

# ANÁLISIS NUMÉRICO NO-LINEAL DE TUBOS DE ACERO RELLENOS DE HORMIGÓN

Leonardo J. Cocco<sup>1</sup>, Guillermo M. Gerbaudo<sup>1</sup>, Miguel E. Ruiz<sup>1</sup> y Carlos A. Prato<sup>2</sup>

**Palabras clave:** Tubos de Acero Rellenos de Hormigón, Grandes Deformaciones, Defensa contra Impacto de Embarcaciones.

Resumen: Este trabajo presenta un análisis no lineal de elementos finitos de tubos de acero rellenos de hormigón que constituyen los pilotes de las defensas de pilas de puente contra impacto de embarcaciones. Se trata de elementos estructurales sometidos a cargas laterales crecientes, cuyas deformaciones elastoplásticas durante el proceso de carga permiten absorber la energía cinética de la embarcación. El objeto del análisis es evaluar las hipótesis de diseño y para predecir el comportamiento del pilote sometido a grandes deformaciones y desplazamientos. Se analiza un pilote aislado compuesto de un tubo de acero estructural relleno de hormigón restringido lateralmente por suelos. Si bien el proceso es de naturaleza esencialmente dinámico, el análisis realizado es estático ya que las fuerzas de inercia asociadas a la masa del tubo son pequeñas frente a la masa y rigidez de la embarcación. La excitación consiste en una carga horizontal gradualmente creciente aplicada a la cabeza del pilote de manera estática. Las características principales de este análisis no lineal son el comportamiento mecánico de la interfaz acero-hormigón, el efecto del confinamiento que la camisa de acero ejerce sobre el hormigón de relleno, el pandeo local y la estricción de la camisa de acero, la resistencia lateral del suelo y la combinación de todos estos efectos sobre la respuesta mecánica total de los pilotes. El análisis se realiza con los modelos y las capacidades computacionales del programa ABAQUS. Los resultados del análisis se comparan con los resultados obtenidos con elementos no lineales simplificados tipo viga y con ensayos de modelos a escala reducida. Finalmente, a la luz de los resultados numéricos alcanzados, se formulan algunas conclusiones sobre los méritos e inconvenientes encontrados con la aplicación de ABAQUS para analizar esta clase de problemas.

## NON-LINEAR NUMERICAL ANALYSIS OF CONCRETE-FILLED STEEL TUBES

**Keywords:** Concrete-filled steel tubes, Large deflections, Ship impact defenses.

Abstract: This paper presents non-linear finite element analyses of fender bridge piles for defense against ship impact. The fender piles consist of steel pipes filled with reinforced concrete. The piles are intended to dissipate the kinetic energy from the ship through large inelastic deformations during impact. The aim of the paper is to evaluate the design hypotheses of the piles and to predict the behavior of the pile subjected to large deflections and strains. The problem analyzed is a single concrete-filled steel tube pile laterally supported by soil. Although the problem is essentially dynamic in nature the inertia forces associated with the mass of the pile and surrounding soil are small compared to the mass and rigidity of the ship. The external force is considered as a static horizontal load of increasing magnitude applied to the head of the pile. The non-linear analyses include modeling of the mechanical behavior of the steel-concrete interface, the confinement effects of the steel tube on the in-filled concrete, local buckling and thickness reduction of the tube

---

<sup>1</sup> Estudiantes becarios, Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba Casilla de Correo 916, Córdoba 5000, Argentina. TE: 54-(0351)-4334144.

<sup>2</sup> Profesor Titular Plenario, Departamento de Estructuras, FCEFyN, Universidad Nacional de Córdoba Casilla de Correo 916, Córdoba 5000, Argentina. TE: 54-(0351)-4334144.

wall, and the lateral support of the soil. All these effects are combined in the model in an attempt to capture the observed overall mechanical behavior of the piles during laboratory and scale field tests. The analyses were carried out with ABAQUS. Comparison of the results with laboratory and reduced- scale field tests are presented and discussed. Finally some conclusions concerning the advantages and shortcomings of ABAQUS to analyze this class of problems are presented.

## INTRODUCCIÓN

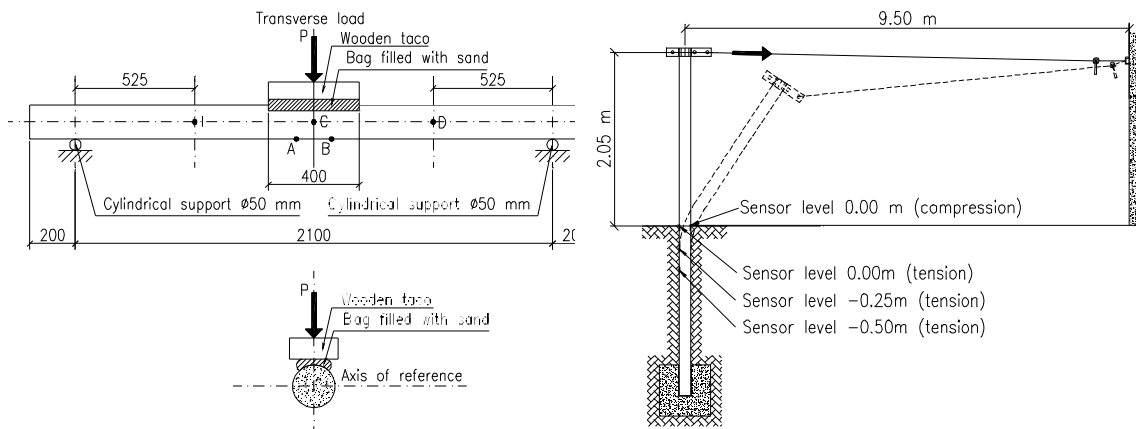
El diseño de estructuras de defensas contra impacto de embarcaciones puede materializarse con estructuras relativamente rígidas de limitada capacidad de deformación, o alternativamente con estructuras provistas de capacidad de sufrir grandes deformaciones, como es el caso de plataformas de hormigón soportadas por pilotes.

