

UN ENFOQUE ANALITICO PARA PREDECIR EL FALLO DE TUBERIAS DE PRETENSADO DE GRAN DIAMETRO.

Javier Gómez^{1*}, Jesús Oroya¹, Daniel Araya¹, Javier Sánchez².

¹ ADVANCED MATERIAL SIMULATION SL. c/Elcano 14 1 derecha. Bilbao. Bizkaia, Spain

² INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA (CSIC). C/ Serrano Galvache, 4, 28033 Madrid. Spain

* Persona de contacto: javier.gomez@amsimulation.com

RESUMEN

El hormigón pretensado es un material ampliamente utilizado en elementos prefabricados de ingeniería civil, como vigas de puentes, traviesas de ferrocarril y tuberías. Esta técnica mejora la resistencia a la tracción del material, al comprimir el hormigón aumentando la tensión de tracción del acero. A pesar de requerir aceros de alta resistencia, que son materiales de baja tenacidad, los elementos estructurales resultantes, especialmente las tuberías de hormigón pretensado, exhiben una notable tolerancia al daño. La rotura de una de las espiras de pretensado no necesariamente conduce al fallo total de la tubería; las espiras restantes evitan el colapso estructural. El objetivo de este estudio es desarrollar una formulación analítica para evaluar la tolerancia al daño de tuberías de gran diámetro y determinar el número crítico de espiras que pueden romperse antes del fallo total. En este trabajo, se revisan modelos analíticos de otros autores, incluyendo modificaciones para eliminar simplificaciones y considerar todos los componentes de la tubería, como el revestimiento de chapa, y se plantea la resolución numérica de la ecuación diferencial final para tener en cuenta efectos como la rotura no consecutiva de espiras. Los resultados han sido validados mediante simulaciones de elementos finitos. En resumen, se presenta una herramienta analítica eficiente para evaluar de forma instantáneamente la rotura de tuberías de hormigón pretensado.

PALABRAS CLAVE: Tolerancia al daño, fallo de tuberías, hormigón pretensado.

ABSTRACT

Prestressed concrete is a commonly used material in precast civil engineering elements, such as bridge beams, railway sleepers, and pipes. This technique enhances the tensile strength of the material by compressing the concrete and increasing the tensile stress of the steel. Despite the requirement for high-strength steels, which are low-tensile materials, the resulting structural elements, particularly prestressed concrete pipes, demonstrate remarkable damage tolerance. It is important to note that the breakage of one prestressing spire does not necessarily lead to the total failure of the pipe, as the remaining spires prevent structural collapse. The study aims to develop an analytical formulation to assess the damage tolerance of large diameter pipes and determine the critical number of spires that can break before total failure. This work reviews analytical models by other authors, including modifications to eliminate simplifications and consider all components of the pipe, such as the sheet metal lining. A numerical resolution of the final differential equation is proposed to take into account effects such as non-consecutive breakage of turns. The results have been validated through finite element simulations. In summary, this text presents an analytical tool for assessing the failure of prestressed concrete pipes quickly and efficiently.

KEYWORDS: Damage tolerance, pipe failure, prestressed concrete.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón pretensado es un material compuesto ampliamente utilizado en elementos estructurales de ingeniería civil, como vigas de puentes, traviesas de ferrocarril, o tuberías. La técnica de pretensado permite aumentar la resistencia a tracción del material compuesto, hormigón acero, haciendo que el hormigón trabaje a compresión mientras que el acero aumenta su

esfuerzo a tracción. Aunque este sistema constructivo requiere la utilización de aceros de alta resistencia, caracterizados por su baja tenacidad, los elementos estructurales resultantes, especialmente las tuberías de hormigón pretensado exhiben una notable tolerancia al daño. La rotura de una de las espiras de pretensado no conduce necesariamente al fallo total de la rotura de la tubería. La pérdida de la fuerza de pretensado se localiza en uno de los alambres, mientras que el resto son

suficientes para prevenir un colapso estructural. La integridad de la tubería sólo se pierde cuando fallan un conjunto dado de espiras [1].

