

MODELO “FINITE ELEMENT METHOD” (FEM) PARA EL COLAPSO DE “LINERS” TERMOPLÁSTICOS

Federico Rueda^a, Patricia Frontini^b, José Luis Otegui^c

*INTEMA - Universidad Nacional de Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina,
^afederico.rueda@fi.mdp.edu.ar, ^bpfronti@fi.mdp.edu.ar, ^cjotegui@fi.mdp.edu.ar*

Palabras clave: HDPE, liner, buckling, colapso, “Finite Element Method” (FEM)

Resumen. La utilización de “liners” termoplásticos en la industria petrolera es una técnica ampliamente utilizada como método de protección anti-corrosión o para la rehabilitación de cañerías existentes dañadas. A altas presiones de operación los polímeros disuelven gases (CO₂ y CH₄) del crudo, que irremediablemente permean a través del espesor del tubo termoplástico. Esto genera que luego de un tiempo de servicio los “liners” puedan colapsar por presión externa en ejercicios obligatorios de descompresión durante períodos de revisión del sistema de tuberías. Existen ecuaciones que predicen la presión de colapso para una tubería confinada, sometida a presión externa. Estos modelos analíticos o semi-analíticos, están basados en modelos constitutivos sencillos: elástico y elastoplástico ideal. Además de las limitaciones relacionadas con el modelado del material, no permiten reproducir la curva experimental de presión. Tampoco permiten evaluar la influencia sobre la presión de colapso, de defectos superficiales o geométricos, siempre presentes en componentes reales. Por otro lado, existen modelos con “Finite Element Method” (FEM) sencillos que presentan divergencias en la solución al acercarse a la presión crítica de colapso, por lo cual, no permiten reproducir de forma completa la curva experimental de presión. Existen otros trabajos que utilizan “Finite Element Method” (FEM) con el método de Riks, para solucionar este problema. Si bien es un método muy efectivo se basa en la asunción de una situación estática en equilibrio. Esto no representa mayores problemas en el caso de materiales de uso estructural clásicos como el acero. En el caso de materiales poliméricos cuyas ecuaciones constitutivas son altamente dependientes de la velocidad de sollicitación es necesario simular el colapso en una situación dinámica.

En el presente trabajo se modeló el colapso por presión externa de un “liner” de “High Density Polyethylene” (HDPE) aplicando “Finite Element Method” (FEM) con el método de Riks y con elementos hidrostáticos, metodología no encontrada hasta el momento en la literatura. La utilización de este tipo de elementos, permitiría modelar situaciones dinámicas y considerar ecuaciones constitutivas dependientes del tiempo.

Los resultados al aplicar elementos hidrostáticos en una simulación estática del sistema fueron contrastados con los resultados de Riks y con los modelos analíticos de Glock y Jacobsen para distintas relaciones espesor-diámetro (t/D). Los resultados con elementos hidrostáticos para un “liner” sin defectos y con un modelo constitutivo elastoplástico ideal, resultaron coherentes con las presiones de colapso calculadas con los métodos analíticos y por el método de Riks. Esto permitió ampliar el modelo a casos con distintos modelos constitutivos.

Luego de validar la aplicación de elementos hidrostáticos con los modelos analíticos y con “Finite Element Method” (FEM) ya utilizados con un sistema estático, el trabajo a futuro es ampliar la simulación a un modelo dinámico con una ecuación constitutiva dependiente del tiempo que represente mejor el comportamiento real del “High Density Polyethylene” (HDPE). Se está trabajando también en la validación experimental del modelo.

1 INTRODUCCIÓN

En general las tuberías de protección interna o “liners” han tenido dos aplicaciones ingenieriles principales: como método de protección anti-corrosión en el transporte de agentes químicos agresivos o para la rehabilitación de cañerías existentes dañadas. La técnica de rehabilitación se conoce como “relining” y fue desarrollada primeramente en Europa y América del norte para la rehabilitación de cañerías de agua (HR-370 Pipe Rehabilitation With Polyethylene Pipe Liners, report). Luego de un cierto tiempo en servicio los “liners” suelen fallar durante la descompresión rápida de las tuberías que se produce en los períodos obligatorios de revisión de las mismas (Canadian Standards Association CSA Z662-03 Oil & Gas Pipeline Systems standard) ocasionando grandes pérdidas económicas. Existen estudios recientes que intentan dilucidar las causas de falla de "liners" con el lógico fin de evitarlas (Lebsack and Dorwin, 2004; Szklarz, Baron and Baron, 2004; Goerz, Simon and Little, 2004)

