indica un esquema de la formación del defecto denominado fisuración central y en la Figura 3 un análisis de la presión en los rodillos extractores y su incidencia en la fisuración central<sup>10</sup>.

En las Figuras 4 y 5 se presentan análisis paramétricos del enfriamiento de la barra de colada continua y en la Figura 6 un esquema de tensiones térmicas desarrolladas para un dado esquema de enfriamiento.

Los análisis mencionados se llevaron a cabo con coeficientes de transmisión de calor obtenidos de la literatura<sup>11,12</sup>. En la actualidad se está instrumentando con termocuplas un molde de la colada continua para poder relevar parámetros de funcionamiento que permitan ajustar los coeficientes de transmisión de calor y representar con mayor precisión el proceso de enfriamiento de la barra de la colada continua.

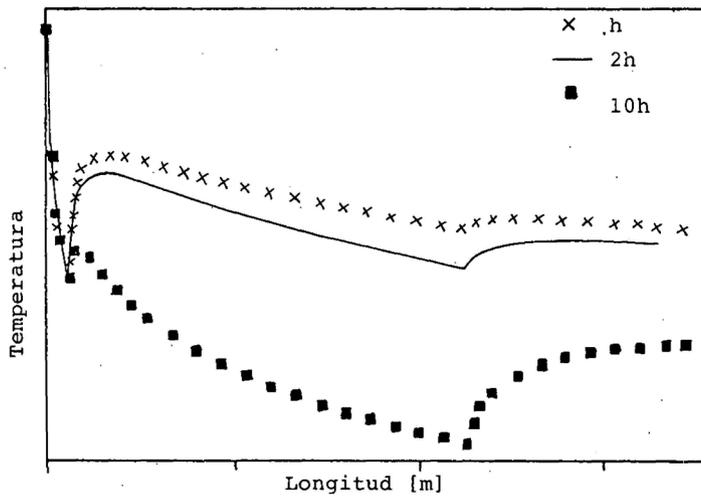


Figura 4. Análisis del efecto de la variación del coeficiente de convección del secundario de la colada continua.

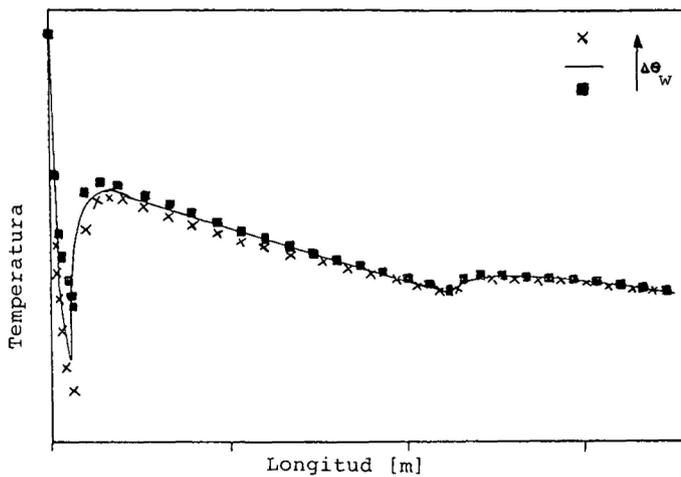


Figura 5. Análisis del efecto del incremento de la temperatura del agua de enfriamiento ( $\Delta\Theta_w$ ) del molde de la colada continua.

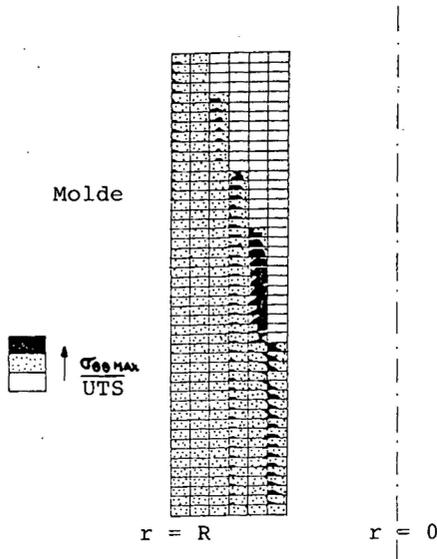


Figura 6. Tensiones circunferenciales máximas en el espesor solidificado dentro del molde de la colada continua.

