

## COMPARACIÓN DE ENSAYOS A PLENA ESCALA Y MODELOS DE ELEMENTOS FINITOS EN LA CALIFICACIÓN DE UNIONES PARA LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

Andrea P. Assanelli, Rita G. Toscano y Daniel D. Johnson  
Centro de Investigación Industrial, FUDETEC  
Córdoba 320, Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

El proceso de calificación por ensayos a plena escala de uniones para la industria del petróleo (OCTG) es muy caro y prolongado. Para reducir el riesgo de repetir ensayos, así como para aumentar la comprensión de los resultados de los ensayos, en el CINI se adoptó la política de integrar fuertemente los modelos matemáticos (elementos finitos) con los ensayos a plena escala. En el presente trabajo presentamos un caso particular de esta integración, a través del cual mostramos cómo este procedimiento de trabajo permitió identificar posibles fuentes de problemas en los ensayos e introducir las correcciones de procedimiento y diseño necesarias.

### INTRODUCCIÓN

La calificación de uniones roscadas para productos tubulares de la industria del petróleo (OCTG) se hace tradicionalmente por ensayos a plena escala [1,2]. En estos ensayos una cantidad predeterminada de probetas, fabricadas en condiciones controladas para representar las características geométricas extremas del producto, son sometidas a secuencias de cargas que permiten decidir sobre su aptitud para un determinado nivel de servicio.

El ensayo considerado como más crítico es el de "sellabilidad". En él se verifica la estanqueidad de la unión bajo presión de gas ( $N_2$ ) tanto interna como externa, y combinada con esfuerzos axiales, de flexión y a temperaturas elevadas. En ensayos normales, las presiones de ensayo están en valores que oscilan entre el 80% y el 95% de la presión que produciría el inicio de fluencia en el interior del tubo. Para este ensayo los criterios de aceptación son muy estrictos. Se espera que las pérdidas observadas sean menores a  $0.1 \text{ cm}^3/15 \text{ min}$  de  $N_2$  a presión y temperatura ambiente [2].

El ensayo normalmente califica un solo producto de la línea de productos del fabricante (un modelo de unión de un diámetro, un espesor y un grado de acero particulares), y en algunos casos la calificación es válida solamente para el cliente que la solicita. Un fracaso durante una calificación puede significar, no solo la descalificación del producto con las pérdidas económicas involucradas, sino también un descrédito para la línea de productos y en última instancia para la compañía.

Por lo expuesto anteriormente desde 1992 en el CINI se ha integrado el uso de simulaciones por elementos finitos en el proceso de calificación de uniones [3]. Esta tendencia está siendo aceptada también por algunos usuarios [4,5], y se espera que en pocos años las normas internacionales comiencen a incluirlas.

Básicamente, se realiza una simulación previa a la fabricación de las probetas para prever el comportamiento en algunos casos geométricos extremos, que se espera encontrar durante el ensayo. Pasada esta etapa en forma satisfactoria, se realiza un pre-test a plena escala, nuevamente seleccionando los casos que se espera sean los más críticos. De encontrarse algún problema en esta etapa, se recurre nuevamente a los elementos finitos para, en primera instancia, determinar las causas de la falla, y luego para verificar las modificaciones (al procedimiento de ensayo o al diseño) propuestas. Finalmente pasado el pre-test se puede pasar a la calificación completa, que normalmente se realiza bajo el control de representantes de nivel internacional (witness) designados por el cliente.

En 1998 se encaró de esta forma la calificación de un tubo para aplicaciones de "tubing" en 4 ½" de diámetro externo. En el presente trabajo comentamos cómo la integración de elementos finitos con los ensayos a plena escala permitió superar los inconvenientes observados durante el pre-testing y mejorar el conocimiento sobre el comportamiento de la unión analizada.

### MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Los detalles de la formulación utilizada fueron presentados en detalle en las Refs [6,7]. Básicamente se requiere un alto grado de robustez de la formulación utilizada en el rango de problemas considerados [8,9]:

- 1) La formulación del elemento no debe incorporar factores de ajuste numéricos.
- 2) La formulación del elemento no debe contener modos rígidos espurios.
- 3) La formulación del elemento debe satisfacer el patch test de Irons.
- 4) La capacidad predictiva del elemento debe ser relativamente insensible a distorsiones del elemento así como a cambios en las propiedades del material.

