



MÁQUINAS HIDRÁULICAS
HYDRAULIC MACHINES



<http://opn.to/a/CXaF4>

ORIGINAL ARTICLE | ARTÍCULO ORIGINAL

Influence of Temperature in Sandwich Pipes Subjected to High Pressures

Influencia de la temperatura en ductos compuestos sometidos a altas presiones

MSc. Dayvis Fernández Valdés^I, Dr. Alberto Omar Vázquez Hernández^{II}, Dr. José Angel Ortega-Herrera^I, MSc. Minelkis Machado Molina^{III}, Dr. Arturo Ocampo Ramirez^{IV}

^ISEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México.

^{II}Lloyds Register, Ciudad de México, México.

^{III}Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba.

^{IV}Unidad de Simulación e Ingeniería Mecánica Estructural – GrupoSSC, Ciudad de México, México.

ABSTRACT. Nowadays, there is a great global development of infrastructure for the extraction, exploitation and transport of hydrocarbons in deep-waters, due to the decrease of existing resources in shallow waters. The objective of this research is to propose a sandwich pipe with thermal insulation, capable to operate in deep water under the effect of the thermal gradient that occurs at these depths and flow assurance guaranteeing. This is also of great importance in agriculture for irrigation with groundwater, where it is necessary to guarantee the structural integrity of the pipelines that transport the fluid through land where high pressures and high temperatures may exist. Therefore, 4 sandwich pipes were analyzed in finite elements, considering high fluid temperatures and low seawater temperatures, as well as variations in the annular material (cement and polypropylene) and the thicknesses. It was obtained that the greater the thickness the lower the stiffness of the system. However, the thermal effect does not significantly influence the resistance of the pipes with greater core thickness, due to the thermal insulation offered by the annular material. The sandwich pipe with cement annular material offers greater potential to be implemented as it presented greater collapse pressure than the pipe with polypropylene.

Keywords: sandwich pipe, thermal gradient, finite elements.

RESUMEN. A nivel mundial se está presentando un gran desarrollo de infraestructura para la extracción, explotación y transporte de hidrocarburos en aguas profundas, debido a la disminución de los recursos existentes en aguas poco profundas. El objetivo de esta investigación se centra en poder proponer un ducto compuesto dotado de aislamiento térmico, capaz de operar en aguas profundas bajo el efecto del gradiente térmico que se produce a estas profundidades y garantizando el aseguramiento del flujo. Esto es de gran importancia también en la agricultura para el riego con aguas subterráneas, donde es necesario garantizar la integridad estructural de los ductos que transportan el fluido por terrenos en donde pueden existir altas presiones y altas temperaturas. Por lo que se analizaron en elementos finitos 4 ductos compuestos, teniendo en cuenta las altas temperaturas del fluido y las bajas temperaturas del agua de mar, así como variaciones en el material anular (cemento y polipropileno) y los espesores. Se obtuvo que a mayor espesor disminuye la rigidez del sistema. Sin embargo, el efecto térmico no influye significativamente en la resistencia de los ductos con mayor espesor del material anular, producto del aislamiento térmico que ofrece el material anular. El ducto compuesto con material anular de cemento ofrece mayor potencial para ser implementado ya que presentó mayor presión de colapso que el ducto con polipropileno.

Palabras clave: ducto compuesto, gradiente térmico, elemento finito.

*Author for correspondence: Arturo Ocampo Ramirez, e-mail: arturo.ocampo@gruposscc.com

Received: 15/07/2019.

Approved: 19/12/2019.

INTRODUCTION

Oil industry needs to venture into deep and ultra-deep waters, marking a new stage in oil development and boosting economic growth. For this reason, the generation of high potential technology is required to be implemented in these depths and to be able to access to new resources in a safe and efficient way.

In recent years, various studies have focused on sandwich pipes Kyriakides y Netto (2004); Kardomateas y Simitzes (2005); Arjomandi y Taheri (2010a, 2010b, 2011, 2012); Xu et al. (2016), These pipes equipped with thermal insulation, offer better flow assurance from the deposit to the production platforms and systems Netto et al. (2002), thus, the existing deficiencies of single wall pipes are overcome (Castello & Estefen, 2008). Therefore, it is vital to know the behavior of these pipelines, which will be exposed to severe operating conditions, since in deep water, the deposit fluids are warmer than the sea water, generating thermal shock (Su et al., 2003; Castello & Estefen, 2008; An et al., 2012, 2014).

It is of great importance for precision agriculture of high productivity, the study of the structural integrity of the pipelines used for irrigation with groundwater Llamas & Martínez (2005) and Paneque et al. (2018), because in their trajectory, they are exposed to different conditions such as terrain where high pressures and high temperatures may exist. Therefore, the knowledge of their behavior through an analytical and numerical model is very useful (Arjomandi & Taheri, 2011).

According to the above, the objective of this work is to investigate by means of finite element analysis the influence of the thermal gradient in the operation of the proposed sandwich pipes, considering different annular materials and variations in their thickness.

