

PREDICCIÓN DE APARICIÓN DE ARRUGAS EN OLEODUCTOS BAJO MOVIMIENTO DE SUELO, CONSIDERANDO MODELOS DE MECÁNICA DE DAÑO Y PLASTICIDAD FINITA

Jairo F. Useche¹, Oscar Gualdron²

¹Universidad Tecnológica de Bolívar, Cartagena, Colombia

²CENIT, Bogotá, Colombia

ABSTRACT

La integridad de ductos sometidos a deformaciones por flexión (bending stress/strain), representa un problema recurrente en Colombia debido a las complejas características geomorfológicas en gran parte de su territorio. La posible aparición de arrugas en una tubería debe ser contemplada debido a las altas deformaciones plásticas desarrolladas en ella y que elevan el riesgo de rotura. El presente trabajo muestra una metodología para el estudio de esfuerzos y deformaciones residuales a lo largo de un oleoducto, usando información ILI y modelos numéricos basados en el Método de Elementos Finitos. El perfil de desplazamiento empleado en los análisis es construido a partir de corridas ILI. El modelo de la tubería fue construido utilizando elementos de cáscara. El suelo es modelado mediante un modelo constitutivo de Mohr. El modelo de daño permite tener en cuenta la generación de micro-defectos a medida que evoluciona la deformación en el material. La interacción suelo-tubería es modelada mediante elementos de contacto. Se presentan los resultados del análisis de integridad de una línea en el país, mostrando la efectividad de la metodología propuesta a través de la predicción de arrugas efectivamente encontradas en la tubería.

Keywords: Oleoductos, pandeo, arrugas, esfuerzos, deslizamiento de suelo, geotécnica.

1. INTRODUCTION

La integridad de ductos sometidos a deformaciones por flexión (bending stress/strain), representa un problema recurrente en Colombia debido a las complejas características geomorfológicas que caracterizan gran parte de su territorio. Este tipo de análisis se encuentran dentro de los más complejos. El uso de modelos computacionales para estudios de aptitud para el servicio resulta el abordaje más apropiado en cuanto a relación costo-beneficio. La predicción teórica del

comportamiento en deformación de una tubería utilizando modelos numéricos, permite estudiar su comportamiento e integridad estructural bajo escenarios de movimiento de suelo.

Por otra parte, la posible aparición de arrugas en una tubería debe ser contemplada debido a las altas deformaciones plásticas desarrolladas en ella y que elevan el riesgo de rotura. Por lo anterior, la predicción de aparición de arrugas, es una tarea de suma importancia en el análisis estructural de una tubería sometida a movimiento de suelo. Las metodologías de modelado numérico empleadas en dichas tareas deben contemplarse en su formulación.

El presente trabajo muestra una metodología para el estudio de esfuerzos y deformaciones residuales a lo largo de un oleoducto, usando información ILI y modelos numéricos basados en el Método de Elementos Finitos. El perfil de desplazamiento empleado en los análisis es construido a partir de corridas ILI en la tubería y de la historia de desplazamiento del tramo medido entre corridas consecutivas. El modelo de la tubería fue construido utilizando elementos de cáscara de cuatro nodos con 6DOF por nodo, cuya formulación tiene en cuenta grandes desplazamientos y rotaciones y capacidad para modelar plasticidad finita y reducción de espesores. Este elemento permite el control de “hourglassing” y “shear locking”, los cuales se refieren a modos de deformación ficticios (o de “energía cero”) y rigidez del elemento a flexión, respectivamente.

La respuesta mecánica del material de la tubería fue modelada mediante un modelo elasto-plástico basado en mecánica de daño que considera endurecimiento isotrópico. Este modelo constitutivo se basa en la descomposición multiplicativa del tensor de deformaciones lo cual permite modelar problemas de grandes desplazamientos y deformaciones unitarias. El suelo es modelado mediante un modelo elasto-plástico basado en el modelo constitutivo de Mohr. El modelo de daño permite tener en cuenta la generación de micro-defectos a medida que

evoluciona la deformación en el material. La interacción suelo-tubería es modelado mediante elementos de contacto teniendo en cuenta la fricción entre ellos.

Se presentan los resultados del análisis de integridad de una línea en el país, mostrando la efectividad de la metodología propuesta a través de la predicción de arrugas efectivamente encontradas en la tubería en posteriores corridas ILI.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Modelo numérico

El modelo de elementos finitos de la tubería fue construido utilizando elementos de cáscara de cuatro nodos con 6DOF por nodo, cuya formulación tiene en cuenta grandes desplazamientos y rotaciones y capacidad para modelar plasticidad finita y reducción de espesores [1][2]. Este elemento permite el control de “hourglassing” y “shear locking”, los cuales se refieren a modos de deformación ficticios (o de “energía cero”) y rigidez del elemento a flexión, respectivamente.