Los requerimientos específicos del modelado de uniones para la industria del petróleo dictan los siguientes requerimientos adicionales:

- 5) La formulación del elemento debe poder representar problemas de pequeñas y grandes deformaciones.
- 6) La formulación del elemento debe ser capaz de representar localización plástica, con una mínima disipación numérica artificial.
- 7) Es importante utilizar formulaciones de la mayor capacidad predictiva posible, o sea que el elemento debe ser capaz de poder representar un estado de flexión constante. De esa forma con el mismo esfuerzo computacional se pueden obtener mejores resultados.

Para los análisis aquí presentados utilizamos el elemento QMITC de cuatro nodos. En [6-9] se muestra el cumplimiento de los requisitos arriba listados para este elemento.

### SIMULACIÓN PREVIA

A partir de los planos de fabricación de la unión se determinaron las condiciones de fabricación más críticas para un ensayo de sellabilidad. La Fig. 1 muestra la malla de elementos finitos utilizada. Para esa geometría se analizaron combinaciones de carga de presión interna y externa, bajo tracción y compresión, para una severidad de cargas máxima del 90% del inicio de fluencia. La Figura 2 indica la distribución de presiones de contacto en el sello de la unión para un caso de carga de tracción más presión interior. Puede observarse que toda la zona de sello está en contacto, y que las presiones de contacto promedio ( $>30.0$  kg/mm<sup>2</sup>) son muy superiores a la presión de gas que se pretende sellar (7.9 kg/mm<sup>2</sup>). Hay que destacar que hasta la fecha no existe un criterio absoluto que esté publicado en la literatura abierta para relacionar el patrón de presiones de contacto con la capacidad sellante de la unión. Por lo tanto los análisis de sellabilidad se hacen por comparación con otros casos para los que se conocen los resultados experimentales.

### PRE-ENSAYO A PLENA ESCALA

Durante el pre-ensayo a plena escala se observaron pérdidas muy severas para niveles de carga relativamente bajos en las primeras tres probetas. Dada la severidad de las pérdidas se detuvo el ensayo. Resultaba notoria (y preocupante) la gran discordancia entre los resultados del modelo de elementos finitos y los resultados de los ensayos. Rápidamente se descartó la posibilidad de errores en la fabricación de las probetas. Dado que los resultados de las predicciones de sellabilidad son de valor relativo nos concentramos en buscar elementos más objetivos que pudiesen explicar el fenómeno. El punto más importante que se detectó era la presencia de grandes deformaciones plásticas en la zona del sello de las uniones luego del ensayo. Los modelos de elementos finitos (Fig.3) preveían la aparición de bajísimas deformaciones plásticas, en algunos lugares del

sello, incapaces de provocar las deformaciones permanentes observadas en las probetas (aprox. 0.08mm). Resultaba bastante evidente que las deformaciones plásticas observadas en el sello eran lo suficientemente altas para que la sellabilidad de la unión resultase totalmente comprometida, como se había observado en los ensayos a plena escala.

### ANÁLISIS DE LA FALLA

Para buscar el origen de esta deformación se propuso instrumentar una probeta con strain gages en la zona del sello y en la zona de la rosca. La Figura 4 muestra la comparación entre los valores predichos por el modelo de elementos finitos y los valores medidos (deformaciones circunferenciales). Pueden observarse las grandes deformaciones en la zona del sello, así como una discrepancia importante en la zona de la rosca. Las deformaciones circunferenciales en la superficie externa son una función directa de la "interferencia" entre los conos que conforman la rosca. Los valores predichos por el modelo de elementos finitos coincidían muy bien con los valores que surgían de la medición de la probeta, por lo tanto debía haber otro agente que causaba el "hinchamiento" observado en la zona roscada, así como las deformaciones plásticas en la zona de sello.

Durante el ensamblado de las uniones roscadas se moja la superficie con una grasa de gran viscosidad que actúa como lubricante. La cantidad de grasa mínima y máxima a aplicar en una unión son recomendadas por el fabricante de la unión. El mecanismo de falla que se propuso era que por algún motivo una gran cantidad de grasa hubiera quedado atrapada entre los dientes de la unión roscada durante el ensamblaje, y la presión que se hubiese desarrollado, habría deformado plásticamente el sello (ver también Ref.3). Se realizó entonces un nuevo ensayo a plena escala, esta vez midiendo en diferentes puntos de la unión la presión de grasa. Para verificar si esta presión de grasa podía producir los resultados observados se volvió a realizar una simulación de elementos finitos. En este caso se agregó una distribución de presiones de grasa entre el tubo y la cupla deducida de las mediciones realizadas en el ensayo a plena escala. Los resultados de la Fig.5 muestran las nuevas comparaciones. Puede observarse el mejor ajuste a los resultados medidos. En la Fig. 6 puede observarse la deformación del sello en función de diferentes valores de presión de grasa.