Las circunstancias propias del diseño de estructuras de suficiente capacidad de deformación llevan a la necesidad de realizar análisis numéricos y/o ensayos de escala reducida para garantizar la suficiencia del diseño. En el caso particular de los pilotes aquí considerados, las grandes deformaciones específicas del relleno de hormigón y de la camisa externa de acero, los grandes desplazamientos y rotaciones requeridas para absorber energía externa, y la posibilidad de deslizamiento entre el tubo de acero y el relleno de hormigón son los requisitos principales para un análisis numérico confiable.

Los resultados de estudios experimentales referentes al comportamiento mecánico de tubos de acero rellenos de hormigón están actualmente disponibles para el caso combinado de flexo-compresión axial donde el modo de falla es controlado por las tensiones de compresión (Prior et al., 1989; Harbin et al., 1992 y O'Shea et al., 2000). Bajo estas condiciones, la curva carga vs. desplazamiento lateral exhibe un pico definido seguido por una capacidad de carga residual post-pandeo. En contraste con dicho caso, cuando se trata de cargas exteriores cuyas sollicitaciones son predominantemente de flexión como en los casos aquí estudiados, los estudios experimentales indican que la curva desplazamiento lateral vs. carga aumenta en forma progresiva hasta que ocurre la falla debido a la rotura de la cubierta de acero en la zona de tracción.

Como parte previa del mismo estudio que aquí se presenta, Saul et al. (2001) han analizado el comportamiento de pilotes bajo cargas laterales por medio de elementos compuestos no lineales tipo viga, encontrando buena correspondencia con los resultados de ensayos en escala reducida. Una limitación propia de este tipo de elementos es que no pueden representar en detalle los siguientes aspectos del comportamiento estructural de estos pilotes: i) La influencia del deslizamiento entre la camisa de acero y el hormigón; ii) La fisuración del hormigón asociado con las tensiones combinadas de tracción y corte debido a la flexión; iii) El pandeo local de la camisa de acero en la parte comprimida de la sección transversal; iv) El efecto que el confinamiento de la camisa de acero produce en la capacidad de carga del hormigón, y v) El mecanismo de la falla del pilote en flexión es controlado por las tensiones longitudinales de tracción en la camisa de acero debido a la flexión, más bien que por las incipientes deformaciones de pandeo local.

El objetivo del presente análisis con elementos finitos es determinar las características de carga-desplazamiento transversal de los tubos de acero rellenos de hormigón que representan en la escala 1:15 los pilotes diseñados para absorber la energía cinética de impactos de embarcaciones. Los ensayos de laboratorio y de campo de estos tubos están disponibles para realizar la comparación con los resultados del presente estudio numérico.



**Figura 1.a: Esquema del ensayo de laboratorio.****Figura 1.b: Esquema del ensayo del campo.**

Las Figura 1.a y 1.b presentan un esquema de las dimensiones generales, las condiciones de apoyo y la carga exterior de los tubos de acero rellenos de hormigón analizados para las condiciones existentes en los ensayos de laboratorio y de campo. El hormigón de relleno tiene 34 MPa de resistencia a compresión, y el acero del tubo una tensión de fluencia de 360 MPa y 600 MPa de tensión de rotura.

El objetivo de este trabajo es evaluar las capacidades de modelación de ABAQUS para representar el comportamiento de los tubos, desde el rango geométrico lineal elástico hasta la carga última con grandes desplazamientos, rotaciones y deformaciones. El propósito del análisis es discutir las alternativas disponibles en ABAQUS para modelar las características principales de los pilotes, es decir para representar la respuesta de los elementos de hormigón sometidos a cargas de flexión, la influencia del deslizamiento en la interfaz entre el hormigón y el tubo, el comportamiento del tubo de acero en el rango de endurecimiento por deformación hasta la estricción y las condiciones no lineales del apoyo proporcionado por el suelo circundante en el caso de los ensayos de campo. Se ponen a prueba las opciones disponibles de ABAQUS para ocuparse de estas características, se discuten la convergencia numérica y exactitud, en términos de su capacidad de aproximar el comportamiento observado en los ensayos, reconociendo que en contraste con la mayoría de las otras estructuras, su diseño no se basa en la capacidad de carga sino en la capacidad de absorber la energía del impacto.

## MODELOS CONSTITUTIVOS DEL HORMIGÓN

ABAQUS tiene disponible varias opciones para representar el comportamiento inelástico de materiales friccionales como el hormigón. Aunque es frecuente utilizar las superficies de fluencia plástica de Mohr-Coulomb y de Drucker-Prager que proporcionan una aproximación a su superficie en el octante de compresión en el espacio de tensiones principales, se sabe que tienen defectos significativos en el resto de los octantes. En particular, el ángulo de fricción del hormigón, como resultado de la observación del plano de falla en los ensayos de compresión simple, se encuentra en un rango entre 30°-35°, mientras que la relación entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión del hormigón (0,08 a 0,10) en ambos modelos depende solamente del valor del ángulo de fricción. Para el modelo de Mohr-Coulomb, se requiere un ángulo fricción artificial más elevado, cercano a 55°, para lograr una relación de resistencias acorde con la realidad, mientras que para el modelo de Drucker-Prager, para un ángulo de fricción de 90° la relación entre las resistencias es aproximadamente igual a 3.