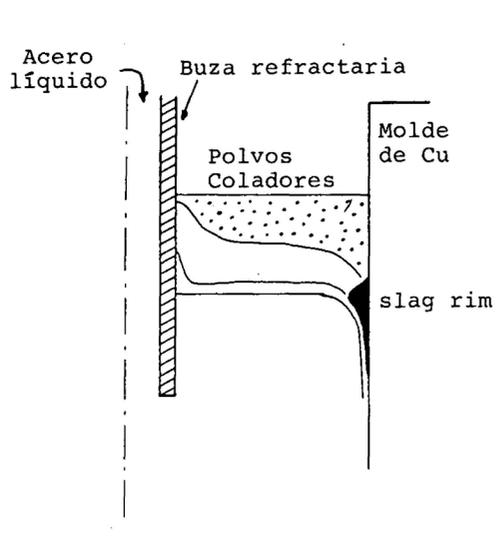


Figura 7. Modelo para el estudio de la capa de polvos coladores en la colada continua.

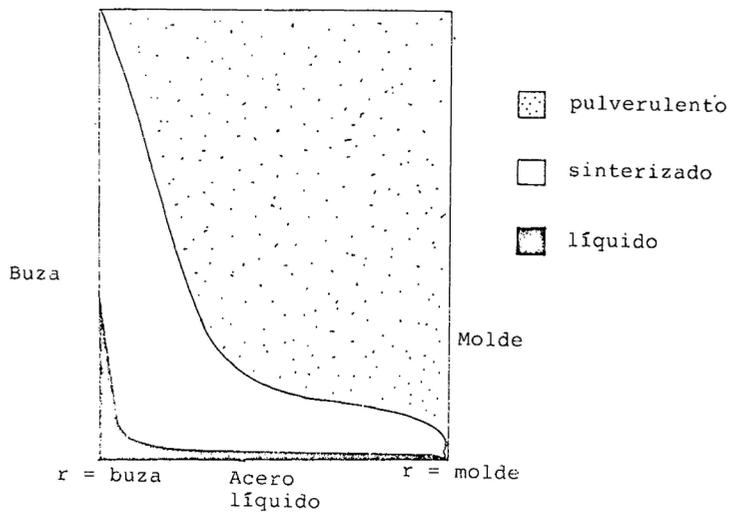


Figura 8. Distribución de las distintas capas de polvo colador no-exotérmico.

Otro problema importante en el proceso es la lubricación entre la barra y el molde (Figura 7). Para asegurar una correcta lubricación es necesario un espesor mínimo de polvo colador que proteja al menisco. En la Figura 8 se muestran resultados obtenidos con ADINA-T para la capa de un polvo colador típico<sup>13</sup>.

### Perforación Mannesmann

Para este proceso de producción de tubos (ver Figura 9) se ha modelado el estado térmico de las puntas del perforador de Siderca<sup>14</sup> utilizando el sistema ADINA-T<sup>9</sup>.

Para una punta sólida se muestra la distribución de temperaturas al final de una perforación en la Figura 10 y al final de la refrigeración intermedia entre perforaciones en la Figura 11.

Estos resultados numéricos, que son función de coeficientes de transmisión de calor de difícil determinación, han sido calibrados con mediciones termográficas realizadas en la planta.

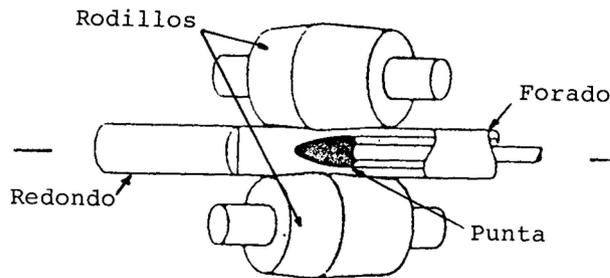


Figura 9. Producción de tubos por el proceso de perforación Mannesmann.

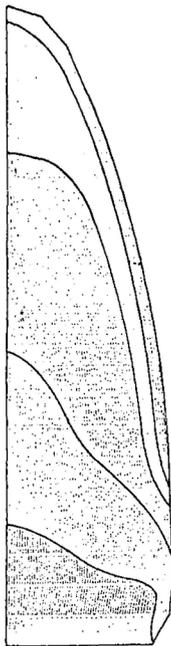


Figura 10. Distribución de Temperaturas al final de una perforación.

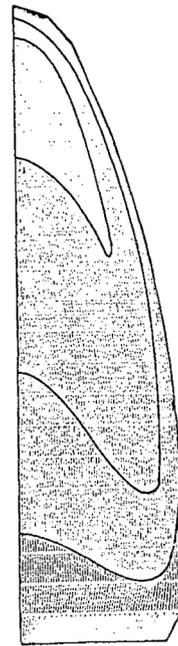


Figura 11. Distribución de Temperaturas al final de la refrigeración intermedia.