De esta forma quedaba demostrado que el origen de la falla en el ensayo de sellabilidad era la deformación plástica en la zona del pin producida por un exceso de presión de grasa durante el ensamblaje de la conexión.

### IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS

A partir de las observaciones anteriores se revisó la cantidad de grasa necesaria para el ensayo a plena escala. Además se instituyó que, previamente a cualquier ensayo de calificación, se debe medir la presión de grasa que se desarrolla durante el ensamblaje.

### CONCLUSIONES

La integración de los elementos finitos en el proceso de calificación de uniones es esencial en un proceso moderno de calificación de uniones roscadas para la industria del petróleo. Es fundamental además que la formulación de elementos finitos cumpla con criterios de confiabilidad, que aseguran la calidad de los resultados numéricos.

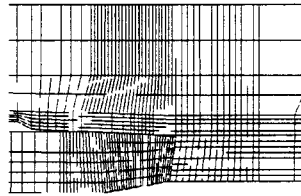
### REFERENCIAS

- [1] API Recommended Practice 5C5, *Recommended practice for evaluation procedures for casing and tubing connections*, 1990.
- [2] ISO/DIS 13679, *Petroleum and natural gas industries-Testing procedures for casing and tubing connections*, Draft International Standard, 1999.
- [3] Assanelli, A.P. y Dvorkin, E.N. *Finite element models of OCTG threaded connections*, Comput. & Struct., 47, 725-734, 1993.

- [4] Hilbert, L.B. y Kalil, I.A. *Evaluation of premium threaded connections using finite element analysis and full scale testing*, IADC/SPE Paper 23904, 1992.
- [5] Cernocky, E.P. Valigura, G.A. Scholibo, Menchaca, J. Burres, C. y Larson, L. *A standardized approach to finite element analysis of casing-tubing connections to establish relative sealing performance as a function of design geometry, machining tolerances, and applied loads*, Computational Mechanics, new trends and applications, (Eds. E. Oñate and S. Idelshon), CIMNE, Barcelona, 1998.
- [6] Dvorkin E.N. y Vassolo, S.I., *A Quadrilateral 2D finite element based on mixed interpolation of tensorial components*, Engng. Comput., 6, 217-224, 1989.
- [7] Dvorkin, E. N. y Assanelli, A. P., *Elasto-plastic analysis using a quadrilateral 2-D element based on mixed interpolation of tensorial components*, en Computational Plasticity (Ed. D.R.J. Owen), pp. 263-283, Pineridge Press, Swansea, 1989.
- [8] Dvorkin, E. N. Assanelli, A.P. y Toscano, R.G., *Performance of the QMITC element in two-dimensional elasto-plastic analyses*, Comput. & Struct., 58, 1099-1129, 1996.
- [9] Assanelli, A.P. y Dvorkin, E.N., *Selection of an adequate finite element formulation for modeling OCTG connections*, in Computational Mechanics, new trends and applications, (Eds. E. Oñate and S. Idelshon), CIMNE, Barcelona, (1998)