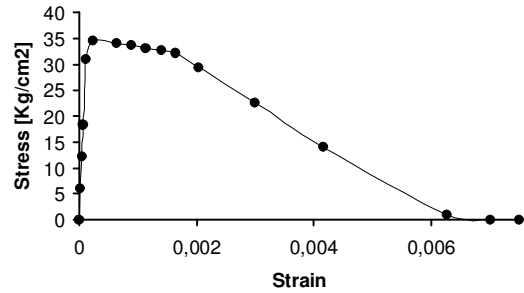
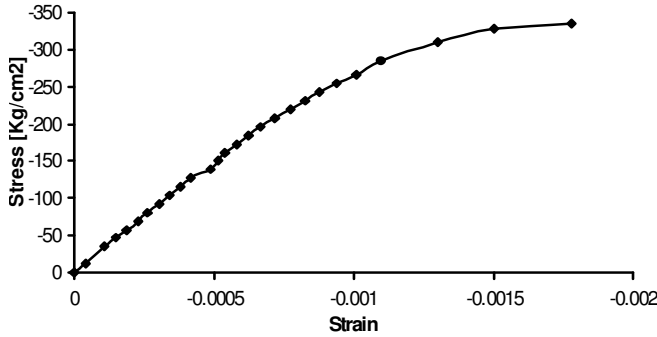
Para ambos modelos constitutivos ABAQUS permite introducir una curva de endurecimiento por deformación. Para el modelo de Drucker-Prager, dicha curva representa la evolución de la relación uniaxial entre tensiones y deformaciones (en compresión) más allá del límite elástico, o la curva de ablandamiento (en tracción) para deformaciones más grandes que la deformación elástica en la tensión de tracción máxima. Para el modelo de Mohr-Coulomb, la curva para definir el endurecimiento es la que relaciona el parámetro de cohesión del material con las deformaciones plásticas.

Un defecto bien conocido de los modelos de Mohr-Coulomb y de Drucker-Prager para el hormigón es que la superficie de fluencia se debe sustituir por un modelo de Rankine para el octante de tracción; de lo contrario, no se alcanza la superficie de falla y en el análisis se pueden generar tensiones de tracción artificialmente altas. Por lo tanto, el hecho de utilizar el mismo modelo constitutivo para todos los elementos que representan el comportamiento del hormigón dentro del tubo de acero sometido a flexión, con los sectores bajo predominante compresión uniaxial, tracción uniaxial o corte puro, es de esperar que genere algunas dificultades para dar seguimiento al fenómeno. Para reducir el impacto de estas limitaciones del modelo constitutivo para el hormigón, se consideraron las siguientes alternativas:

- i) Modelo de Drucker-Prager, con la curva de endurecimiento definida de ensayos de compresión según lo representado en la figura 2. Se adoptaron ángulos artificiales elevados de fricción y dilatancia, 55° y 35° respectivamente, junto con un módulo elástico instantáneo inicial según la expresión  $E_c$  [MPa] =  $6010 \sqrt{f'_c}$ , donde  $f'_c$  es la resistencia a compresión del hormigón en [MPa], y una relación de Poisson de 0,2.
- ii) Modelo de Drucker-Prager con los mismos ángulos de fricción y dilatancia y los parámetros elásticos que en i), junto con una curva de ablandamiento en tracción según lo definido en la Figura 3.
- iii) Modelo tipo “Concrete” según lo definido por ABAQUS.
- iv) Modelo de Drucker-Prager como en i) con ángulos realistas de fricción y dilatancia de 35° y 13°, respectivamente. Cuando la tensión de tracción longitudinal del hormigón alcanza la resistencia a tracción

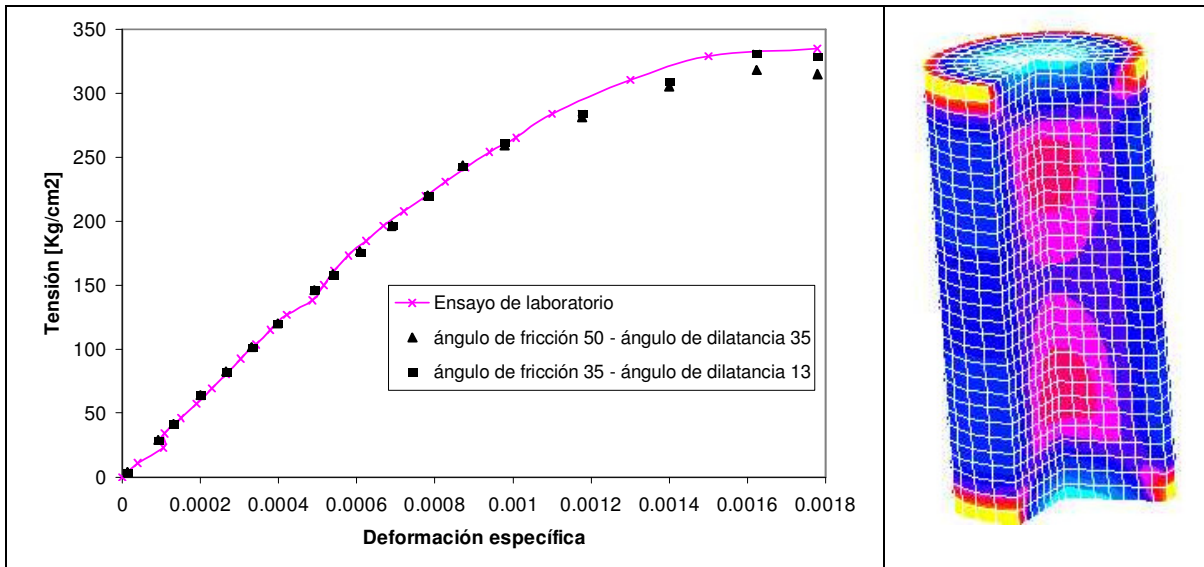
el elemento se elimina de la malla.

Como evaluación preliminar de las distintas alternativas, las hipótesis i), ii) e iii) fueron aplicadas para simular el comportamiento de una probeta cilíndrica estándar durante un ensayo de compresión simple con la malla de EF indicada en la Figura 4.b. Según se observa en las Figuras 4a y 5, la alternativa i) aproxima muy bien los resultados experimentales, mientras que la alternativa ii) subestima mucho la capacidad de carga en el rango no lineal. Este resultado no sorprende ya que según lo precisado anteriormente, la relación resistencias implícita en Drucker-Prager no permite una relación de resistencias (compresión/tracción) mayor de 3.