METHODS

Analytical Model of Critical Pressure (buckling pressure)

Based on Arjomandi & Taheri (2011), the critical pressure for the proposed sandwich pipes is calculated, using polypropylene annular material. This equation (1) is only applicable for soft cores and considers the imperfection existing in the sandwich pipes, as well as the annular thickness:

$$P_{cr} = kP_{crs} + E_p(1 + \alpha_1 v_c^2) \left(\frac{t_e}{R_e}\right)^{\alpha_2} (\psi_1 + \psi_2) \quad (1)$$

With

$$P_{crs} = \frac{E_p}{4(1-\nu_p^2)} \left(\frac{t_e}{R_e}\right)^3 \quad (2)$$

$$\psi_1 = \gamma_1 \left(\frac{E_c}{E_p}\right)^{\gamma_2} \left(1 - \frac{R_i}{R_e}\right)^{\gamma_3} \quad (3)$$

$$\psi_2 = \xi_1 \left(\frac{E_c}{E_p}\right)^{\xi_2} \left(1 - \frac{R_i}{R_e}\right)^{\xi_3} \left(\frac{t_l}{R_i}\right)^{\xi_4} \quad (4)$$

INTRODUCCIÓN

La industria petrolera necesita cada vez más incursionar en aguas profundas y ultraprofundas, marcando así una nueva etapa en el desarrollo petrolero e impulsando el crecimiento económico. Por tal motivo se requiere la generación de tecnología con alto potencial para ser implementada en estas profundidades y poder acceder a nuevos recursos de manera segura y eficiente.

En los últimos años diversos estudios han enfocado su atención en los ductos compuestos, entre ellos los de Kyriakides y Netto (2004); Kardomateas y Simitzes (2005); Arjomandi y Taheri (2010a, 2010b, 2011, 2012); Xu et al. (2016), los cuales al estar dotados de aislamiento térmico ofrecen un mejor aseguramiento del flujo desde el yacimiento hasta las plataformas y sistemas de producción según Netto et al. (2002), superando así las deficiencias existentes actualmente de las tuberías de una sola pared (Castello y Estefen, 2008). Por lo que resulta de vital importancia el tener conocimiento del comportamiento de dichos ductos, los cuales estarán expuestos a severas condiciones de operación, ya que en aguas profundas los fluidos del yacimiento son más calientes en comparación con la temperatura del agua de mar generándose el choque térmico (Su et al., 2003; Castello y Estefen, 2008; An et al., 2012, 2014).

Es de gran importancia a su vez para la agricultura de precisión de alta productividad el estudio de la integridad estructural de los ductos empleados para el riego con aguas subterráneas según Llamas y Martínez (2005) y Paneque et al. (2018), los cuales en su trayectoria están expuestos a diferentes condiciones como terrenos donde pueden existir altas presiones y altas temperaturas. Por lo tanto, resulta de gran utilidad el conocimiento de su comportamiento a través de un modelo analítico y numérico (Arjomandi y Taheri, 2011).

De acuerdo a lo planteado, el objetivo de este trabajo es investigar mediante análisis en elemento finitos la influencia del gradiente térmico en el funcionamiento de los ductos compuestos propuestos, considerando diferentes materiales anulares y variaciones en su espesor.

MÉTODOS

Modelo analítico de la presión crítica

Con base en Arjomandi y Taheri (2011), se calcula la presión crítica para los ductos compuestos propuestos, con material anular de polipropileno. Esta ecuación solo es aplicable para núcleos blandos y considera la imperfección existente en el ducto, así como el espesor anular:

$$P_{cr} = kP_{crs} + E_p(1 + \alpha_1 v_c^2) \left(\frac{t_e}{R_e}\right)^{\alpha_2} (\psi_1 + \psi_2) \quad (1)$$

con

$$P_{crs} = \frac{E_p}{4(1-\nu_p^2)} \left(\frac{t_e}{R_e}\right)^3 \quad (2)$$

$$\psi_1 = \gamma_1 \left(\frac{E_c}{E_p}\right)^{\gamma_2} \left(1 - \frac{R_i}{R_e}\right)^{\gamma_3} \quad (3)$$

Where P_{cr} is the critical pressure (buckling pressure) for the sandwich pipes, P_{crs} is the external pipe buckling pressure, k , α , γ , ξ are constants calculated in Arjomandi & Taheri (2011), used to obtain the pipeline pressure.

These constants were obtained through a numerical model using Matlab and the restricted nonlinear regression algorithm recommended by Gill et al. (1986), with a sequential quadratic programming method. Parameters ψ_1 and ψ_2 represent the effect of the core and internal pipeline, respectively, E_p and E_c are the elastic modulus of steel and annular material, respectively, ν_p and ν_c are Poisson's ratio, t_e and t_i are external and internal thickness of steel and R_e and R_i are external and internal radius of the steel pipelines.