Las tuberías de hormigón pretensado son elementos de gran diámetro y alta resistencia utilizados generalmente en abastecimiento de agua debido a su buen rendimiento y gran capacidad. Sin embargo, se han observado fallos después de un cierto tiempo de servicio debido al deterioro de las espiras de pretensado [2], [3]. Para mitigar los graves resultados de estos fallos se han desarrollado múltiples tecnologías para inspeccionar y evaluar las condiciones de la tubería [4], [5], y se han desarrollado diferentes metodologías para predecir el fallo de la misma [6], [7].

La modelización de la tolerancia al daño de una tubería de pretensado de gran diámetro requiere determinar el número crítico de espiras que pueden romperse antes del fallo total. Este problema fue estudiado de forma analítica por Andrés Valiente [1], quien aplicando una serie de hipótesis simplificativas, formuló una ecuación diferencial, cuya solución permitió desarrollar un modelo analítico de rotura.

El presente trabajo introduce dos modificaciones en el trabajo inicial [1] eliminando algunas de las simplificaciones de partida: i) se considera el efecto de la camisa de chapa presente en ciertos tipos de tuberías de hormigón pretensado, y ii) se contempla la posibilidad de rotura de espiras no consecutivas. El modelo analítico ha sido validado con resultados obtenidos a través de simulaciones por elementos finitos. Este enfoque semianalítico proporciona una herramienta eficiente para evaluar de forma casi instantánea la rotura de tuberías de hormigón pretensado.

2. MODELO ANALITICO INICIAL

El problema de modelar la tolerancia al daño de una tubería de hormigón pretensado de gran diámetro fue abordado de forma analítica por Andrés Valiente [1]. Aplicando una serie de hipótesis simplificativas, derivó una ecuación diferencial, cuya solución permitió desarrollar una formulación analítica para determinar la máxima presión que la tubería puede soportar en función del número de espiras rotas y de la resistencia a tracción del hormigón. Posteriormente, otros autores han investigado este problema llegando a ecuaciones diferenciales similares [8].

La configuración típica de una tubería de hormigón pretensado la tubería consta de dos capas de hormigón, una interna y otra externa, separadas por una camisa de chapa, las espiras de pretensado, cuya fuerza contrarresta el efecto de la presión del agua, y una capa exterior de mortero. Valiente [1], mediante la integración de las ecuaciones de equilibrio, las ecuaciones constitutivas y las ecuaciones de compatibilidad, logró formular la ecuación diferencial que gobierna los desplazamientos

radiales. Por simplicidad, los desplazamientos en la dirección axial y azimutal fueron ignorados debido a la simetría radial del problema, obteniendo la siguiente ecuación diferencial final:

$$M \frac{d^4 u}{dz^4} + ku = p(z) \quad (1)$$

Donde:

$$\begin{aligned} E' &= E_c / (1 - \nu_c^2) \\ k &= t \cdot \frac{E'}{R^2} \cdot \left(1 + \frac{A_s E_s}{E' \cdot s \cdot t} \right) \\ M &= \frac{E' t^3}{12} \end{aligned} \quad (2)$$

u es la componente radial del desplazamiento, r , θ , z las coordenadas de posición, $p(z)$ es la presión exterior actuante sobre la tubería, E' es el módulo de elasticidad generalizado del hormigón, E_c el módulo de elasticidad del hormigón, ν_c el coeficiente de Poisson del hormigón, E_s es el módulo de elasticidad del acero de pretensado, A_s es el área de las espiras de pretensado, s es la separación entre espiras de pretensado, R es el radio medio de la tubería y t es el espesor de la misma.

Combinando la ecuación diferencial anterior con las condiciones de contorno de simetría en el origen de coordenadas y borde libre en el infinito, Valiente resolvió el problema [1] obteniendo los desplazamientos y las tensiones en el hormigón y en el alambre de pretensado.

3. VARIACIÓN DEL MODELO ANALITICO

En la geometría del trabajo original [1] no se incluyó la camisa de chapa de acero. Su efecto puede considerarse de forma analítica mediante la reformulación de las ecuaciones de equilibrio de fuerzas, compatibilidad de desplazamientos y ecuaciones constitutivas.