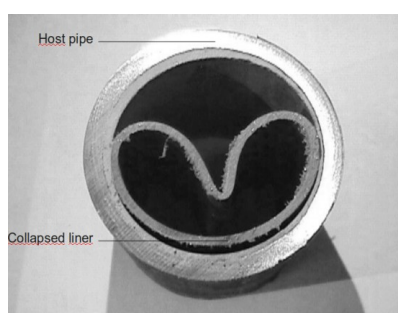


Figura 1. Perfil colapsado

A las altas presiones de operación los polímeros disuelven los gases (CO_2 y CH_4) que vienen disueltos en el crudo. Los mismos permean irremediamente a través de la pared termoplástica hinchada alcanzando el equilibrio entre la presión interna del caño y la presión anular. De acuerdo a estas consideraciones, luego de una despresurización el “liner” se ve sometido a esfuerzos generados por un exceso de presión en la cavidad anular que pueden producir el colapso del “liner” por “buckling” (pandeo radial, Figura 1) entre otros tipos de falla (Mason and Alkire, 2000; Boot and Naqvi, 2000; Genoni, Bulleri and Ticci, 2004).

Existen modelos analíticos que permiten calcular la presión crítica a la cual se produce el colapso elástico por “buckling” de un tubo restringido y sometido a presión externa. Este es el caso de Glock (1977) (Glock, 1977), que se basó en el principio de mínima energía potencial y la teoría de deformación no-lineal para desarrollar su solución:

$$P_{cr} = \frac{E}{1-\nu^2} \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^{2,2} \quad (1)$$

Donde E es el módulo elástico del material, ν es el coeficiente de Poisson, t y D son el espesor y el diámetro de la tubería respectivamente.

Este modelo no considera que el material pueda deformar plásticamente, se basa en un modelo elástico. Esto significa que es de utilidad en tuberías de espesor delgado, que fallan por pandeo elástico antes que por fluencia. Un modelo semi-analítico que considera la fluencia del material, es el modelo de Jacobsen (1974) (Jacobsen, 1974) dado por el siguiente sistema de ecuaciones (2-4):

$$\frac{R}{t} = \sqrt{\frac{\left(\frac{9\pi}{4\beta^2}\right) \cdot \left[\pi - \alpha + \beta \cdot \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta}\right)^2\right]}{12 \cdot \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta}\right)^3 \cdot \left[\alpha - \pi \cdot K - \beta \cdot \frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta} \cdot \left(1 + \frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{4}\right)\right]}} \quad (2)$$

$$\frac{P}{E'} = \frac{\frac{9\pi^2}{4\beta^2} - 1}{12 \left(\frac{R}{t}\right)^3 \cdot \left(\frac{\text{sen}\alpha}{\text{sen}\beta}\right)^3} \quad (3)$$

$$\frac{\sigma}{E'} = \frac{t}{2 \cdot R} \left(1 - \frac{\text{sen}\beta}{\text{sen}\alpha}\right) + \frac{P \cdot R \cdot \text{sen}\alpha}{E' \cdot t \cdot \text{sen}\beta} \cdot \left[1 + \frac{4 \alpha R \text{sen}\alpha \tan(\alpha - \beta)}{\pi t \text{sen}\beta}\right] \quad (4)$$

Donde E' es la relación $E/(1-\nu^2)$, ν es el coeficiente de Poisson, t y R son el espesor y el radio de la tubería respectivamente, σ es la tensión de fluencia, P es la presión de colapso y α y β son parámetros geométricos.

Este modelo considera que la presión crítica es aquella en la cual el “liner” alcanza la tensión de fluencia en algún punto del material (El-Sawy, 2001). Si bien el modelo es recomendado para el diseño de “liners” metálicos (Massimo Genoni, B. Bulleri and A. Ticci, 2004) hay que considerar que en el caso de tuberías de espesor delgado que tienden a fallar por pandeo antes de alcanzar la tensión de fluencia, podría dar una presión crítica mayor que la real. Por otro lado, en el caso de tuberías de gran espesor, donde la fluencia ocurre antes que el “buckling” la presión de colapso por pandeo del modelo puede ser menor que la real.