### Tratamiento térmico de los tubos de acero sin costura

Se ha procedido a modelar para Siderca el temple de los tubos sin costura. Este tratamiento termo-mecánico produce en todo el espesor del tubo una transformación martensítica (sin difusión). Se efectuó la modelación siguiendo los lineamientos de la referencia [15] y usando en el sistema ADINA<sup>9</sup> las reales propiedades dilatométricas del material empleado.

En la Figura 12 se grafica para un tubo ovalizado y perfectamente concéntrico el valor de su diámetro exterior en función del tiempo durante la transformación.

Nótese el crecimiento del diámetro exterior debido a la expansión durante la formación de martensita en la etapa de enfriamiento.

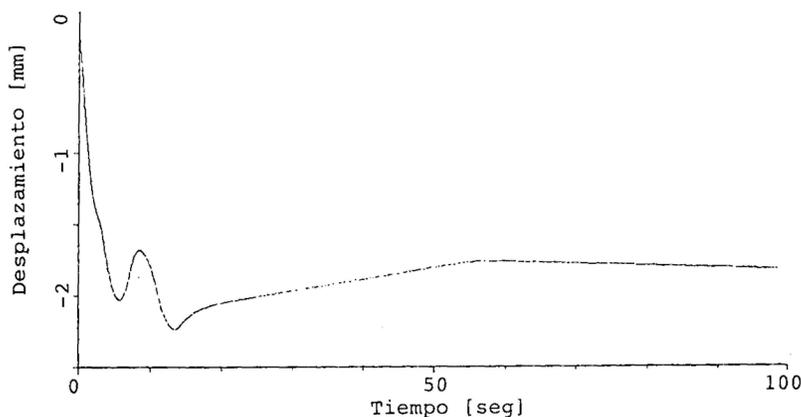


Figura 12. Desplazamiento del diámetro exterior con el tiempo durante el temple de un tubo imperfecto.

### Enderezado de tubos de acero sin costura

La función de los equipos enderezados de tubos de Siderca es mejorar la rectitud y redondez de los mismos.

La tecnología de enderezado fue estudiada en la referencia [16] recurriendo a modelos de elementos finitos. En las Figuras 13 y 14 se comparan los resultados que se prevén obtener al enderezar en dos máquinas con diferentes geometrías de rodillos un tubo torcido.

### Proceso de forja

Utilizando una formulación de flujo rígido-viscoplástico<sup>17</sup> y el método de las pseudo-concentraciones<sup>18-23</sup>, conjuntamente con el elemento QMITC<sup>6,7,24</sup> se han modelado los procesos de forja que se exponen en las Figuras 15 y 16.

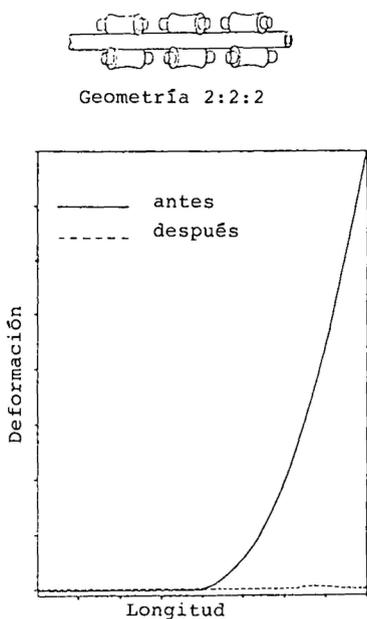


Figura 13. Enderezado de "gancho de punta" en una máquina 2:2:2.

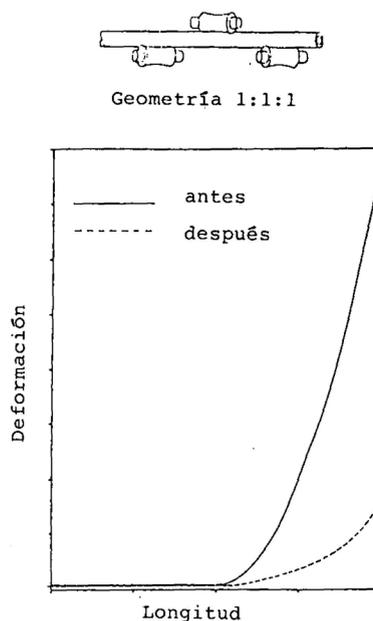


Figura 14. Enderezado de "gancho de punta" en una máquina 1:1:1.