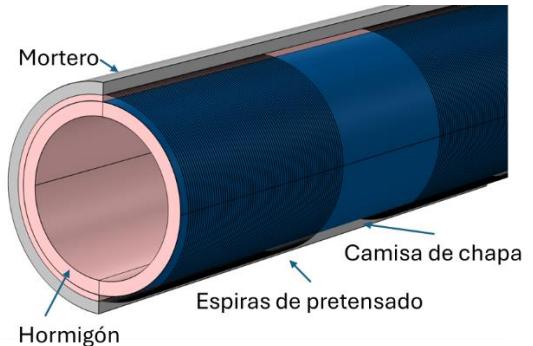


Figura 1. Esquema de la tubería de hormigón pretensado con camisa de chapa.

El punto de partida son las ecuaciones de compatibilidad, que establecen una relación entre los desplazamientos y las deformaciones.

$$\varepsilon_z = -y \frac{d^2 u}{dz^2} \quad (3)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{R}$$

y es la distancia a la superficie media de la tubería. Considerando las ecuaciones constitutivas de la elasticidad lineal e isótropo, además de la hipótesis simplificativa de pared delgada, en la cual la tensión radial es menor que las otras dos, el campo tensional queda:

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &= E'(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_z) = E'\left(\frac{u}{R} - \nu y \frac{d^2 u}{dz^2}\right) \\ \sigma_z &= E'(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\theta) = E'\left(-y \frac{d^2 u}{dz^2} + \nu \frac{u}{R}\right)\end{aligned}\quad (4)$$

Formulando las ecuaciones de equilibrio de un elemento diferencial de tubería de espesor total t con p como fuerzas exteriores por unidad de área [1] queda:

$$\frac{d^2 M_z}{dz^2} - \frac{N_\theta}{R} = -p \quad (5)$$

N_θ es la fuerza axial por unidad de longitud axial, y M_z el momento flector por unidad de longitud circunferencial. Los esfuerzos se pueden obtener a partir de las tensiones integrando en las secciones del elemento diferencial.

$$\begin{aligned}M_z &= \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_z y \, dy \\ N_\theta &= \frac{\sigma_s A_s}{s} + \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \sigma_\theta \, dy\end{aligned}\quad (6)$$

σ_s es la tensión de pretensado. Sustituyendo sucesivamente queda la nueva ecuación diferencial.

$$M^* \frac{d^4 u}{dz^4} + \gamma \frac{d^2 u}{dz^2} + k^* u = p(z) \quad (7)$$

donde

$$\begin{aligned}M^* &= E'_c \frac{t^3}{12} + (E'_s - E'_c') \left(t_c^2 l + \frac{l^3}{12} \right) \\ \gamma &= (E'_s \nu_s - E'_c \nu_c) \frac{2}{R} t_c l \\ k^* &= \frac{E'_c(t-l)}{R^2} \left(1 + \frac{E_s A_s}{s E'_c(t-l)} + \frac{E'_s l}{E'_c(t-l)} \right)\end{aligned}\quad (8)$$

l es el espesor de la camisa de chapa. Esta ecuación es similar a la inicial, aunque posee un sumando adicional donde aparece la derivada segunda del desplazamiento radial. Se puede comprobar que cuando l es igual a cero, se recupera la ecuación diferencial inicial. Resolviendo el sistema se determina el desplazamiento radial a lo largo de la tubería, y conocido el desplazamiento, la tensión circumferencial.

$$\sigma_\theta = E'_c \left(\frac{u}{R} - \nu y \frac{d^2 u}{dz^2} \right) \quad (9)$$

Cuando la presión es constante, la solución de la ecuación diferencial anterior es:

$$u = p/k \quad (10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{E'_c}{k R} p \quad (11)$$

El caso de una tubería de hormigón de gran diámetro con espiras rotas se puede estudiar aplicando el principio de superposición de estados según se esquematiza en la siguiente figura.