Numerical Simulation

In order to know the behavior of sandwich pipes before the effect of temperature in deep and ultra-deep waters, modeling was performed through the Finite Element Method. Four X-60 steel sandwich pipes were analyzed, for which dimensions and annular material were varied (polypropylene (PP) and cement). The analyzed pipeline model was reduced to a two-dimensional model without losing accuracy according to Estefen et al. (2005 y Chen et al. (2013), meanwhile computational costs were reduced. The objective is to propose to the oil industry a sandwich pipe with the required dimensions and the most feasible annular material, according to the severe operating conditions at these depths (Table 1).

$$\psi_2 = \xi_1 \left(\frac{E_c}{E_p} \right)^{\xi_2} \left(1 - \frac{R_i}{R_e} \right)^{\xi_3} \left(\frac{t_i}{R_i} \right)^{\xi_4} \tag{4}$$

donde;

P_{cr} es la presión crítica del ducto compuesto, k , α , γ , ξ son constantes calculadas en Arjomandi y Taheri (2011), usadas para obtener la presión del ducto.

Estas constantes se obtuvieron mediante un modelo numérico empleando Matlab y el algoritmo de regresión no lineal restringido recomendado por Gill et al. (1986), con un método de programación cuadrática secuencial. Los parámetros ψ_1 y ψ_2 representan el efecto del núcleo y el ducto interno respectivamente, E_p y E_c es el Módulo de Elasticidad del acero y el material anular respectivamente, ν_p y ν_c relación de Poisson, t_e y t_i , el espesor externo e interno del acero, R_e y R_i el radio del acero.

Simulación numérica

Para conocer el comportamiento de ductos compuestos ante el efecto de la temperatura en aguas profundas y ultra profundas, se realizó la modelación a través del Método de Elementos Finitos. Se analizaron 4 ductos compuestos de acero X-60, variándose dimensiones y material anular (polipropileno (PP) y cemento). El modelo del ducto analizado se redujo a un modelo en dos dimensiones sin perder exactitud según Estefen et al. (2005 y Chen et al. (2013), lográndose a su vez reducir los costos computacionales. El objetivo es proponer a la industria

TABLE 1. Sandwich pipes dimensions
TABLA 1. Dimensiones de los ductos compuestos

	Sandwich pipe with PP annular material		Sandwich pipe with cement annular material	
Dimensions (mm)	I PP	II PP	I C	II C
External diameter	359	359	359	359
Internal diameter	290	290	290	290
Internal thickness	14	5.5	14	5.5
External thickness	14	5.5	14	5.5
Annular thickness	6.5	23.5	6.5	23.5

The sandwich pipes are composed of two layers of X-60 steel and an annular material (Figure 1).

petrolera un ducto compuesto con las dimensiones requeridas y el material anular más factible, de acuerdo a las severas con-

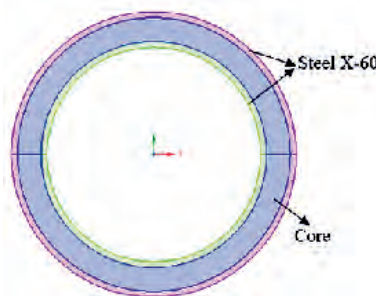


FIGURE 1. Sandwich pipe model.
FIGURA 1. Modelo del ducto compuesto.

The mechanical properties according to Estefen *et al.* (2005); Castello & Estefen (2008); Castello (2011) and thermal properties according to (Xu & Chung, 2000; Castello & Estefen, 2008), used for the numerical analysis of sandwich pipes are shown in Table 2, for each material.

diciones de operación en estas profundidades (Tabla 1).

Los ductos están compuestos por dos capas de acero X-60 y un material anular (Figura 1).

Las propiedades mecánicas según Estefen *et al.* (2005); Castello y Estefen (2008); Castello (2011) y térmicas, según

TABLE 2. Properties of the materials
TABLA 2. Propiedades de los materiales

Properties	X-60 Steel (Multilinear Isotropic Hardening Model)	PP (Hiperelastic Arruda-Boyce Model)	Cement (Isotropic Hardening Model)
Elastic modulus (GPa)	206	-	5.78
Poisson's ratio	0.3	-	0.15
Density (kg/m ³)	7850	700	1666
Thermal conductivity (W/ m°C)	54	0.17	0.53

Perfect adhesion between the steel layers and the annular material through joined contact elements, which do not allow the separation of the layers, was considered. Two types of elements were used: a) CONTA172 contact elements and b) TARGE169 type elements.

(Xu y Chung, 2000; Castello y Estefen, 2008) empleadas para el análisis numérico de los ductos compuestos se muestran en la Tabla 2, para cada material.

Se consideró perfecta adhesión entre las capas de acero y el material anulara través de elementos de contacto unidos, que no permiten la separación de las capas. Se emplearon 2 tipos de elementos; a) elementos de contacto, CONTA172 y b) elementos tipo TARGE169.