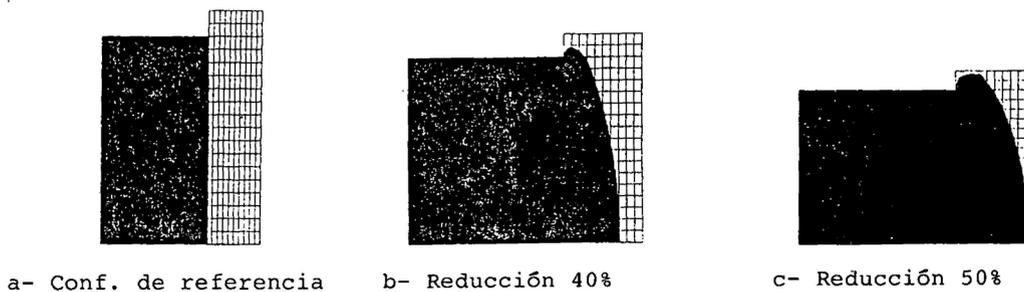


Figura 15. Compresión de un cilindro con adherencia. (No a escala).

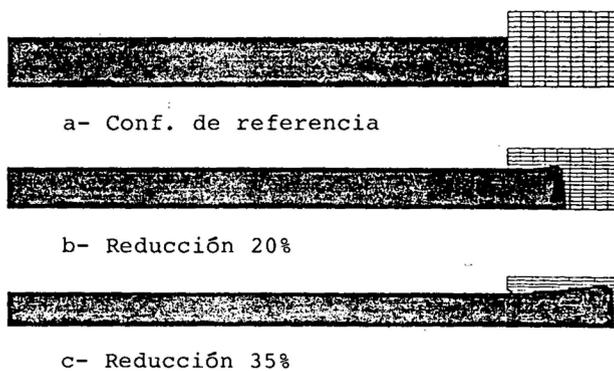


Figura 16. Compresión de un disco.

### Soldadura de chapas

Para aplicaciones en la empresa de construcciones metálicas Cometarsa se ha modelado el régimen térmico resultante en la soldadura a tope de dos chapas utilizando el sistema ADINA-T<sup>9</sup>.

Se simularon los procesos de soldadura utilizando mallas tridimensionales y bidimensionales (Figuras 17 y 18) y se llegó a la conclusión, luego de comparar resultados en distintas secciones (Figura 19) que es válido utilizar para aplicaciones prácticas la simplificación bidimensional.

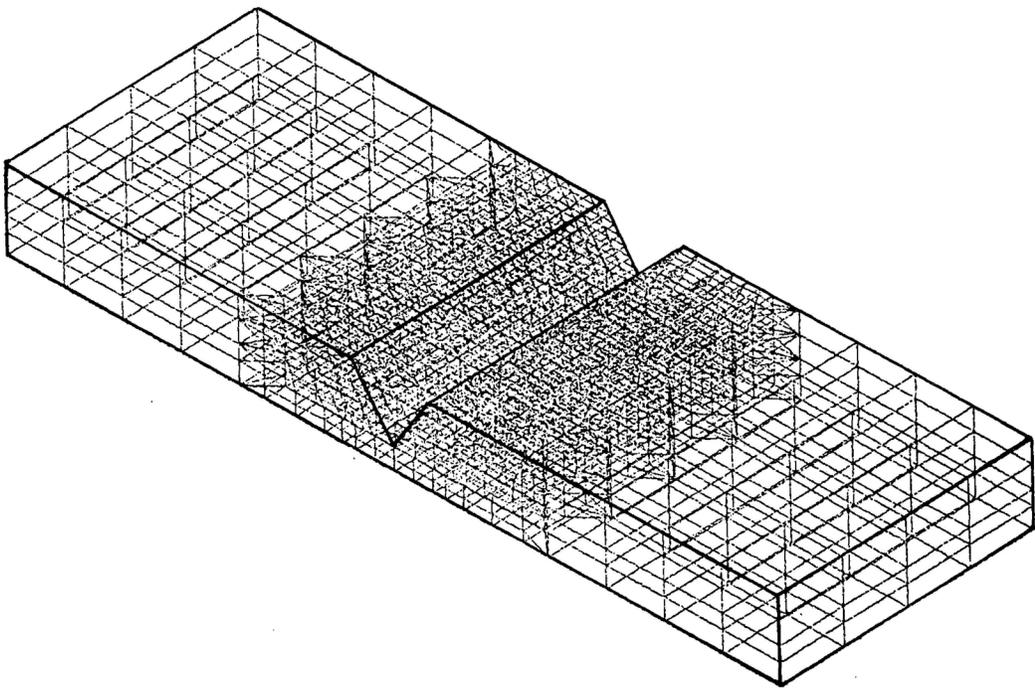


Figura 17. Malla tridimensional de elementos finitos para modelar los procesos de soldadura.