**Figura 2: Curva de endurecimiento definida a partir del ensayo de compresión.**

**Figura 3: Curva de ablandamiento en tracción.**



**Figura 4: a. Resultado del modelo del ensayo de compresión Constitutiva: Endurecimiento en compresión.**

**b. Modelo de E.F.**

La evaluación final de las alternativas se presenta y se discute más adelante a partir de la comparación de las predicciones numéricas para el modelo del pilote completo con los resultados experimentales de ensayos de laboratorio y de campo.

## MODELO DE LA INTERFAZ ENTRE EL HORMIGÓN Y EL ACERO

Durante la deformación inelástica del pilote se espera que la camisa de acero experimente deformaciones que son más de diez veces la deformación última de un hormigón no confinado en compresión. Por lo tanto, se anticipa que ocurrirán deslizamientos en la interfaz acero-hormigón durante el proceso de carga. En el presente estudio se consideran dos condiciones diferentes de la superficie de contacto acero/hormigón: con y sin deslizamiento relativo. En el último caso, se permitió el deslizamiento y la separación de las superficies. El modelo constitutivo para el esfuerzo de corte en la interfaz fue de fricción seca pura, con un coeficiente de fricción en el intervalo de 0,2 a 0,6; ABAQUS no tiene una opción para representar una fuerza de corte inicial agregada al modelo de fricción seca. El modelo constitutivo para la tensión normal en la interfaz es rígido en compresión y no tiene rigidez en tracción.

El efecto de los modelos alternativos para la interfaz en el comportamiento global del pilote no resultó muy significativo, y afectó la curva de carga-desplazamiento transversal para pilote solamente en el inicio de la fluencia del acero, pero fue menos sensible para mayores deformaciones. Este aspecto se analiza en mayor detalle más adelante.

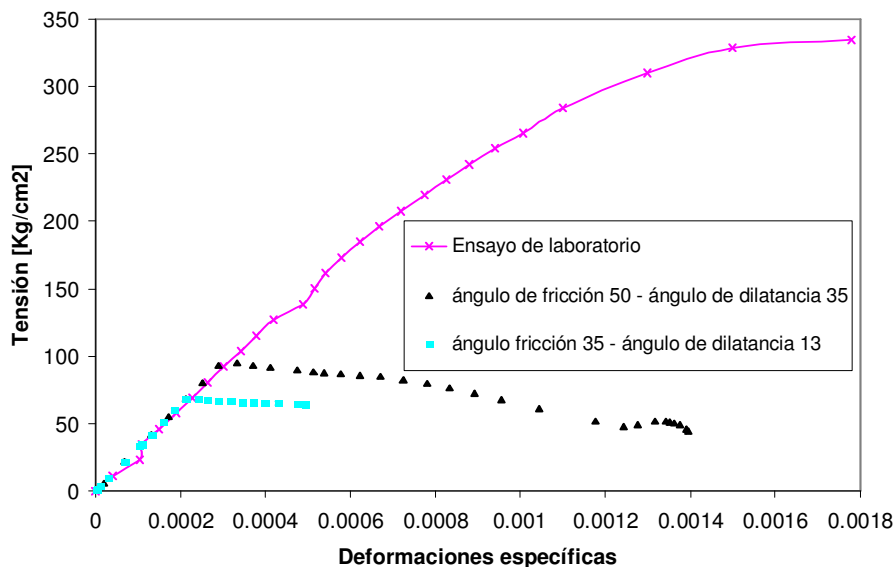
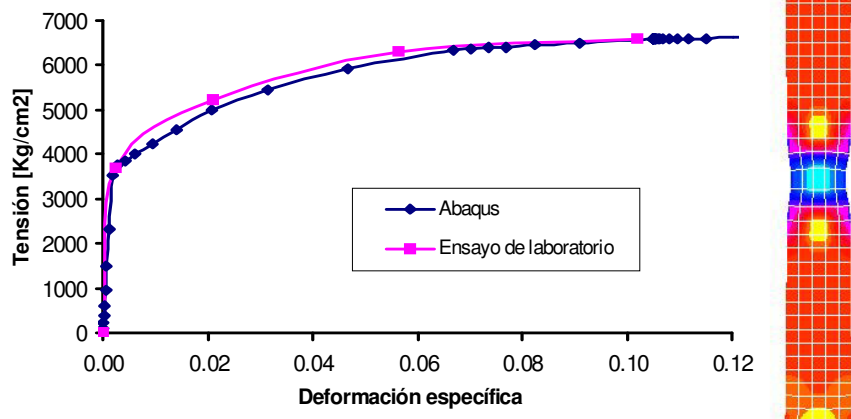


Figura 5: Resultado del modelo del ensayo de compresión-Constitutiva: Ablandamiento en tracción.

## MODELO DE LA CAMISA DE ACERO

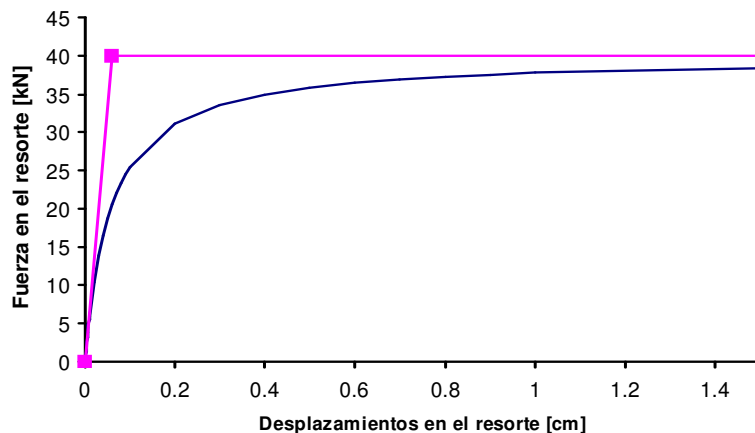
El modelo constitutivo adoptado para la camisa de acero se basó en la superficie de fluencia de Von Mises con la curva de endurecimiento según el ensayo de tracción simple mostrado en la Figura 6. El modelo fue verificado modelando el ensayo de tracción con desplazamientos impuestos en uno de sus extremos hasta que ocurrió la estricción de la probeta, según lo que se muestra en la Figura 6. La evaluación final del modelo para la camisa de acero estará basada en los resultados para el pilote completo.