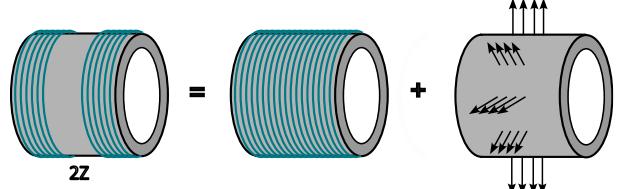


Figura 2. Aplicación del principio de superposición a la tubería con espiras rotas.

2z es la longitud del tramo de tubería con espiras rotas. El efecto del pretensado se simplifica asimilándolo a una presión p_s que genera en el hormigón una tensión que equilibra la fuerza de pretensado. Dicha presión se calcula a partir del trabajo de Valiente [1]

$$p_s = \frac{\sigma_s A_s}{s R_s} \quad (12)$$

Donde R_s es el radio de la hélice del acero pretensado.

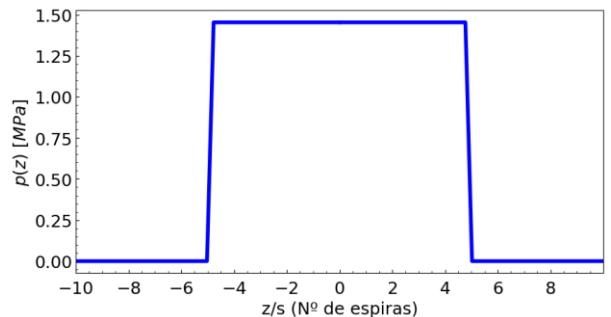


Figura 3. Ejemplo de input del modelo analítico, función $p(z)$.

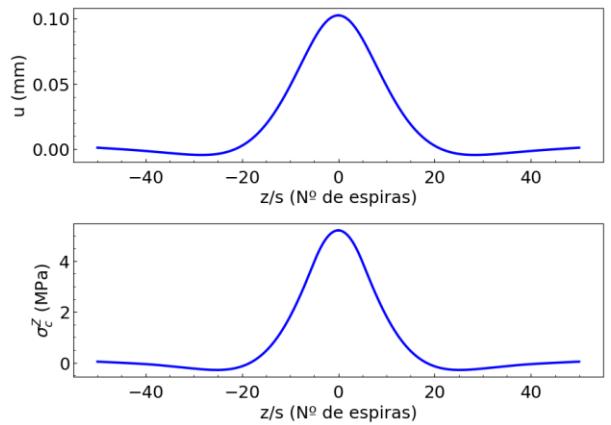


Figura 4. Ejemplo de output del modelo: desplazamiento radial y tensión circumferencial.

La tensión efectiva en la tubería es la suma de la tensión en el hormigón debida a la presión del agua, σ_c^0 , la

tensión debida las espiras intactas de pretensado, σ_c^p , y la tensión generada por la presión contraria de las espiras rotas, σ_c^Z .

$$\sigma_c = \sigma_c^0 + \sigma_c^p + \sigma_c^Z \quad (13)$$

La presión del agua y la presión que simula el efecto de las espiras de pretensado intactas son constantes por lo que la tensión que generan se calcula a partir de la solución de la ecuación diferencial particular analizada en los párrafos anteriores. La presión que simula el efecto de las espiras rotas no es constante y para determinar el estado tensional asociado, σ_c^Z , es necesario resolver la ecuación diferencial analítica o numéricamente. La tensión circumferencial total queda:

$$\sigma_c = \frac{E_{c'}}{kR} (p - p_s) + \sigma_c^Z \quad (14)$$

Para resolver la ecuación diferencial y obtener σ_c^Z , se ha construido un programa en el lenguaje de programación PYTHON, cuyo *input* es la presión debida a las espiras rotas $p(z)$, y el *output* la tensión σ_c^Z . La función p es función del número de espiras rotas N . La Figura 3 muestra un ejemplo de *input* del programa de resolución numérica de la ecuación diferencial y la Figura 4 un ejemplo de *output*.