Figura 18. Malla bidimensional de elementos finitos para modelar los procesos de soldadura.

En la Figura 20 se presentan los perfiles de temperaturas que se obtienen durante la soldadura de un cordón intermedio en el instante en que la temperatura es cercana a la máxima en esa sección.

Para calibrar estos modelos se están realizando mediciones en chapas instrumentadas.

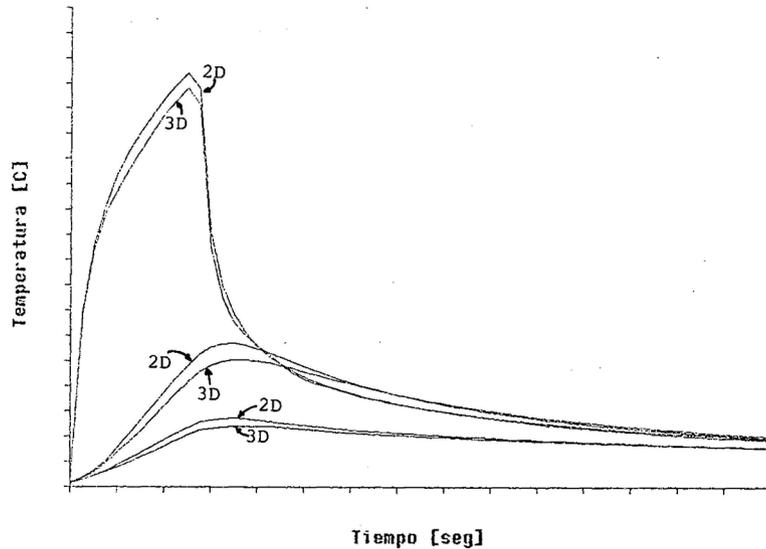


Figura 19. Comparación de los resultados entre los modelos tridimensionales y bidimensionales para los procesos de soldadura.

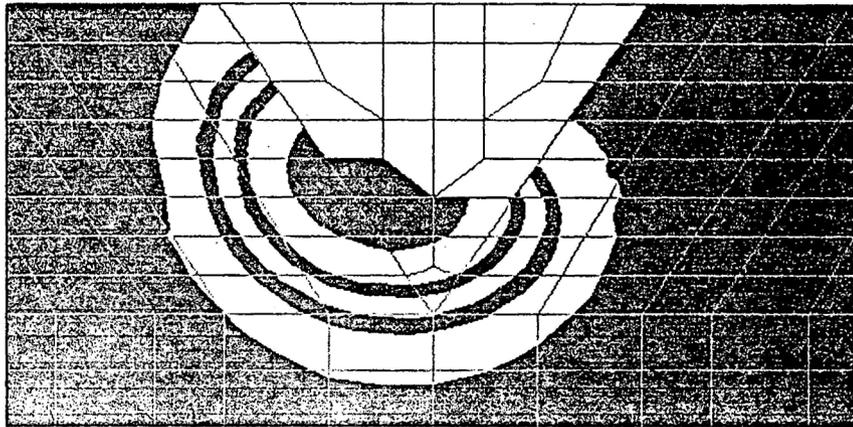


Figura 20. Perfiles de temperaturas que se obtienen durante el modelado de los procesos de soldadura.

### ANÁLISIS DE LA PERFORMANCE EN SERVICIO DE LOS PRODUCTOS SIDERURGICOS

Con el objeto de poder predecir las prestaciones esperables en servicio de tubos de acero sin costura para aplicaciones petroleras (OCTG) se ha procedido a analizar, utilizando el sistema ADINA<sup>9</sup> el efecto que sobre el colapso de las tuberías de contención de pozos (casing) tienen diferentes parámetros geométricos y mecánicos de los tubos.

En las Figuras 21 a 23 se grafican los resultados para ovalidad, excentricidad y tensiones residuales de los tubos, utilizándose en todos los casos análisis no-lineales y cargas de presión hidrostática (seguidoras).

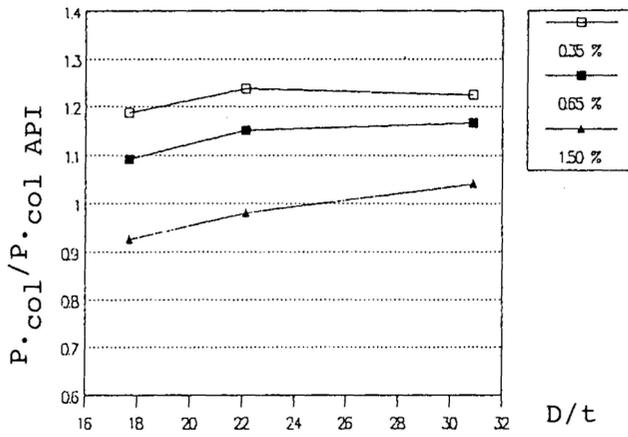


Figura 21. Efecto de la ovalidad (%) sobre la presión de colapso para tubos de distintas relaciones de Diámetro/Espesor ( $D/t$ ).