**Figura 6: Resultado del modelo del ensayo de tracción de la probeta de acero.**

### MODELO DEL SUELO LATERAL

El apoyo lateral del suelo fue modelado por medio de resortes con un comportamiento carga-desplazamiento hiperbólico, distribuidos sobre el lado pasivo de la superficie de contacto de la camisa de acero y el suelo circundante. La rigidez inicial del suelo fue definida en términos de la tensión efectiva del suelo en el ensayo de campo de un modelo del pilote, y la tensión máxima (asintótica) fue asociada a la resistencia pasiva del suelo.



**Figura 7: Curva carga desplazamiento para un resorte del suelo.**

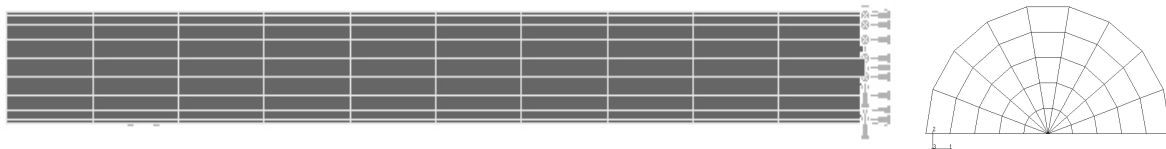
La Figura 7 muestra una curva típica de carga-desplazamiento para un resorte del suelo por unidad de área de la superficie de contacto. La tensión efectiva del suelo circundante en el ensayo de escala reducida fue causada por una presión externa igual a 40 KPa aplicada a través de unos tensores pretensados verticales introducidos para simular la presión de confinamiento del suelo que actúa en los pilotes a escala real. La tensión vertical del suelo fue asumida constante en una capa superior de espesor igual a 5 veces el diámetro del pilote. La fuerza asintótica del resorte se determinó en base a la resistencia pasiva del suelo contra el pilote, considerando el efecto 2D por medio de un modelo ad-hoc del suelo con el programa PLAXIS. La resistencia pasiva del suelo se asoció a la tensión de pretensión vertical aplicada al suelo multiplicando por un coeficiente de empuje pasivo  $k_p = 7$  que incluye el efecto 2D del pilote.

Un defecto de la representación con resortes del suelo circundante es que supone que los resortes siguen siendo paralelos a su orientación inicial durante el desarrollo de las deformaciones del tubo. Esta hipótesis debe ser revisada para grandes desplazamientos y rotaciones tales como las que se producen durante los ensayos del modelo de escala reducida en el campo.

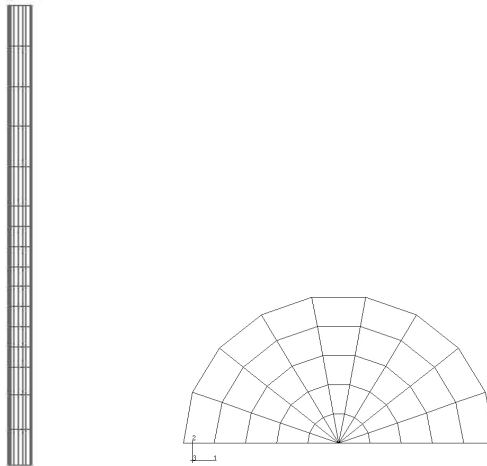
## MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DEL PILOTE

Se desarrollaron los modelos de EF de los pilotes para las dos condiciones de apoyo diferentes mostradas en la Figura 1: Caso I, con la configuración de una viga simplemente apoyada -Figura 1a- correspondiente a los ensayos de laboratorio realizados por medio de una máquina de ensayo hidráulica; y el Caso II, -Figura 1b-, correspondiente al ensayo de campo del pilote que actúa como voladizo enterrado parcialmente en arena y cargado horizontalmente por medio de un cable. Las dimensiones de la sección transversal y las características de los materiales son idénticas para ambos casos, a excepción de las diferentes condiciones de apoyo, de los dispositivos de carga y de la longitud total del pilote.

Las Figuras 8 y 9 muestran la disposición general de los modelos de EF para ambos casos. La camisa de acero se representó con elementos sólidos de 8 nudos (C3D8R) y elementos de cáscara de 4 nudos (S4R) sobre los mismos nudos. Esta duplicación de trabajo tuvo por objeto comprobar la capacidad de ambos modelos de representar no sólo la curva de la carga-desplazamiento sino también de capturar la estricción de la camisa de acero observada durante los ensayos de laboratorio en el momento de la falla. Los elementos de hormigón se modelaron también con ladrillos de 8 nudos definidos en coordenadas polares, a excepción de los elementos sólidos de 6 nudos en el centro del cilindro. En el modelo del caso a) se aprovecharon de los dos planos de la simetría, mientras que en el del caso b) se usó sólo uno de dichos planos.



**Figura 8: Modelo de E.F. para el ensayo de laboratorio.**



**Figura 9: Modelo de E.F. para el ensayo de campo.**

Las dimensiones de la cáscara y de los elementos “bloque” (“brick”) fueron asignadas de acuerdo con un compromiso entre la exactitud y el esfuerzo de tiempo computacional requerido.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

### Caso 1

La Figura 10 muestra la curva carga-desplazamiento lateral de la sección del tramo central obtenida con los modelos constitutivos para el hormigón i) a iv), no permitiendo ningún deslizamiento entre el hormigón y la camisa de acero.

Las predicciones basadas en la hipótesis i) estiman una estructura considerablemente más rígida que la que fue medida en los ensayos, y tensiones de tracción altas poco realistas, según lo mostrado en la Figura 11 para ángulos de fricción de  $55^\circ$  y de  $30^\circ$ .

Como variante de esta hipótesis, se introdujo una superficie de fluencia hiperbólica en el octante de tracción con el fin de mejorar la representación para las tensiones de tracción. Aunque este objetivo fue alcanzado, el programa dejó de converger al alcanzar una carga aproximadamente de 0,75 de la carga última desarrollada en los ensayos.