$$N = \frac{2Z}{s} \quad (15)$$

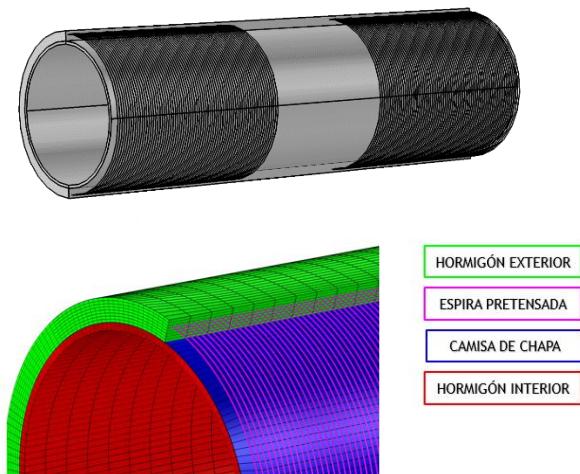


Figura 5. Ejemplo de geometría utilizada en elementos finitos: caso con 50 espiras rotas.

4. VALIDACION DEL MODELO PROPUESTO

Los resultados han sido validados comparando los resultados analíticos con cálculos por elementos finitos. Se ha desarrollado un modelo de la tubería de hormigón pretensado, con el software comercial COMSOL Multiphysics V5.6 que permite el estudio del campo de tensiones en el hormigón, la camisa de chapa y las espiras

para diferentes valores de presión del agua, así como analizar el efecto de la rotura de una o más espiras del pretensado. Los parámetros utilizados, tanto de materiales como geométricos, se recogen en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas y dimensiones geométricas empleadas en los cálculos

Magnitud	Notación	Valor
Tensión de rotura del hormigón	σ_c^T	2.10 MPa
Tensión de pretensado	σ_s	1220.66 MPa
Módulo de Young del hormigón	E_c	35 GPa
Coeficiente de Poisson del hormigón	ν_c	0.2
Módulo de Young del Acero	E_s	210 GPa
Coeficiente de Poisson del acero	ν_s	0.3
Radio interior	R_i	0.800 m
Radio de la camisa de chapa	R_{ch}	0.835 m
Radio de las espiras	R_s	0.915 m
Radio exterior	R_e	0.950 m
Diámetro de la sección de la armadura activa	D_s	7 mm
Separación entre espiras	s	3.125 cm
Espesor de la camisa de chapa	l_c	2 mm

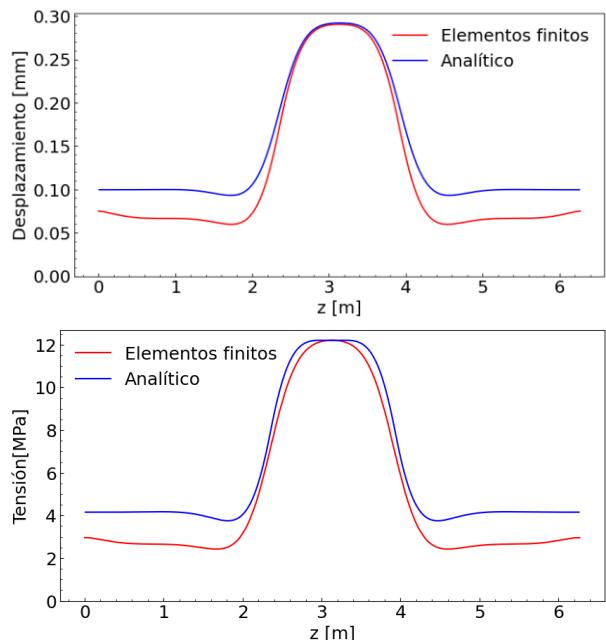


Figura 6. Validación del modelo analítico: comparativa de los desplazamientos radiales y las tensiones circunferenciales correspondientes a una presión de agua y espiras rotas.

El modelo de elementos finitos considera el hormigón interior, la camisa de chapa, el hormigón exterior y la espira pretensada (Figura 5). En la discretización del hormigón y la chapa de acero se han utilizado elementos hexaédricos cuadráticos mientras que para la espira de pretensado se han empleado elementos unidimensionales. Las condiciones de contorno del modelo restringen el movimiento angular y axial en los extremos, pero permiten el desplazamiento radial. Además, se ha aplicado una fuerza externa debida a la presión del agua, distribuida de manera uniforme en las paredes internas de la tubería. En la espira de pretensado se ha aplicado un estado tensional inicial con el valor que aparece en la tabla 1.