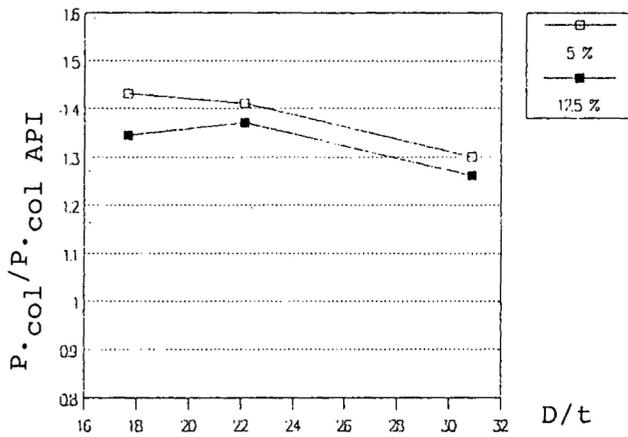


Figura 22. Efecto de la excentricidad (%) sobre la presión de colapso para tubos de distintas relaciones de Diámetro/Espesor ( $D/t$ ).

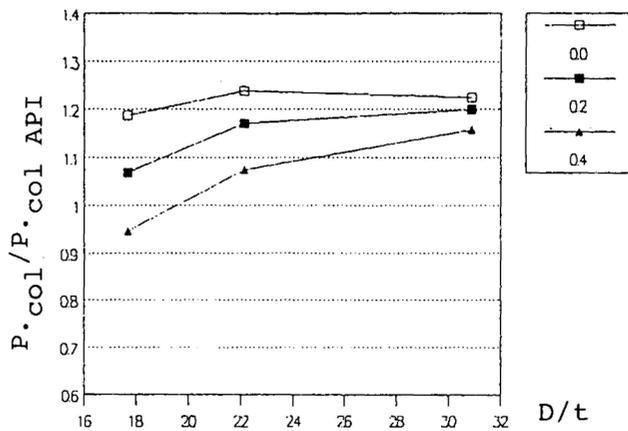


Figura 23. Efecto de las tensiones residuales ( $\sigma_{res}/\sigma_0$ ) sobre la presión de colapso para tubos de distintas relaciones de Diámetro/Espesor ( $D/t$ ).

En las Figuras 24 y 25 se muestran dos comportamientos típicos de las curvas presión exterior en función del desplazamiento radial que se obtienen al variar la relación diámetro externo/espesor ( $D/t$ ) de los tubos.

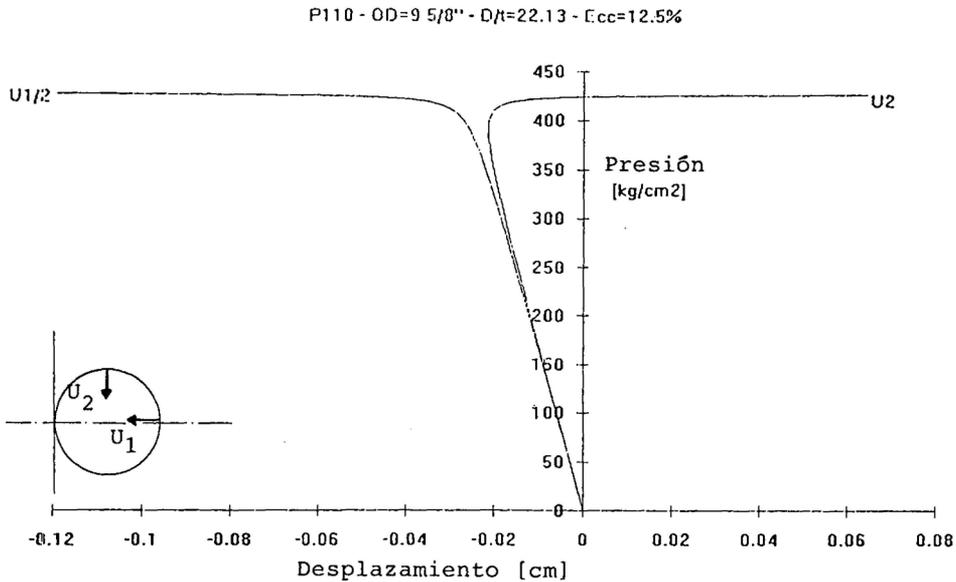


Figura 24. Curva presión exterior/desplazamiento radial para un tubo excéntrico de espesor moderado.