Los resultados de la hipótesis ii) mostrados en la Figura 12 indican una buena aproximación del desplazamiento transversal de la sección del tramo central con respecto a los ensayos de laboratorio. La Figura 12 también muestra el efecto de permitir que el hormigón se deslice con respecto al acero en el comportamiento estructural global expresado con el desplazamiento de la sección transversal del tramo central. Puede observarse que los dos resultados coinciden, excepto en la etapa inicial de la parte no lineal de la respuesta asociada al inicio de la fluencia del acero en la que el deslizamiento entre los dos materiales resulta en una curva carga-desplazamiento algo más baja. El efecto del deslizamiento es mucho más sensible al comparar las tensiones de compresión máximas del hormigón para ambas condiciones según se muestra en la Figura 13 para diversos valores del coeficiente de fricción en la interfaz.

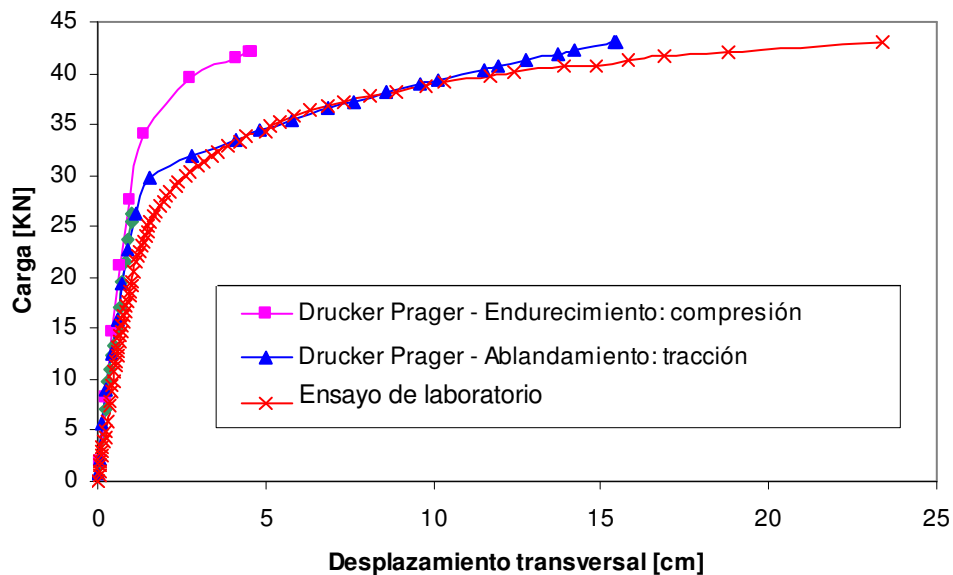
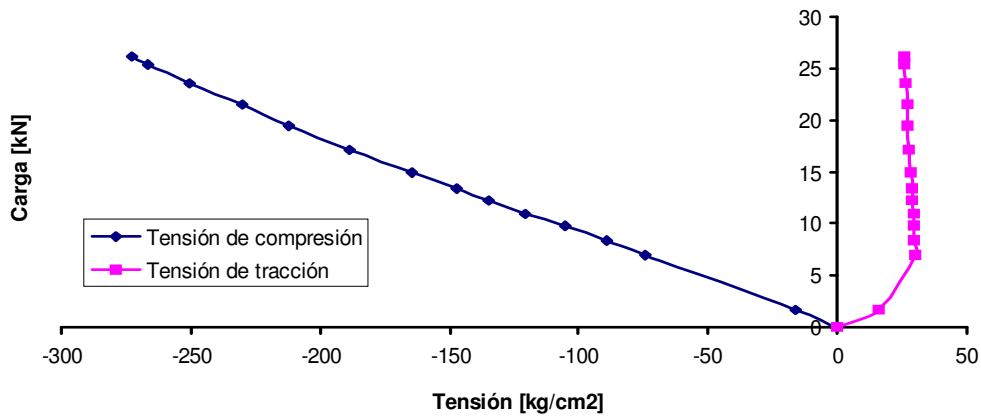


Figura 10: Curva carga-desplazamiento de la sección del centro del pilote.