El modelo numérico empleado en el análisis se basa en las siguientes hipótesis:

- La tubería en su estado actual se encuentra libre de esfuerzos y deformaciones iniciales.
- El perfil de desplazamiento es construido a partir del perfil obtenido mediante las corridas ILI de la historia de desplazamiento del tramo.
- En el análisis se considera la presión máxima de operación actuante en la tubería.

El modelo de la tubería fue construido utilizando elementos de cáscara de cuatro nodos con 6DOF por nodo, cuya formulación tiene en cuenta grandes desplazamientos y rotaciones y capacidad para modelar plasticidad finita y reducción de espesores (ver figura 1)[3]. Este elemento permite el control de “hourglassing” y “shear locking”, los cuales se refieren a modos de deformación ficticios (o de “energía cero”) y rigidez del elemento a flexión, respectivamente. La geometría en el modelo fue discretizada mediante extrusión de elementos obteniendo así una malla estructurada.

2.1 Modelo constitutivo

La respuesta mecánica del material fue modelada mediante un modelo elastoplástico con endurecimiento isotrópico basado en la descomposición multiplicativa del tensor de deformaciones, considerando el modelo evolución de daño propuesto por Gurtin y Francis [8]. Este modelo no tiene limitaciones en cuanto a su aplicabilidad para el rango de deformaciones unitarias encontradas en el análisis. La curva esfuerzo-deformación utilizada fue construida utilizando el modelo MPC presentado en API-RP-579.

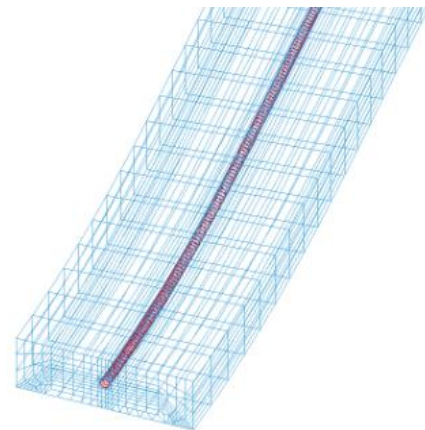
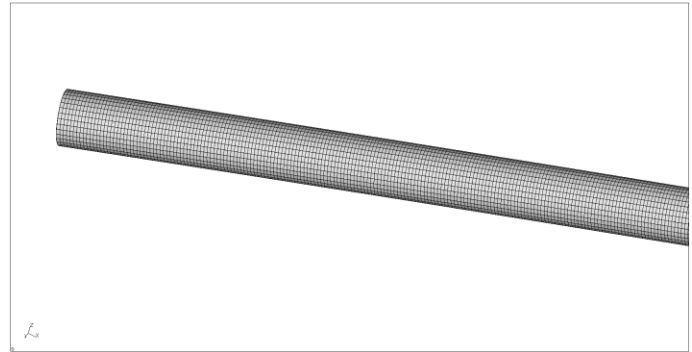
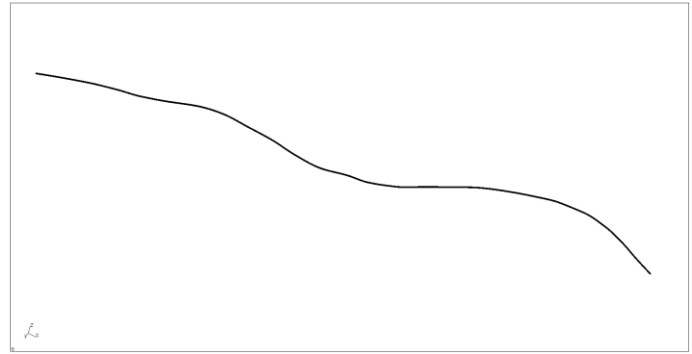


FIGURA 1. MALLA DE ELEMENTOS FINITOS PARA LA TUBERÍA (ABAJO MODELO DEL SUELO).

2.1 Modelado de cargas

El modelo considera como cargas de trabajo la máxima presión de operación del tramo analizado establecida, así como el peso de la tubería, del suelo y del producto transportado[4][5]. Otras cargas y/o condiciones tales como esfuerzos, deformaciones o desplazamientos iniciales no son consideradas en el análisis. En los extremos de la tubería son restringidos los desplazamientos y rotaciones nodales, en el plano normal a la sección de la tubería.