a) detalle de la zona roscada



b) detalle de la zona de sello

Figura 1: Malla de elementos finitos

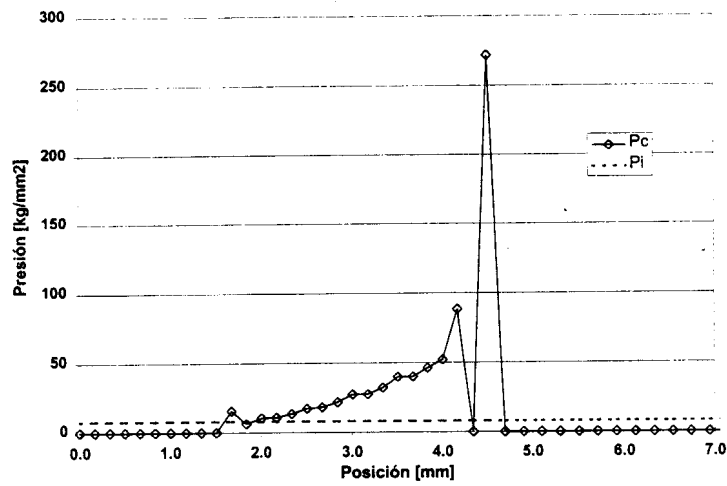


Figura 2: Presiones de contacto predichas

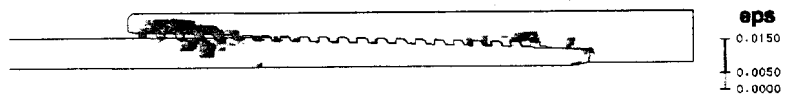


Figura 3: Deformaciones plásticas equivalentes

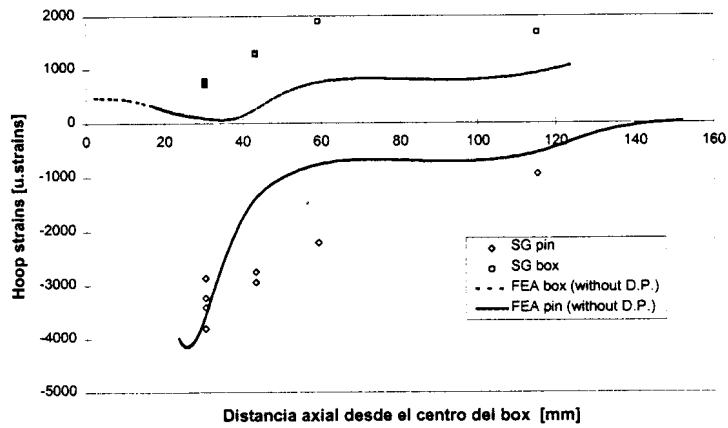


Figura 4: Deformaciones en la superficie del modelo

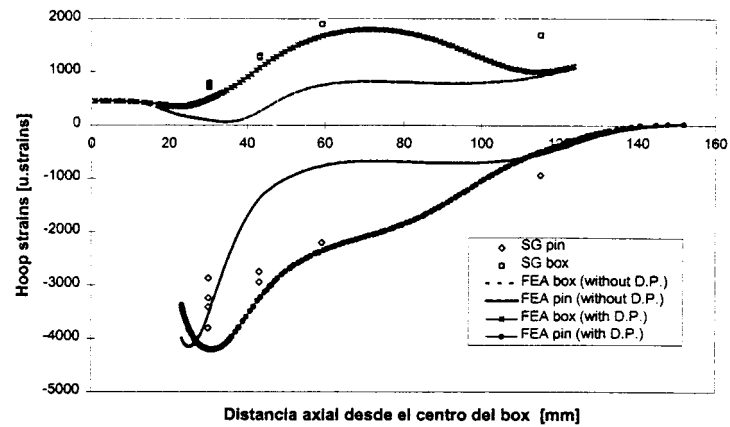


Figura 5: Deformaciones en la superficie del modelo

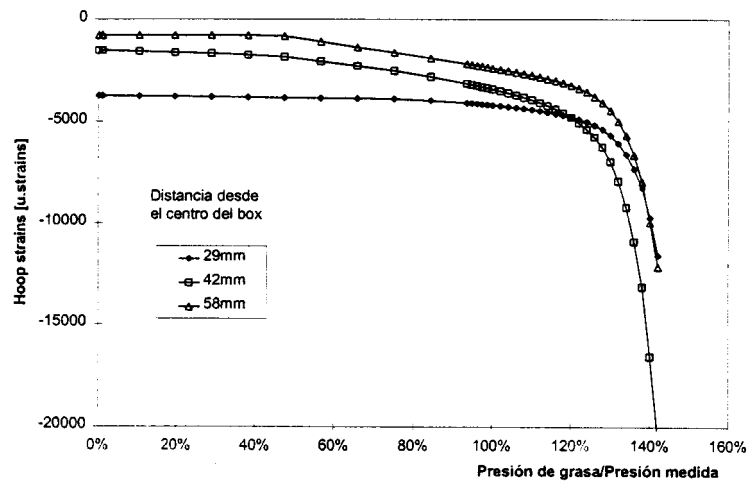


Figura 6: Deformaciones plásticas en la nariz del pin.