Boundary conditions were applied such as the restriction of movement on the y-axis, allowing the free x-axis, as the first condition and the second condition was the restriction of movement of the x-axis, allowing the y-axis free. The axial compression load, referring to the external pressure was applied over the entire outer surface of the sandwich pipe (Figure 2). With this, it is possible to obtain the collapse pressure. Finally, temperatures were applied, external (4°C) and internal (90°C), according to Castello & Estefen (2008)) and the stress-strain curves of each material, according to Souza *et al.* (2007), were used for the correct simulation.

Se aplicaron condiciones de frontera como la restricción de movimiento en el eje y, permitiendo el eje x libre, como primera condición y la segunda condición fue la restricción de movimiento del eje x, permitiendo el eje y libre. La carga de compresión axial referente a la presión externa fue aplicada sobre toda la superficie exterior del ducto compuesto (Figura 2). Con esto es posible obtener la presión de colapso. Finalmente se aplicaron las temperaturas, externa (4°C) e interna (90°C) según

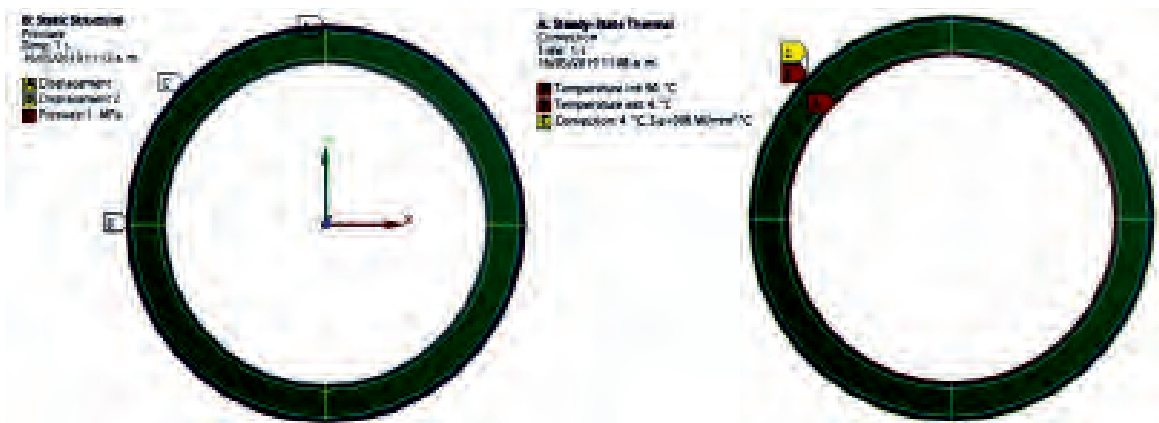


FIGURE 2. Boundary conditions applied to sandwich pipes for simulation
FIGURA 2. Condiciones de frontera aplicadas a los ductos compuestos para la simulación.

The generation of a suitable mesh is a decisive factor in the simulation (Figure 3), to obtain reliable results, for this, the second order Plane 183 element was defined, which has the ability to be hyper elastic.

Castello y Estefen (2008) y se emplearon las curvas de esfuerzo-deformación de cada material según Souza *et al.* (2007), para la correcta simulación.

La generación de una adecuada malla es un factor decisivo



FIGURE 3. Sandwich pipe mesh.
FIGURA 3. Malla del ducto compuesto.

RESULTS AND DISCUSSION

Results of Thermal Analysis

The temperature profile was obtained for each sandwich pipe with each annular material analyzed (Figures 4 and 5), observing that for the PP the temperature in the external pipe decreases more than in the case of the sandwich pipe with cement. The temperature decreases (from the inner pipe to the outer pipe) as the thickness increases (Souza et al., 2007; Castello & Estefen, 2008).

en la simulación (Figura 3), para obtener resultados confiables, para esto se definió el elemento Plane 183 de segundo orden, el cual experimenta gran hiperelasticidad y grandes deformaciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del análisis térmico

Se obtuvo el perfil de temperatura para cada ducto compuesto con cada material anular analizado (Figuras 4 y 5), observándose que para el PP disminuye más la temperatura

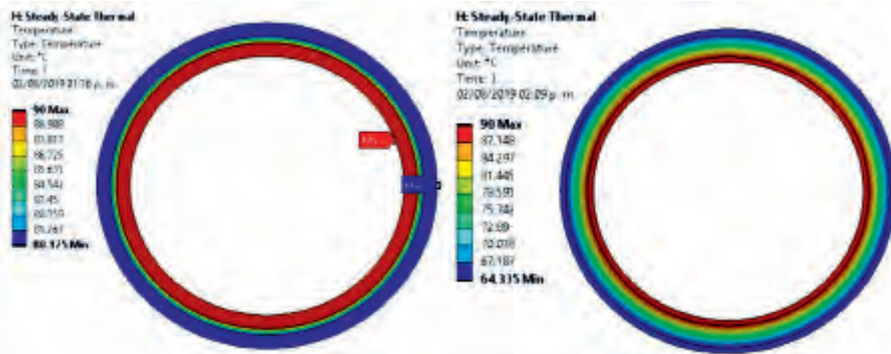


FIGURE 4. Temperature profile for the IPP and IIPP pipelines, respectively.
FIGURA 4. Perfil de temperatura para los ductos IPP y IIPP respectivamente.