2.2 Modelado de desplazamiento

El perfil de desplazamiento es construido mediante la medición en campo mediante corridas ILI (ver figura 2). De esta manera se obtiene un campo de desplazamiento que permite la evolución de la deformación de la tubería entre corridas. Sin embargo, en el presente estudio se implementan desplazamientos hasta 1.5 veces la curva de desplazamiento así

construidas con el fin de estudiar el efecto de mayores desplazamientos en el desarrollo de esfuerzos y deformaciones en la tubería[6][7][8].

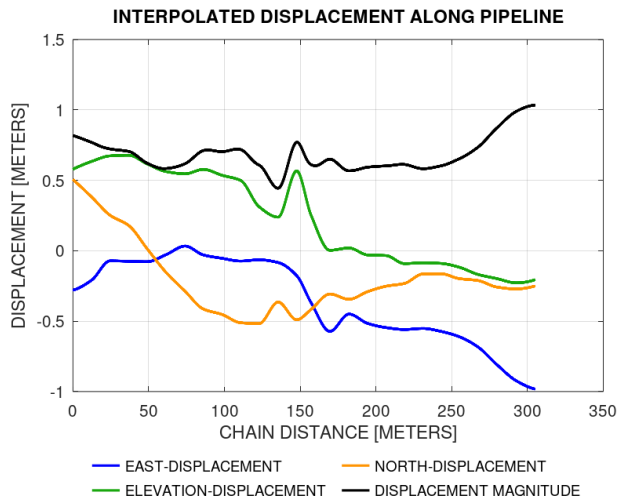


FIGURA 2. PERFIL DE DESPLAZAMIENTO A PARTIR DE CORRIDAS ILI.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Esfuerzos y deformaciones

En las gráficas 3 y 4 se presenta la evolución de los esfuerzos de Von Mises y las deformaciones plásticas equivalentes obtenidas a lo largo de la tubería. En estas gráficas, se observa que el valor máximo de esfuerzo de Von Mises para la condición final de desplazamiento. Se desarrollan así esfuerzos máximos del orden de 530 MPa deformaciones plásticas acumuladas con un valor por encima de 0.019 mm/mm a una distancia de 150 metros de PR.

Por otra parte, la figura 4 presenta la variación de esfuerzo y deformaciones máximas a lo largo de la tubería. Las distancias mostradas en el eje horizontal son medidas a partir de la soldadura GWD-1, ubicada en el punto de referencia PR. En esta figura se observan los mayores valores de esfuerzos entre las distancias de 130 y 170 metros, con valores por encima del esfuerzo de fluencia del material y altamente concentrados a 150 metros con valor cercano a 580 MPa, observándose que la gran parte del material en la tubería genera deformaciones plásticas para desplazamientos máximos de 0.103 metros.

Igualmente se presenta la distribución y evolución de la deformación plástica equivalente en las juntas soldadas y a lo largo de la tubería, donde se observan deformaciones plásticas con valores en el rango de 0.025 mm/mm (2.0%) a 0.025 mm/mm (2.5%). En esta misma figura se observan zonas localizadas entre 130 y 170 metros se presentan deformaciones plásticas con valores máximos de 0.02 mm/mm (2%) con valores máximos por encima de 0.12 mm/mm a 150 metros.

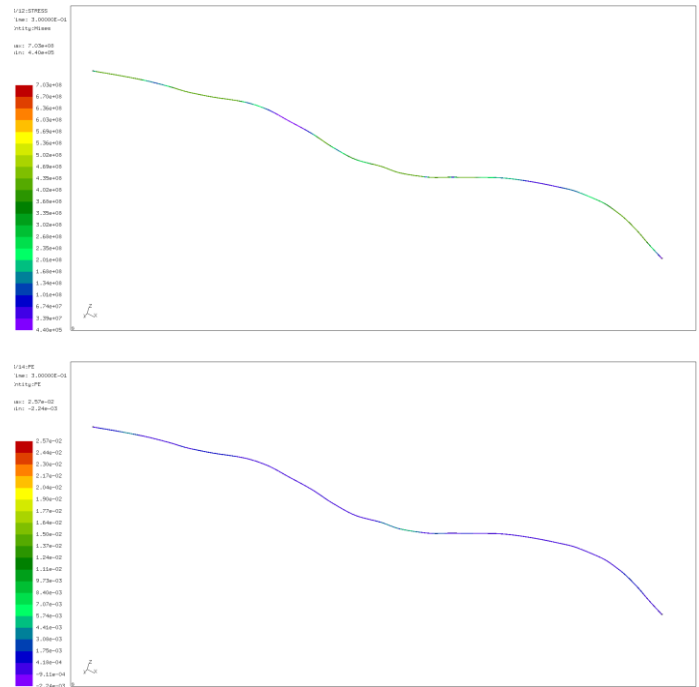


FIGURA 3. PERFIL DE ESFUERZO Y DEFORMACIÓN PLÁSTICA EQUIVALENTE A LO LARGO DE LA TUBERÍA.