K.M. El-Sawy (Boot and Naqvi, 2000), se basó en un análisis de FEM, para poder determinar si el “liner” colapsará elásticamente o no elásticamente:

$$\frac{\sigma_y}{E} = 1.45 \left(\frac{t}{D}\right) + 3.93 \left(\frac{t}{D}\right)^2 \quad (5)$$

La ecuación (5) determina el límite entre los dos tipos de colapso, respecto de las relaciones t/D y σ_y/E .

Tanto el modelo de Jacobsen como el de Glock, consideran que el colapso es de un solo lóbulo, es decir que la forma final del perfil del tubo colapsado tiene un solo lóbulo, como el que se muestra en el caso real de la figura 1. Esto se debe a que este modo de falla es el más crítico.

Además de presentar las limitaciones previamente descritas, estos modelos analíticos no son versátiles al momento de analizar la influencia de defectos geométricos o superficiales presentes en una situación real. Por otro lado, están limitados a considerar al material como un sólido hookeano o elasto-plástico ideal, no son capaces de modelar el comportamiento mecánico con las ecuaciones constitutivas que correspondan a cada caso particular.

En el presente trabajo, se generó un modelo en FEM con el fin de validar la metodología y poder extenderla a casos reales. La comparación de los resultados fue con modelos analíticos, como trabajo futuro se realizarán comparaciones con resultados experimentales.

2.1 Modelo FEM

Se buscó reproducir el colapso de “liners” poliméricos en presencia de presión externa a partir de un modelo FEM. La validación del modelo, en principio, se realizó comparando los resultados con los modelos analíticos o semi-analíticos previamente descritos.

El “liner” fue modelado con elementos cuadriláteros de orden cuadrático de 8 nodos en deformación plana (CPE8R), dado que en problemas con un alto contenido de flexión, es recomendable usar funciones cuadráticas y no lineales. El tubo receptor o “host” fue modelado como una superficie analítica en ciertos casos o como un rígido discreto en otros. Este tipo de consideraciones se hacen partiendo de la base de que el tubo receptor de acero enterrado tiene una rigidez prácticamente infinita comparada con el módulo del HDPE.

En cuanto al contacto entre la superficie exterior del “liner” y la interior del tubo receptor, se modeló considerando el comportamiento tangencial y normal. El comportamiento tangencial se modeló como un sistema sin fricción y el comportamiento normal como un elástico lineal con un módulo de un orden de magnitud mayor al del material.

Se pueden diferenciar tres grandes formas de planteo del problema por FEM:

2.1.1 Modelo Estático General

Este modelo es el de mas sencilla aplicación. El método consiste en aplicar una presión creciente sobre el “liner”. A medida que la carga crece, el perfil se deforma hasta colapsar. Este método aunque fue utilizado en otros trabajos (Gerard, Dang and Mason, 2004), la desventaja está su inestabilidad de cálculo en el “post buckling” y en que nunca puede reproducir de forma correcta la curva presión deformación real completa (Figura 2). Esta imposibilidad se relaciona con que la presión se impone de forma linealmente creciente. En el caso real, la presión es una función del volumen de gas contenido en el ánulo entre el “liner” y el tubo receptor.

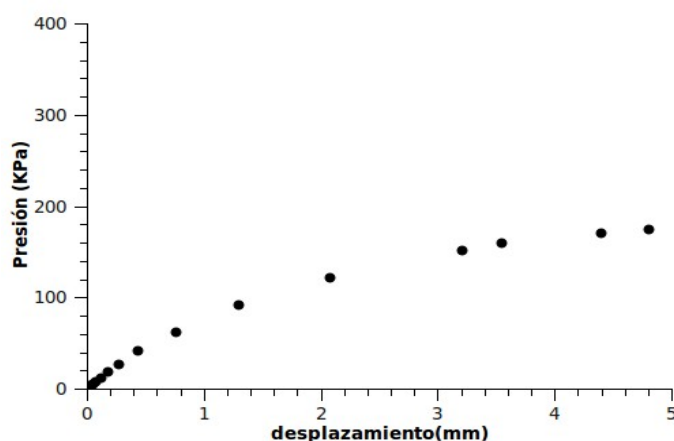


Figura 2. Simulación de colapso sin descenso en la presión.