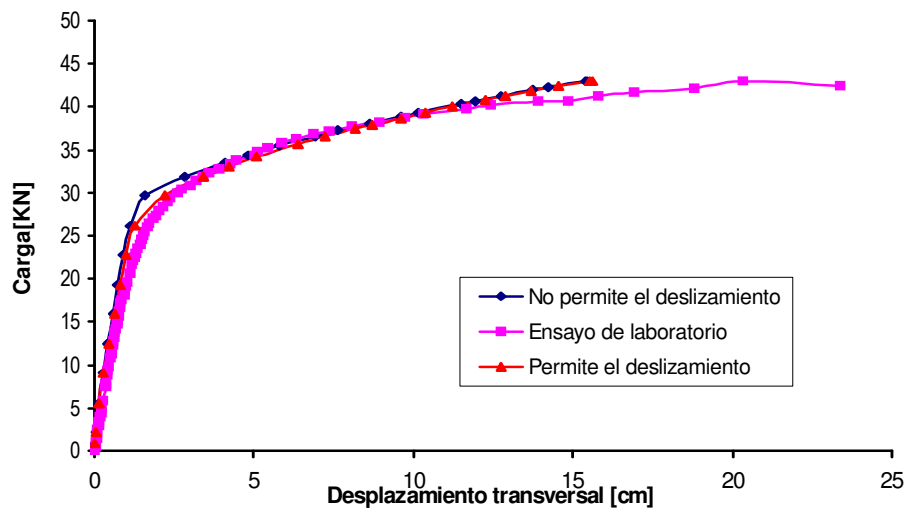


**Figura 11: Curva tensiones en el hormigón – carga.**

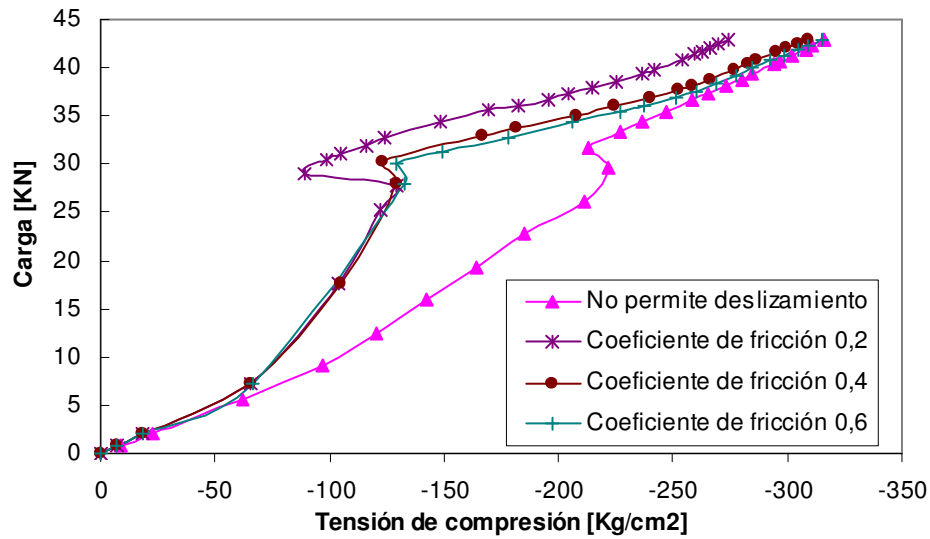
### Caso II

Los resortes no lineales que representan la reacción del suelo se aplicaron en cuatro nudos en cada una de las seis primeras filas en profundidad desde la superficie del terreno según se muestra en la Figura 14. Los resortes fueron definidos para representar la componente normal de la reacción del suelo y permanecieron horizontales a través del proceso de carga, mientras que la componente tangencial de la reacción del suelo se despreció.

La pérdida de precisión que surge de despreciar la reacción tangencial no es demasiado importante; sin embargo, la componente normal de la reacción tiene un cambio apreciable en la dirección para las etapas avanzadas del ensayo. Una situación similar ocurre con la carga externa aplicada al pilote en los ensayos, que se transmitió a la cabeza del pilote a través de un cable unido a un punto fijo situado a una distancia de 9,5 m del pilote. Aunque se reconoce que ABAQUS tiene opciones incorporadas para representar estos efectos no lineales de origen geométrico, en el análisis precedente se decidió, para tener en cuenta ambas situaciones, aplicar en los nudos del contacto suelo-pilote (con los resortes) una fuerza correctiva vertical proporcional a la reacción del suelo y a la rotación real del pilote. Se le dio un tratamiento similar al nudo de incidencia del cable en el pilote.



**Figura 12: Curva desplazamiento transversal-carga para la sección del centro del pilote.**

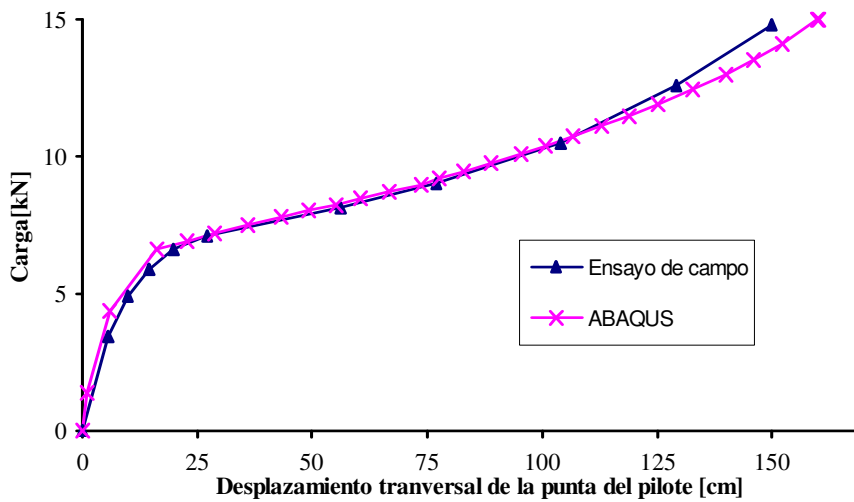


**Figura 13: Curva tensión de compresión-Carga.**



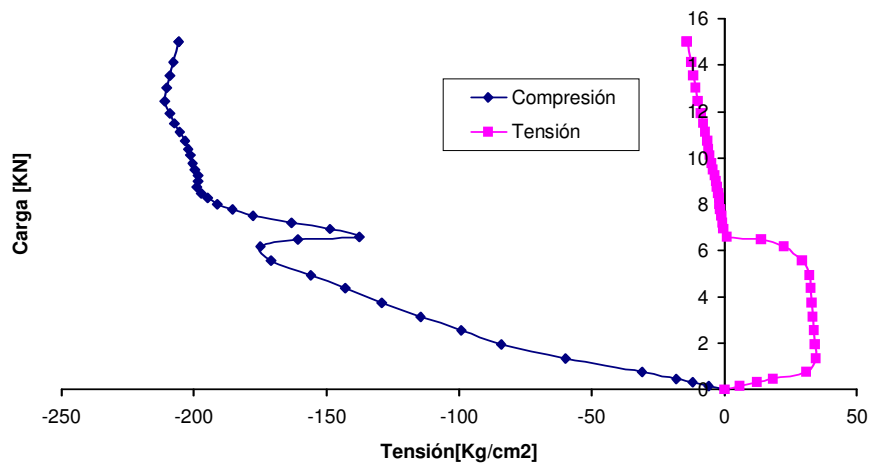
**Figura 14: Modelo de E.F. para el ensayo de campo.**

La Figura 15 presenta una comparación de la curva carga-desplazamiento obtenida con el modelo de EF con la medida en el ensayo, incluyendo la componente vertical correctiva de la carga externa y de la reacción del suelo conforme al párrafo precedente. El modelo constitutivo del hormigón usado en el análisis corresponde a la superficie de Drucker-Prager definida en tracción, mencionada anteriormente como alternativa ii), el deslizamiento entre el hormigón y el acero se permitió con un coeficiente de fricción igual a 0,6, la curva carga-desplazamiento del resorte del suelo de la Figura 7, y la superficie de fluencia de Von Mises con la curva de endurecimiento de la Figura 6 para la camisa de acero.