El resultado del modelo de elementos finitos se ha comparado con los desplazamientos radiales y las tensiones circunferenciales obtenidas del modelo analítico. La figura 6 muestra la comparativa donde se comprueba que el modelo analítico predice los resultados numéricos con suficiente precisión.

4. RESULTADOS

El modelo semi analítico y el modelo de elementos finitos de la tubería permiten calcular la máxima tensión experimentada por el hormigón bajo una presión de agua y un número de espiras no operativas. Los cálculos se han realizado de manera paramétrica, variando el número de espiras rotas y la presión del agua.

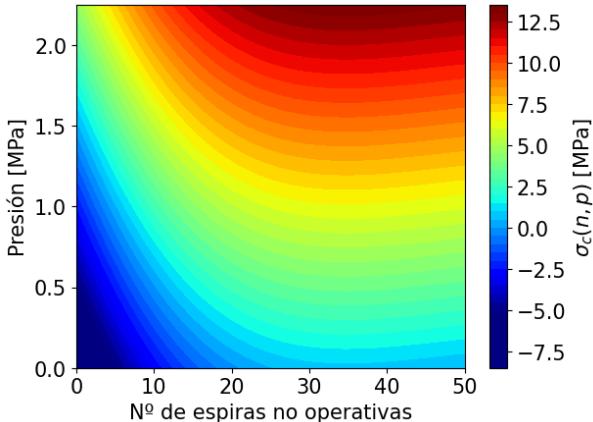


Figura 7. Contorno de tensiones de tensiones máximas en el hormigón.

En la Figura 7 se muestra el contorno tensional obtenido con el modelo semi analítico. La figura 8 compara la línea de nivel correspondiente a una tensión en el hormigón de 2.19 MPa para los dos modelos. Se observa una buena concordancia entre ambos resultados.

La resolución numérica del problema permite considerar casos de rotura de espiras complejos, donde los conjuntos de espiras rotas no son consecutivos. En la Figura 9 se representa la función $p(z)$ para el caso de dos conjuntos de espiras rotas simétricos, mientras que la Figura 10

muestra el correspondiente desplazamiento radial y tensión circunferencial a lo largo de la tubería.

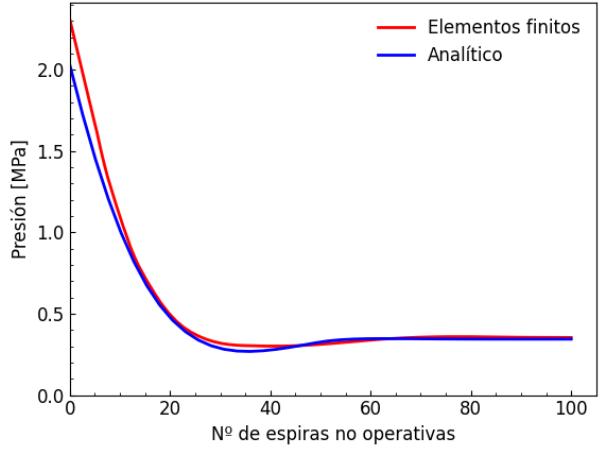


Figura 8. Curva de rotura correspondiente a una tensión de tracción de 2.19 MPa.

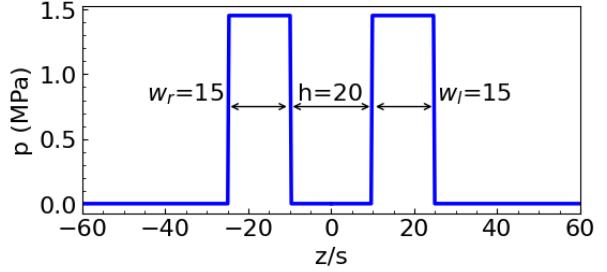


Figura 9. Ejemplo de input del modelo analítico con dos conjuntos de espiras rotas.