Las curvas reales de presión vs. deformación (Figura 3) presentan una caída al momento del colapso, dado que el volumen del ánulo crece repentinamente disminuyendo la presión abruptamente. Este es el momento de colapso, visto como un máximo en la curva.

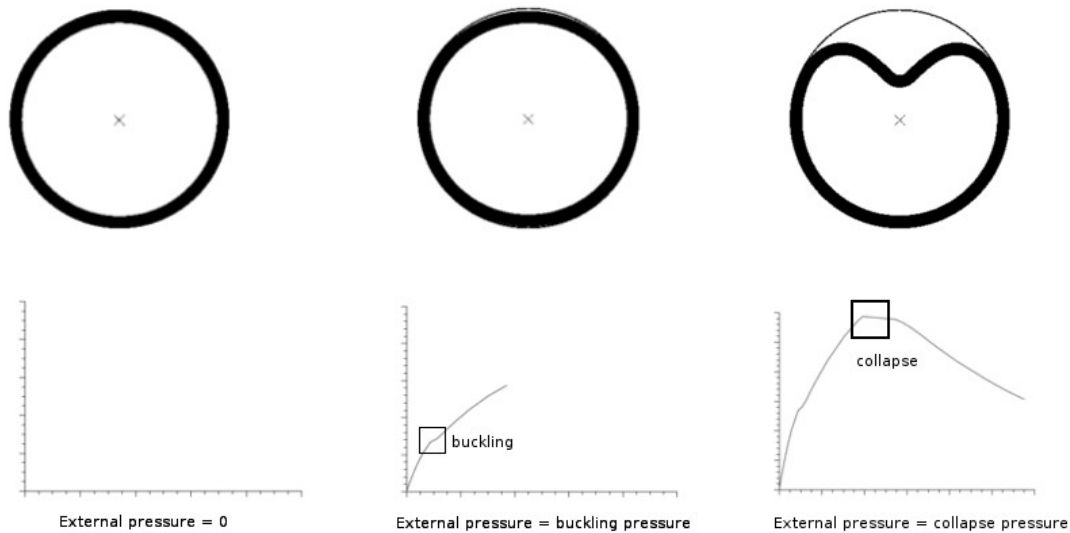


Figura 3. Representación esquemática del colapso basados en datos experimentales (Pinel and Mason, 2004)

2.1.2 Modelo Estático de Riks

En general, la resolución de problemas de elementos consiste en la aplicación incremental de carga, utilizándose en cada incremento de carga métodos iterativos para aproximar el movimiento de la estructura a una situación en la que exista equilibrio (Sancho Aznal and Ortiz Herrera, 1991). A este proceso de solución en el que se especifican saltos de carga se suele denominar "Método de control de carga". En estructuras que presentan puntos críticos en su respuesta es posible que el sistema de ecuaciones de equilibrio (4) no tenga solución. En el caso del colapso por pandeo, la presión debería llegar a un máximo (presión crítica) y posteriormente disminuir a consecuencia del aumento de volumen en el ánulo definido entre la pared interna del tubo receptor ("host") y el "liner". En un modelo FEM por el método de control de carga, el sistema comienza a diverger al momento del colapso, sin observarse la caída de presión experimental. Una manera de evitar este inconveniente consiste en tratar el coeficiente de aumento de carga, no como una constante, sino como una variable más del problema. Este método, llamado método de Riks, permite simular la situación real de caída de carga posterior al colapso.

2.1.3 Utilización de Elementos Hidrostáticos

Los elementos hidrostáticos se utilizan para representar cavidades llenas de fluido. En este caso, la cavidad llena de fluido es el ánulo comprendido entre la tubería receptora y el "liner". El fluido puede ser modelado como neumático (compresible) o hidráulico (incompresible). Este tipo de elementos se aplican de manera tal que compartan los nodos con la cavidad llena de fluido. Representan una "cáscara" interna en un cavidad tridimensional o un perímetro unidimensional en un perfil bidimensional (Figura 4).