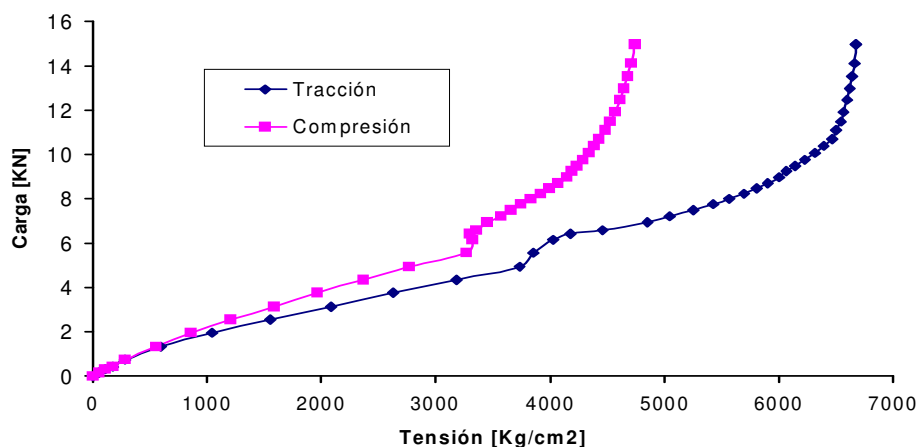


**Figura 15: Curva desplazamiento transversal-carga.**

Las Figuras 16a y 16b. muestran la evolución de las tensiones en el hormigón en la sección crítica del pilote, situada aproximadamente a dos veces el diámetro del pilote por debajo de la superficie del suelo, y las tensiones en la camisa de acero en la misma sección, ambas como función de la carga externa aplicada.



**Figura 16.a: Curva tensión en el hormigón-carga.**



**Figura 16.b: Curva tensión en el acero-Carga.**

## CONCLUSIONES

El análisis numérico realizado del comportamiento no lineal geométrico y material de tubos de acero rellenos de hormigón utilizando el programa ABAQUS permite representar satisfactoriamente los ensayos realizados en laboratorio y en el campo bajo ciertas restricciones en la selección de parámetros de los materiales, a saber:

- El análisis numérico del comportamiento de elementos de hormigón en los que predominan las tensiones de compresión, tales como una probeta de ensayo estándar para determinar la resistencia a compresión del hormigón, logró una excelente correspondencia entre las predicciones del modelo numérico y los resultados experimentales de laboratorio en todo el desarrollo del proceso de carga hasta la rotura.
- Para los elementos estructurales en los que predomina el comportamiento en flexión, los parámetros del modelo constitutivo del hormigón seleccionados para representar el comportamiento de las probetas en compresión dio origen a resultados inciertos para aquellos estados de tensión que implican considerable redistribución de las tensiones en el hormigón. Para niveles de carga en los que se produce la rotura del hormigón en tracción en una parte significativa de la sección del tubo, el programa no logra convergencia en la solución de las ecuaciones de equilibrio y suspende el proceso de análisis.
- Para lograr la convergencia de la solución numérica para cargas próximas a la carga de rotura se necesitó modificar los parámetros del modelo constitutivo del hormigón determinados en función de los ensayos de compresión. El modelo de Drucker-Prager del hormigón fue definido en función de la resistencia a tracción del hormigón según los siguientes parámetros:

Máxima resistencia a la tracción: 35 kg/cm<sup>2</sup>  
 Angulo de fricción interna: 50°  
 Angulo de dilatancia: 35°  
 Curva de degradación de la resistencia a tracción.

Debe destacarse, sin embargo, que si estos parámetros del modelo así definidos son aplicados luego al caso de la probeta en compresión axial, los resultados del análisis numérico no representan adecuadamente la curva carga-deformación experimental del hormigón.

- En los elementos estructurales analizados en el presente trabajo, el tubo de acero aporta la mayor parte de la resistencia a flexión y el relleno de hormigón actúa evitando que se produzca el pandeo local del tubo y su falla prematura.
- De los análisis numéricos realizados se puede inferir que se producen desplazamientos relativos entre la camisa de acero y el hormigón, especialmente en los niveles avanzados de deformación plástica del acero. Los resultados, considerando el deslizamiento entre acero y hormigón en los cálculos, indican que este no modifica substancialmente la curva carga – deformación del pilote respecto al caso de adherencia perfecta entre acero y hormigón.

- El análisis numérico no detectó el pandeo relativamente localizado en la zona de máxima compresión del acero que se observó en los ensayos de laboratorio de los tubos rellenos de hormigón.
- El análisis numérico realizado del mismo pilote sin relleno de hormigón, arrojó una carga portante máxima aproximadamente igual a 1/3 de la correspondiente al tubo con relleno ensayado. Esta reducción de la carga portante se debe a que el modelo numérico encontró un proceso de inestabilidad por aplastamiento de la sección transversal, conocido en la literatura como “efecto Brazier”.

## REFERENCIAS

- Hanbin, G. y Usami, T. (1992). “Strength of concrete-filled thin-walled steel box columns: experiment.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 118(11).
- O’Shea M. and Bridge, R., (2000). “Design of Circular Thin-Walled Concrete Filled Steel Tubes.” *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 126(11),1295-1303.
- Prior, H.G.L. y Boehme, J., (1989). “Beam-Column Behaviour of Steel Tubes with High Strength Concrete.” *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Colloquium North American Session*, Structural Stability Research Council, New York, 439-450.
- Saul, R., Humpf, K., y Patsch, A. (2001). “The Rosario-Victoria Cable-Stayed Bridge Across the River Paraná in Argentina and its Ship Impact Protection System” *Proceedings of the First International Conference on Steel & Composite Structures (ICSCS’01)*, Pusan, Corea.