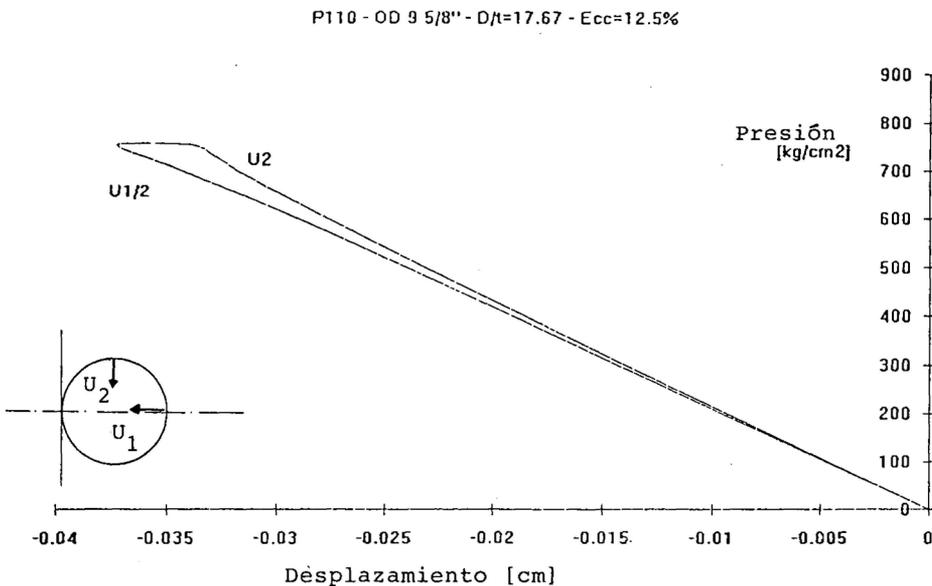


Figura 25. Curva presión exterior/desplazamiento radial para un tubo excéntrico de gran espesor.

## CONCLUSION

Los ejemplos brevemente presentados llevan a confirmar que el Método de Elementos Finitos es un valioso instrumento para el desarrollo y optimización de diversos procesos y productos en las industrias sidero-metalúrgicas.

Para lograr un trabajo exitoso en el modelado de procesos de fabricación y en el desarrollo de productos siderúrgicos es necesario el trabajo interdisciplinario en las áreas de:

- modelado numérico .
- ensayos de laboratorio.
- ensayos de planta.

y es necesario incorporar en los modelos de la Mecánica del Continuo las consideraciones microestructurales que provee la Metalurgia, de esta manera puede hablarse de modelos termo-mecánico-metalúrgicos.

## AGRADECIMIENTOS

Si bien este trabajo está centrado en los aspectos de modelado computacional debemos destacar que los resultados presentados incorporan el esfuerzo de otros investigadores del CINI y profesionales de las empresas industriales de la Organización Techint.

En particular queremos agradecer al Dr. Guillermo Fitzsimons, al Ing. Juan Carlos Gonzalez, al Dr. Ruben Herrera, al Ing. Daniel Johnson, al Dr. Carlos Pampillo, a la Ing. Teresa Perez y al Dr. Alberto Pignotti.

## REFERENCIAS

1. K.J. Bathe, "*Finite Element Procedures in Engineering Analysis*", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, (1982).
2. O.C. Zienkiewicz y R.L. Taylor, "*The Finite Element Method*", Fourth Edition, Mc Graw Hill Book Company, (1989).
3. E.N. Dvorkin y K.J. Bathe, "A Continuum Mechanics Based Four-Node Shell Elements for General Nonlinear Analysis", *Eng. Computations*, Vol. 1, pp. 77-88, (1984).
4. K.J. Bathe y E.N. Dvorkin, "A Four-Node Plate Bending Element Based on Mindlin/Reissner Plate Theory and a Mixed Interpolation", *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, Vol. 21, pp. 367-385, (1985).
5. K.J. Bathe y E.N. Dvorkin, "A Formulation for General Shell Elements - The Use of Mixed Interpolation of Tensorial Components", *Int. J. Numerical Methods in Eng.*, Vol. 22, pp. 697-722, (1986).
6. E.N. Dvorkin y S.I. Vassolo, "A Quadrilateral 2-D Finite Element Based on Mixed Interpolation of Tensorial Components", *Eng. Computations*, Vol. 6, pp. 217-224, (1989).
7. E.N. Dvorkin y A.P. Assanelli, "Elasto-Plastic Analysis Using a Quadrilateral 2-D Element Based on Mixed Interpolation of Tensorial Components", *Proc. Second Int. Conf. on*