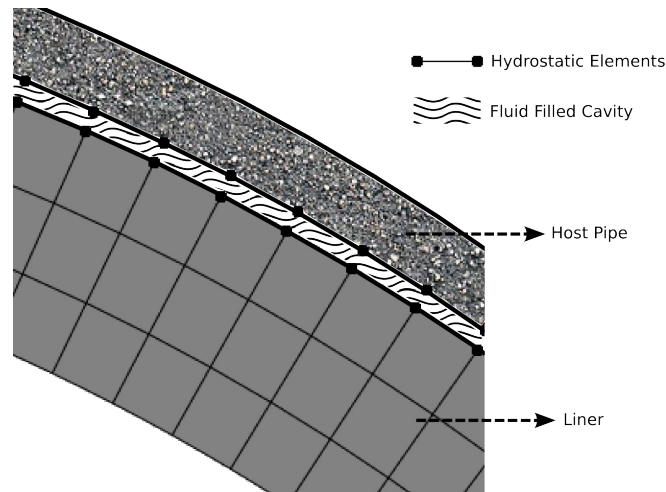


Figura 4. Elementos hidrostáticos

Se imponen las condiciones iniciales de temperatura y presión. Progresivamente la cantidad de fluido retenida en el ánulo se aumenta con un caudal constante. El aumento de cantidad de fluido en la cavidad, aumenta la presión, lo cual deforma progresivamente la cavidad (“liner” en este caso). Lo que se impone en este caso es el caudal, la cantidad de fluido retenida. Tanto el volumen como la presión del ánulo son constantemente calculadas por un nodo de referencia, ambas son función del caudal de fluido aplicado. De esta manera, al momento del colapso, a diferencia del caso anterior, la presión desciende repentinamente, tal cuál sucede en un ensayo de colapso por presión externa.

2.2 Geometría

Si se considera que los “liners” se instalan en longitudes que van desde los 200 a los 1200 metros, resulta adecuado pensar en principio que las deformaciones longitudinales son prácticamente nulas. Esta situación permite considerar una sección de tubería en 2D considerando un estado de deformación plana, como se hizo también en otros trabajos (Gerard, Dang and Mason, 2004; El-Sawy, 2001). Este tipo de geometría fue el considerado para el modelo FEM. Si bien en un principio se modeló el perfil completo de 360° para visualizar con más comodidad la forma del colapso, posteriormente solo se consideró la mitad por simetría.

Con el fin de inducir el colapso por pandeo, se dibujaron los perfiles con un pequeño grado de ovalización, manteniendo una relación de 1.0005 entre el diámetro mayor y menor. A su vez, las longitudes de los dos radios que componen al diámetro menor, se dibujaron con esta misma relación, induciendo el pandeo con un solo lóbulo.

2.3 Modelos constitutivos

Se consideraron tres modelos constitutivos básicos para analizar su influencia en el comportamiento de colapso. Los modelos considerados fueron elástico, elastoplástico ideal y elastoplástico con endurecimiento (Figura 5). Los parámetros de estos tres modelos se obtuvieron ensayando HDPE en tracción.

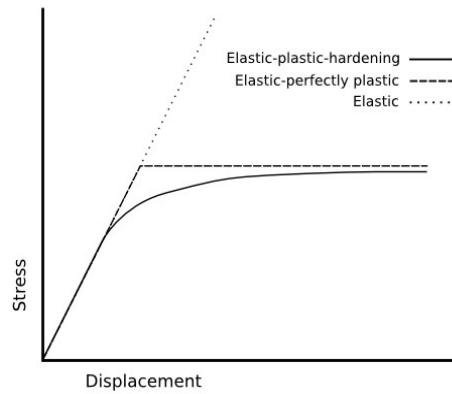


Figura 5. Representación esquemática de los modelos constitutivos considerados

3 RESULTADOS

3.1 Ensayo del tracción

Se mecanizaron probetas del tipo “huesito” a partir de una placa de aproximadamente 2mm de espesor, moldeada por compresión. Los ensayos se realizaron con un extensómetro con el objetivo de obtener el módulo elástico del material. Las velocidades utilizadas fueron de 1 y 50 mm/min. Se consideró un coeficiente de Poisson de 0,35.

Velocidad	E (MPa)	σ_y (MPa)
1 mm/min	1241	26,57
50 mm/min	1545	30,25

Tabla 1. Propiedades mecánicas a distintas velocidades.

3.2 Comportamiento al colapso según modelo constitutivo

Se realizaron simulaciones FEM basadas en los tres modelos propuestos, considerando diferentes relaciones t/D (espesor/diámetro). En el caso del modelo elástico, se utilizó un módulo elástico de 1545 Mpa. Para el modelo elastoplástico ideal, se utilizó un módulo de 1545 Mpa y 30,25 Mpa de tensión de fluencia. El modelo elastoplástico con endurecimiento se representó con la curva completa de tracción a 50 mm/min.