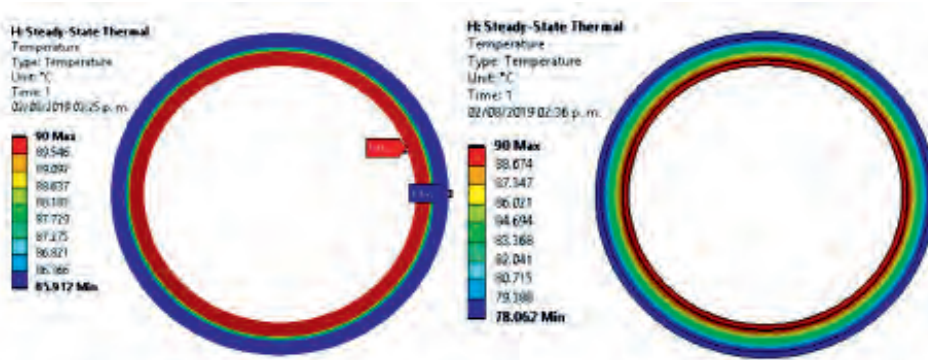


FIGURE 5. Temperature profile for the IC and IIC pipelines, respectively.
FIGURA 5. Perfil de temperatura para los ductos IC y IIC respectivamente.

Numerical Results of the Collapse Pressure under the Effect of Temperature

Figures 6 and 7 show the results of thermal analysis and buckling for the sandwich pipes analyzed. The collapse pressure was obtained for each sandwich pipe, under the influence of a thermal gradient. Figure 6 shows the sandwich pipes with polypropylene annular material, observing that, with the increase of the annular thickness and the decrease of the layers of steel, a decrease of the collapse pressure is generated.

en el ducto externo que para el caso del ducto compuesto con cemento. La temperatura disminuye (del ducto interno al ducto externo) a medida que el espesor aumenta (Souza *et al.*, 2007; Castello y Estefen, 2008).

Resultados numéricos de la presión de colapso bajo el efecto de la temperatura

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados del análisis térmico y de pandeo para los ductos compuestos analizados. Se obtuvo

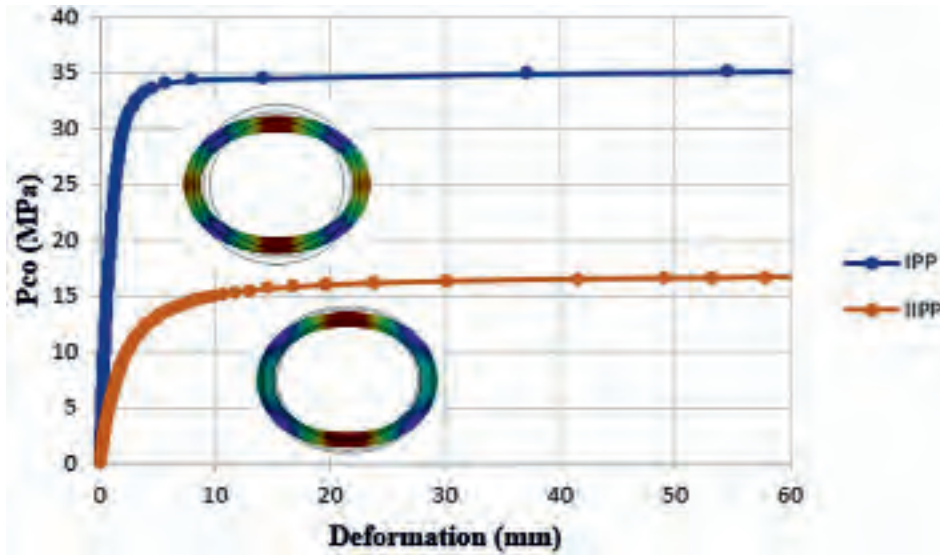


FIGURE 6. Collapse pressure under the thermal gradient for the IPP and IIPP pipelines, respectively.
 FIGURA 6. Presión de colapso bajo el gradiente térmico para los ductos IPP y IIPP respectivamente.

In the case of sandwich pipes with cement annular material (Figure 7), a behavior similar to that of sandwich pipe with polypropylene was obtained, where the influence of the increase in annular thickness on the decrease in collapse pressure become remarkable once again.

la presión de colapso, bajo la influencia de un gradiente térmico. En la Figura 6 se muestran los ductos compuestos con material anular de polipropileno, observándose que con el aumento del espesor anular y la disminución de las capas de acero se genera una disminución de la presión de colapso.