- Computational Plasticity*, (Ed. D.R.J. Owen et al.), Pineridge Press, pp. 263-283, (1989).
8. B.M. Irons y A. Razzaque, "Experience with the Patch Test for Convergence of Finite Elements", *The Mathematical Foundations of the Finite Element Method with Applications to Partial Differential Equations*, (Ed. A.K. Aziz), Academic Press, (1972).
  9. ADINA Users Manual, ADINA R&D, Watertown, Massachusetts, U.S.A.
  10. E.N. Dvorkin, G. Fitzsimons y E. Posdena, "Estudio de fisuración central en barras redondas de colada continua", *Proceedings Primer Congreso de la Asociación Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, Río de Janeiro, Brasil, (1988).
  11. E.N. Dvorkin y M. Canga, "Thermomechanical Behavior of the Mold in SIDERCA Continuous Casting Machine CC3", *Informe CINI 1.20-190/90*, (1990).
  12. J.K. Brimacombe, "Continuous Casting of Steel Billets. Blooms and Slabs", *The Centre for Metallurgical Process Engineering*, The University of British Columbia, Canadá, (1987).
  13. E.N. Dvorkin, M.B. Goldschmit, J.C. Gonzalez y G. Torga, "Polvos Coladores. Modelo de la capa de polvo colador en la CC3 para barras de 205 mm. Polvos de bajo contenido de carbono", *Informe CINI 1.46-302/91*, (1991).
  14. E.N. Dvorkin y M.A. Cruchaga, "LACO 1 - Modelo térmico de las puntas del Perforador", *Informe CINI 1.19-173/90*, (1990).
  15. F.G. Rammerstorfer, D.F. Fischer, W. Müller, K.J. Bathe y M.D. Snyder, "On Thermo-Elastic-Plastic Analysis of Heat-Treatment Processes Including Creep and Phase Changes", *Computers & Structures*, Vol. 13, pp. 771-779, (1981).
  16. E.N. Dvorkin y F.M. Medina, "Finite Element Models for Analyzing the Straightening of Steel Seamless Tubes", *J. of Engineering for Industry*, ASME, Vol. 111, pp. 351-355, (1989).
  17. O.C. Zienkiewicz, P.C. Jain y E. Oñate, "Flow of Solids during Forming and Extrusion: Some Aspects of Numerical Solutions", *Int. J. Solids Structures*, Vol. 14, pp. 15-38, (1978).
  18. E. Thompson, "Use of Pseudo-Concentrations to follow Creeping Viscous Flows during Transient Analysis", *Int. J. of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 6, pp. 749-761, (1986).
  19. E. Thompson y R.E. Smelser, "Transient Analysis of Forming Operations by the Pseudo-Concentration Method", *Int. J. of Numerical Methods in Fluids*, Vol. 25, pp. 177-189, (1988).
  20. H.J. Antunez, "Análisis por Elementos Finitos del Conformado de Metales con Orientación a la Laminación de Tubos sin Costura", *Tesis Doctoral*, Universidad Nacional de Córdoba, (1990).
  21. H.J. Antunez, S.R. Idelsohn y E.N. Dvorkin, "Metal Forming Analysis by Fourier Series Expansion and further Uses of Pseudo-Concentrations", *Computers & Structures*, Vol. 44, pp. 435-451, (1992).
  22. E.G. Petöcz, "Modelado de Procesos de Conformado de Metales por el Método de los Elementos Finitos", *Tesis de Licenciatura en Ciencias Físicas*, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, (1991).
  23. E. Dvorkin y E. Petöcz, "On the Modelling of 2D Metal Forming Processes Using the Flow Formulation and the pseudo-concentration technique", eds. E.R.J. Owen et al, Pineridge Press, (1992).
  24. E.N. Dvorkin y M.E. Canga, "Incompressible Viscoplastic Flow Analysis Using a Quadrilateral 2D Element based on Mixed Interpolation of Tensorial Components", *Comm. in Appl. Num. Methods*, (en prensa) (1990).
  25. E.N. Dvorkin y A.P. Assanelli, "High Collapse Casing. Part I: Ovality Effect", *Informe*

- CINI 1.55-231/90*, (1990).
26. E.N. Dvorkin y A.P. Assanelli, "High Collapse Casing. Part II: Eccentricity Effect", *Informe CINI 1.55-249/90*, (1990).
  27. E.N. Dvorkin y A.P. Assanelli, "High Collapse Casing. Part III: Residual Stress Effect", *Informe CINI 1.55-314/91*, (1991).