3.2 Predicción generación de arrugas

La figura 5 muestra la evolución de las deformaciones plásticas entre las distancias de registro 130 a 170 metros. En estas se observa cómo en esta zona se generan deformaciones plásticas del orden de 0.00124 mm/mm a partir de 0.103 metros de desplazamiento máximo, presentándose en una distribución tipo onda (wave) que propicia evolución de pandeo localizado (arrugas). En la figura 6 se observa que esta zona plástica evoluciona hacia zonas concentradas de deformación e inestabilidad geométrica en la pared del tubo, presentando un pandeo localizado (arruga) para desplazamiento máximo entre 0.31 y 0.414 metros, presentando valores de deformación plástica en el rango de 0.093 in/in. Finalmente, esta misma figura se observa una arruga con valores de deformación plástica de 0.225 mm/mm lo que indica que entre un desplazamiento de 0.414 metros y 0.621 metros se presenta rotura de la tubería en la arruga.

La presencia de otras arrugas en esta zona, muestra una alta susceptibilidad de la tubería en este tramo para desarrollar falla por deformación plástica, que se presenta para pequeños desplazamientos máximos (del orden de 0.10 m) y falla por pandeo. Esto puede ser explicado por la geometría que presenta la tubería y por forma como se distribuye y evoluciona el desplazamiento a lo largo de la tubería, lo cual da cuenta de un trazado de tubería que es altamente susceptible a estos tipos de fallas en la zona considerada.

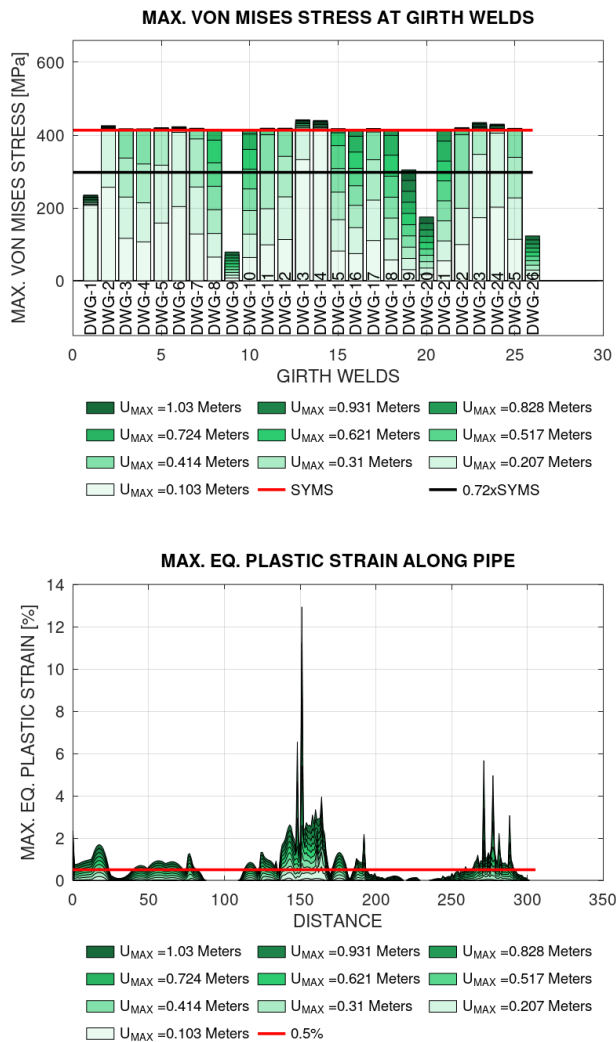


FIGURA 4. ARRIBA: ESFUERZOS DE VON MISES EN SOLDADURAS. ABAJO: DEFORMACIÓN PLÁSTICA EQUIVALENTE..

4. CONCLUSION

La metodología de modelado numérico por elementos finitos basadas en modelos elastoplásticos de cáscara acoplados a modelos tridimensionales del suelo, permiten estudiar la evolución de esfuerzos, deformaciones y la aparición de zonas de inestabilidad plástica, arrugas, a lo largo de la tuberías partir de información obtenida de corridas ILI. De esta manera se obtiene una herramienta de predicción para análisis de integridad de ductos.