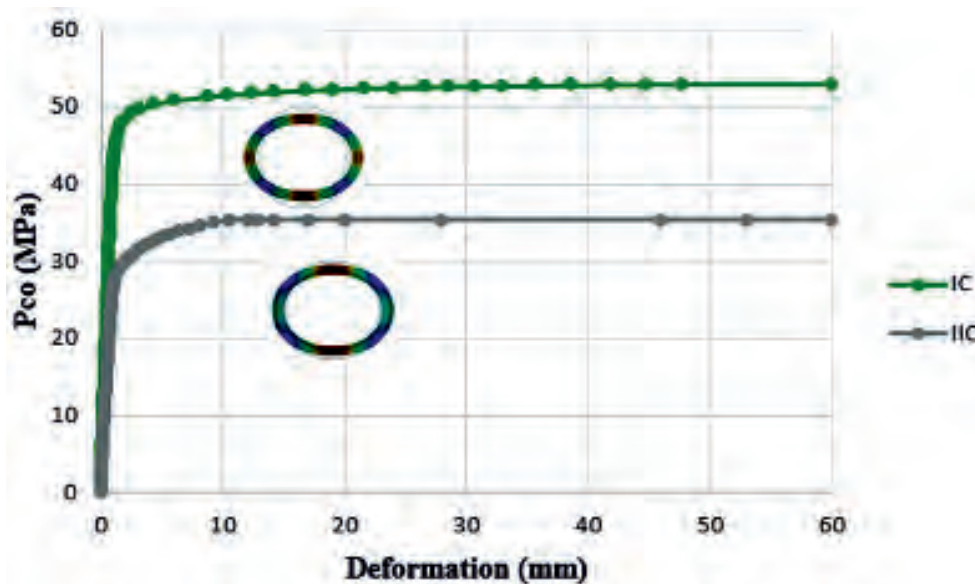


FIGURE 7. Collapse pressure under the thermal gradient for the IC and IIC pipelines, respectively.
 FIGURA 7. Presión de colapso ante el gradiente térmico para los ductos IC y IIC respectivamente.

According to the results obtained, the sandwich pipes with cement annular material have higher collapse pressure and, in turn, more stiffness than the polypropylene pipes, since the latter is less resistant to thermal gradient than cement (Castello & Estefen, 2008). Based on these results, it can be established that the cement pipeline offers greater potential for operation in ultra-deep water for a thin annular material as for a greater thickness.

Comparison of Collapse Pressure (buckling pressure) Results

In order to know the effect of temperature on the collapse pressure, the sandwich pipes with and without the effect of the thermal gradient were also analyzed in finite elements (Figure 8).

de cemento (Figura 7) se obtuvo un comportamiento similar al de los ductos con polipropileno, haciéndose notable una vez más la influencia del aumento del espesor anular en la disminución de la presión de colapso.

De acuerdo a los resultados obtenidos, los ductos compuestos con material anular de cemento presentan mayor presión de colapso y a su vez mayor rigidez que los ductos con polipropileno, puesto que este último es menos resistente a gradiente térmico que el cemento (Castello y Estefen, 2008). Con base en estos resultados se puede establecer que el ducto con cemento ofrece mayor potencial para la operación en aguas profundas tanto para un material anular delgado como para un mayor espesor.

Comparación de los resultados de la presión de colapso

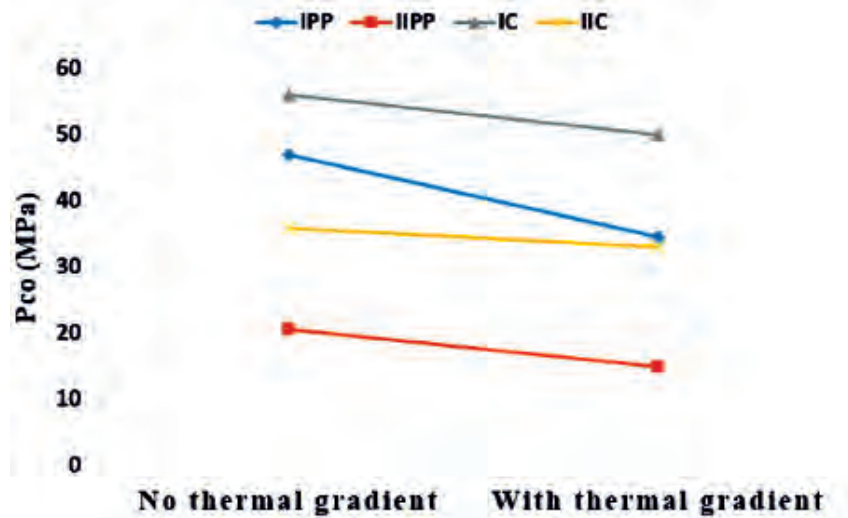


FIGURE 8. Collapse pressure comparison under thermal gradient.
 FIGURA 8. Comparación de la presión de colapso bajo gradiente térmico.