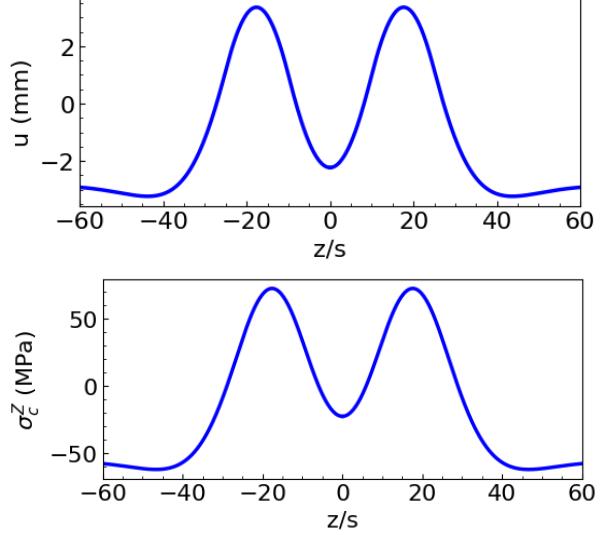


Figura 10. Ejemplo de output del modelo analítico con dos conjuntos de espiras rotas.

5. CONCLUSIONES

Se presenta un modelo semi-analítico original, obtenido a partir de los trabajos iniciales de Andrés Valiente [1], para determinar la presión máxima que resiste una tubería de hormigón pretensado de gran diámetro. Este enfoque analítico proporciona una herramienta eficiente para

evaluar de forma prácticamente instantánea la tolerancia al daño de la tubería.

Su aplicación resulta especialmente interesante en situaciones que requieran el estudio de conjuntos de espiras rotas no consecutivas, ya que permite hacer cálculos muy rápidos para una amplia variedad de datos de entrada.

El modelo analítico ha sido validado mediante un modelo de elementos finitos. Se ha obtenido la curva crítica de presión versus número de espiras rotas para diversas configuraciones de forma analítica y numérica, observando una buena concordancia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su profundo agradecimiento a Andrés Valiente por su dedicación incansable, por ser un ejemplo de investigador y docente, y por su excepcional labor a lo largo de toda su trayectoria.

Los autores también quieren expresar su agradecimiento al Consorcio de Aguas de Tarragona (CAT) por su trabajo y conocimientos que han contribuido a desarrollar esta investigación, y al proyecto europeo DIMAT (101091496) por la financiación recibida.

REFERENCIAS

- [1] A. Valiente. *Stress corrosion failure of large diameter pressure pipelines of prestressed concrete*, Eng Fail Anal 8-3 (2001) 245-261.
- [2] A. E. Romer, G.E.C. Bell, R.D. Ellison. *Failure of Prestressed Concrete Cylinder Pipe*, Pipelines, American Society of Civil Engineers (2007) pp. 1–17
- [3] S. Ge, S. Sinha. *Failure Analysis, Condition Assessment Technologies, and Performance Prediction of Prestressed-Concrete Cylinder Pipe: State-of-the-Art Literature Review*, Journal of Performance of Constructed Facilities 28-3 (2014) 618–628.
- [4] P.S. Fisk, J. Marshall. *Development of a PCCP Management Plan Using Sonic/Ultrasonic Nondestructive Testing Results*, Pipelines, American Society of Civil Engineers (2006) 1–8.
- [5] R.C. Tennyson, W.D. Morison, T. Miesner. *Pipeline Integrity Assessment Using Fiber Optic Sensors*, Pipelines, American Society of Civil Engineers (2005) 803–817.
- [6] M.S. Zarghami, K. Fok. *Analysis of Prestressed Concrete Pipe under Combined Loads*, Journal of Structural Engineering, 116-7 (1990) 2022–2039.
- [7] H. Xiong, P. Li, Q. Li, *FE model for simulating wire-wrapping during prestressing of an embedded prestressed concrete cylinder pipe*, Simul Model Pract Theory 18-5 (2010) 624–636.

- [8] K. Zhai, F. Wang, H. Fang, P. Ni, X. Ji, C. Guo, S. Hu. *Serviceability assessment of prestressed concrete cylinder pipes with broken wires: Analytical solution and numerical simulation*, Tunnelling and Underground Space Technology 126 (2022) 104551.