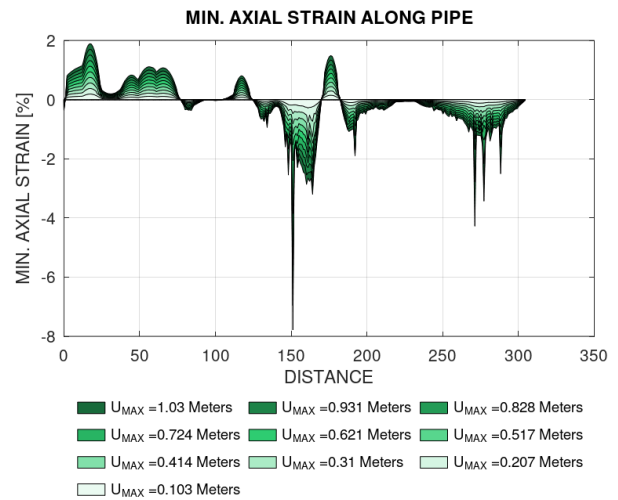


FIGURA 5. DEFORMACIÓN AXIAL A LO LARGO DE LA TUBERÍA, PARA LAS CONDICIONES DE DESPLAZAMIENTO MÁXIMO MOSTRADAS.

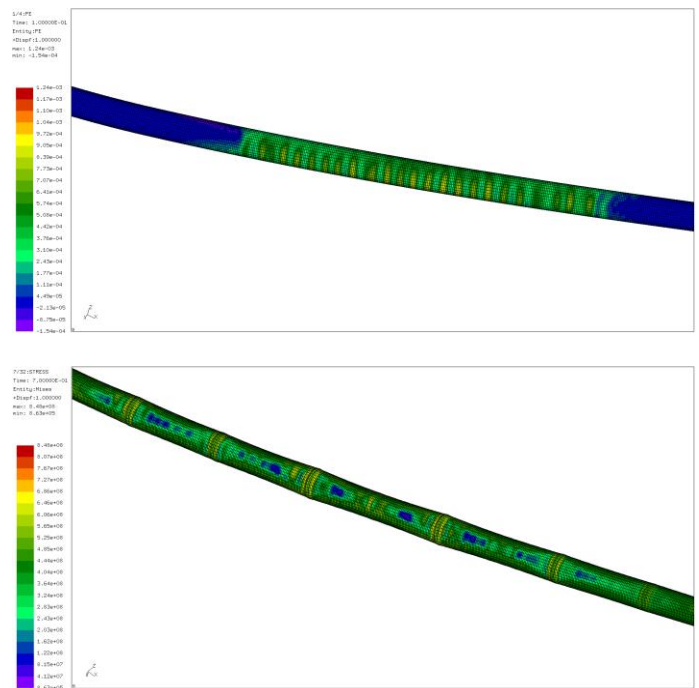


FIGURA 6. DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIÓN PLÁSTICA HACIA EL CENTRO DE LA TUBERÍA GENERACIÓN DE ARRUGAS (ARRIBA ETAPAS INICIALES ABAJO: GEOMETRÍA FINAL).

ACKNOWLEDGEMENTS

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica de Bolívar, ADVAN R&D y a CENIT su soporte para adelantar el presente estudio.

REFERENCES

- [1] O.C. ZIENKIEWICZ, R. L. TAYLOR, J. Z. ZHU. The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals. Butterworth-Heinemann. 7ed. 2013.
- [2] J.C. SIMO, T.J.R. HUGHES. Computational Inelasticity. Springer, 1998.
- [3] Q. ZHENG, L. GRAF-ALEXIOU, Y. LI, N. YOOSEF-GHODSI, M. FOWLER, M. KAINAT, S. ADEEB. Strain Demand of Elastic Pipes Subjected To Permanent Ground Displacements Using The Finite Difference Method. Journal of Pipeline Science and Engineering 1 (2021) 176–186.
- [4] API, API 579-1/ASME FFS-1 2007 Fitness-For-Service, 2007.
- [5] A. LIU., S. TAKADA, Y. HU. A shell model with an equivalent boundary for buried pipelines under the fault movement. In: Proceedings of the 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004.
- [6] X. LIU, H. ZHANG, M. LI, M. XIA, W. ZHENG, K. WU, Y. HAN. Effects of steel properties on the local buckling response of high strength pipelines subjected to reverse faulting. J. Nat. Gas Sci. Eng. 33, 378–387, 2016.
- [7] I. L. YABLONSKIY, S. J. DAWSON, R. VENKATANARAYANAN. Assessment And Analysis Of Pipeline Buckles. Pipeline Solutions, Cramlington, 2007.
- [8] M. E. GURTIN, E. C. FRANCIS, Simple Rate-Independent Model for Damage, AIAA Journal, 23, 2012.