In this way, it was possible to compare and observe the difference in the behavior of the collapse pressure (Table 3). The thermal gradient generates a decrease in the collapse pressure in the four sandwich pipes analyzed, resulting in vulnerability in its resistance (Souza et al., 2007). However, despite the effect of temperature, sandwich pipes provide better performance than single wall pipes (Souza et al., 2007). It was obtained that, for the pipes with greater core thickness, the temperature influenced in a smaller proportion the results of collapse pressure, probably achieving with this technology the flow assurance, due to the benefits offered by the thermal insulation.

Con el objetivo de conocer el efecto de la temperatura en la presión de colapso, se analizaron además en elementos finitos los ductos compuestos con y sin el efecto del gradiente térmico (Figura 8).

De esta forma se pudo comparar y observar la diferencia en el comportamiento de la presión de colapso (Tabla 3). El gradiente térmico genera una disminución en la presión de colapso en los cuatro ductos compuestos analizados, obteniéndose con esto vulnerabilidad en su resistencia (Souza et al., 2007). Sin embargo, a pesar del efecto de la temperatura los ductos compuestos brindan mejor rendimiento que los ductos simples (Souza et al., 2007). Se obtuvo que para los ductos con mayor espesor la temperatura influyera en menor proporción en los

TABLE 3. Collapse pressure comparison
 TABLA 3. Comparación de la presión de colapso

Model	Pco (MPa)	
	No thermal gradient	With thermal gradient
IPP	47	34.5
IIPP	20.5	14.8
IC	56	50
IIC	35.8	33

Comparison of Analytical and Numerical Results

The critical pressure of each polypropylene sandwich pipe was calculated through Equation 1. It was compared to the numerical results and similar values were obtained for both cases (Table 4).

resultados de presión de colapso, lográndose probablemente con esta tecnología el aseguramiento del flujo, producto de los beneficios que ofrece el aislamiento térmico.

Comparación de los resultados analíticos y numéricos

TABLE 4. Comparison of analytical and numerical results
TABLA 4. Comparación de resultados analíticos y numéricos

Model	Pcrit (MPa)	
	Analytical (Equation 1)	Numeric (Finite Element)
IPP	200.97	200.15
IIPP	108	107.32

CONCLUSIONS

- The sandwich pipes were analyzed by finite element under the effect of the thermal gradient and taking into account variations in the annular material and its thickness. The stiffness of the system is affected due to the thermal shock generated in deep water. Numerical and analytical analyses threw similar results, both for deep-water applications and for irrigation with groundwater. With the increase in the annular thickness, both, in the case of cement and polypropylene, a decrease in collapse pressure occurs. It was also obtained that the sandwich pipes with cement core present greater resistance than the pipes with polypropylene before the operating conditions analyzed. The polypropylene sandwich pipe with greater annular thickness does not meet the requirements to be implemented in deep water. For this reason, it can be argued that the sandwich pipe of cement annular material, despite also presenting a decrease in stiffness, offers high potential to be implemented in deep and ultra-deep waters. With the thermal insulation provided by sandwich pipes technology, the existing deficiencies in the oil industry in single wall pipes are overcome.

La presión crítica de cada ducto compuesto con polipropileno fue calculada a través de la Ecuación 1 y comparada con los resultados numéricos, obteniéndose valores similares para ambos casos (Tabla 4).

CONCLUSIONES

- Los ductos compuestos fueron analizados mediante elemento finito bajo el efecto del gradiente térmico y teniendo en cuenta variaciones en el material anular y en su espesor. La rigidez del sistema se ve afectada producto del choque térmico que se genera en aguas profundas. Los análisis numéricos y analíticos arrojaron resultados similares, tanto para aplicaciones en aguas profundas como para el riego con aguas subterráneas. Con el aumento del espesor anular, tanto para el caso del cemento como para el polipropileno, se produce una disminución de la presión de colapso. Se obtuvo además que los ductos compuestos con núcleo de cemento presentan mayor resistencia que los ductos con polipropileno ante las condiciones de operación analizadas. El ducto compuesto de polipropileno con mayor espesor anular no cumple con los requisitos para ser implementado en aguas profundas. Por tal motivo se puede plantear que el ducto

REFERENCES/REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AN, C.; CASTELLO, X.; DUAN, M.; TOLEDO FILHO, R.D.; ESTEFEN, S.F.: "Ultimate strength behaviour of sandwich pipes filled with steel fiber reinforced concrete", *Ocean Engineering*, 55: 125-135, 2012, ISSN: 0029-8018.
- AN, C.; DUAN, M.; TOLEDO FILHO, R.D.; ESTEFEN, S.F.: "Collapse of sandwich pipes with PVA fiber reinforced cementitious composites core under external pressure", *Ocean Engineering*, 82: 1-13, 2014, ISSN: 0029-8018.
- ARJOMANDI, K.; TAHERI, F.: "Buckling capacity of bonded and unbounded sandwich pipes under external hydrostatic pressure", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 5(3): 391-408, 2010a, ISSN: 1559-3959.
- ARJOMANDI, K.; TAHERI, F.: "Elastic buckling capacity of bonded and unbounded sandwich pipes under external hydrostatic pressure", *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, 5(3): 391-408, 2010b, ISSN: 1559-3959.
- ARJOMANDI, K.; TAHERI, F.: "Stability and post-buckling response of sandwich pipes under hydrostatic external pressure", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 88(4): 138-148, 2011, ISSN: 0308-0161.
- ARJOMANDI, K.; TAHERI, F.: "Bending capacity of sandwich pipes", *Ocean Engineering*, 48: 17-31, 2012, ISSN: 0029-8018.
- CASTELLO, X.: *Influência da Adesão entre Camadas na Resistência ao Colapso de Dutos Sanduíche*, Inst. COPPE/UFRJ, Brasil, 2011.
- CASTELLO, X.; ESTEFEN, S.: "Sandwich Pipes for Ultra Deepwater Applications", En: *Offshore Technology Conference, USA, 2008*, ISBN: 978-1-60560-163-2.
- CHEN, A.; MENGLAN, D.; ESTEFEN, F.: *Collapse and Buckle Propagation of Sandwich Pipes*, Inst. OMAE, USA, 2013.
- ESTEFEN, S.; NETTO, T.; PASQUALINO, I.: "Strength analyses of sandwich pipes for ultra deepwaters", *Journal of Applied Mechanics-Transactions of the ASME*, 72(4): 599-608, 2005, ISSN: 00218936.

- GILL, P.E.; MURRAY, W.M.; SAUNDERS, M.A.: User's guide for NPSOL (version 4.0): FORTRAN package for nonlinear programming, Technical Report SOL 86-2, Inst. Stanford University: Department of Operations Research, Technical Report SOL 86-2, USA, 1986.
- KARDOMATEAS, G.; SIMITSES, G.: "Buckling of long sandwich cylindrical shells under external pressure", Journal of Applied Mechanics, 72(4): 493-499, 2005, ISSN: 0021-8936.
- KYRIAKIDES, S.; NETTO, T.: "On the dynamic propagation and arrest of buckles in pipe-n-pipe systems", International Journal of Solids and Structures, 41(2): 5463-5482, 2004, ISSN: 0020-7683.
- LLAMAS, M.R.; MARTÍNEZ, S.P.: "Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts", ASCE Journal Water Resources Planning & Management, 131: 337-341, 2005, ISSN: 0733-9496, ISSN (online): 1943-5452.
- NETTO, T.; SANTOS, J.; ESTEFEN, S.: "Sandwich Pipes For Ultra-Deep Waters", En: 4th International Pipeline Conference, Canada, 2002, ISBN: 0-7918-3620-7.
- PANEQUE-RONDÓN, P.; LÓPEZ-CANTEÑS, G.; MAYANS-CÉSPEDES, P.; MUÑOZ-GÓMEZ, F.; GAYTÁN-RÚELAS, J.G.; ROMANTCHIK-KRIUCHKOVA, E.: Fundamentos Teóricos y Análisis de Máquinas Agrícolas, Ed. Universidad Autónoma Chapingo, vol. 1, Chapingo, Texcoco, México, 456 p., 2018, ISBN: 978-607-12-0532-2.
- SOUZA, A.R.; NETTO, T.A.; PASQUALINO, I.P.: "Materials selection for Sandwich Pipes under the combined effect of pressure, bending and temperature", En: 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Proceedings of OMAE'07, USA, 2007, ISBN: 10: 0791842673.
- SU, J.; CERQUEIRA, D.R.; ESTEFEN, S.F.: "Thermal Analysis of Sandwich Pipes with Active Electrical Heating", En: 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE'03), México, 2003, ISBN: 0-7918-3672-X.
- XU, F.; CHUNG, D.L.: "Effect of sand addition on the specific heat and thermal conductivity of cement", Cement and Concrete Research, 30: 59-61, 2000, ISSN: 0008-8846.
- XU, Q.; GONG, S.; HU, Q.: "Collapse analyses of sandwich pipes under external pressure considering inter-layer adhesion behavior", Marine Structures, 50: 72-94, 2016, ISSN: 0951-8339.

Dayvis Fernández Valdés, doctorante de SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, e-mail: dayvis86@hotmail.com

Alberto Omar Vázquez Hernández, investigador, Lloyds Register, Ciudad de México, México, e-mail: aovh2005@gmail.com

José Angel Ortega-Herrera, investigador, de SEPI-ESIME, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México, e-mail: ortegaherreraangel@gmail.com

Minelkis Machado Molina, doctorante, profesora, Universidad Agraria de La Habana, Facultad de Ciencias Técnicas, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, e-mail: minelkis_machado@unah.edu.cu

Arturo Ocampo Ramírez, investigador, Unidad de Simulación e Ingeniería Mecánica Estructural-GrupoSSC, Ciudad de México, México, e-mail: arturo.ocampo@gruposscc.com

The authors of this work declare no conflict of interests.

This item is under license Reconocimiento-NoComercial de Creative Commons 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0).

The mention of trademarks of specific equipment, instruments or materials is for identification purposes, there being no promotional commitment in relation