En principio, el comportamiento de presión externa versus desplazamiento, demuestra que los resultados al aplicar los distintos modelos, difieren mayormente después del “buckling” o de la etapa lineal de la curva presión vs. desplazamiento (Figura 6).

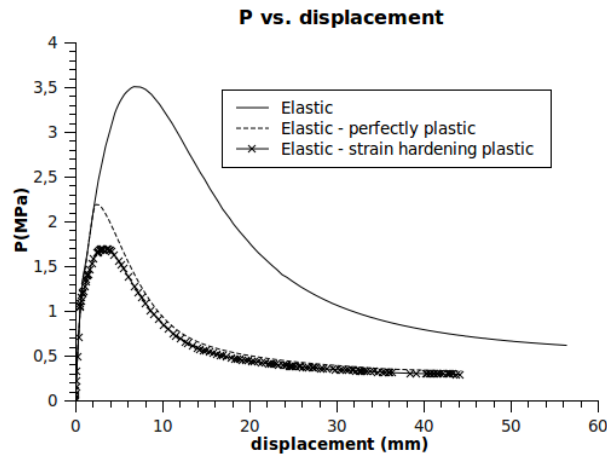


Figure 6. Comportamiento al colapso según los tres modelos constitutivos. Simulación FEM por Riks para un perfil de $t/D=0,05$

Puede observarse en estos resultados, que la mayor presión de colapso, está dada por el modelo elástico, mientras que la menor pertenece al modelo elastoplástico con endurecimiento.

Estas diferencias en la presión de colapso, es de esperar que se vean disminuidas al disminuir la relación t/D . A menores relaciones t/D , aumenta la probabilidad de colapso elástico, mientras que a mayores relaciones t/D , aumenta la posibilidad de colapso inelástico [2]. Este comportamiento está asociado a una relación entre la presión crítica de colapso elástico y de deformación plástica, la más crítica de las dos, será la que defina el tipo de colapso. En la figura 7, se observa como las presiones de colapso se acercan a medida que disminuye la relación t/D , donde aumenta el carácter elástico del colapso, mientras que al aumentar esta relación, se diferencian cada vez más las presiones de colapso.

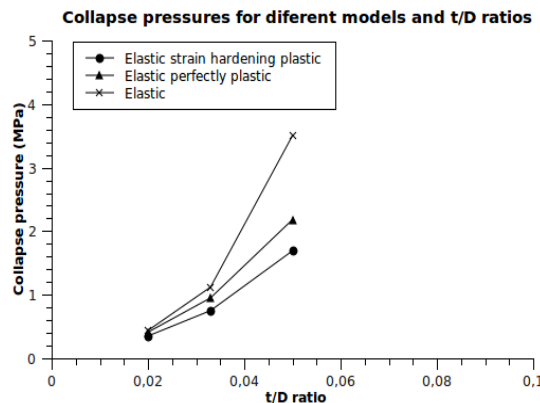


Figura 7. Presión de colapso en función del modelo constitutivo y de la relación t/D .

En base a la ecuación (5), se determinó el tipo de colapso para el rango de relaciones t/D y σ_y/E analizados:

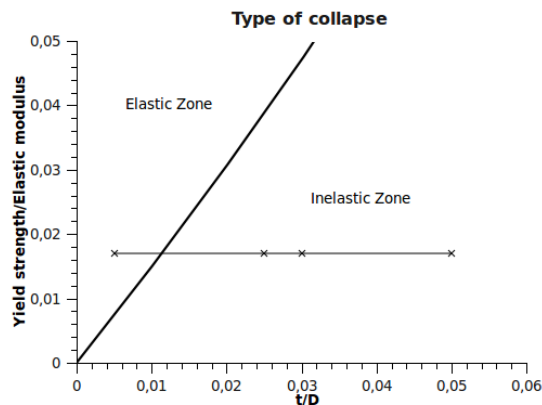


Figura 8. Esquema teórico de tipo de colapso.

En la figura 8 se representa gráficamente la ecuación 5. Para la relación σ_y/E' (0.017) que se consideró para el HDPE, el menor valor de t/D cae en la zona de colapso elástico, mientras que los demás valores, están dentro de la zona inelástica (Figura 8).

3.3 Comportamiento a distintas velocidades

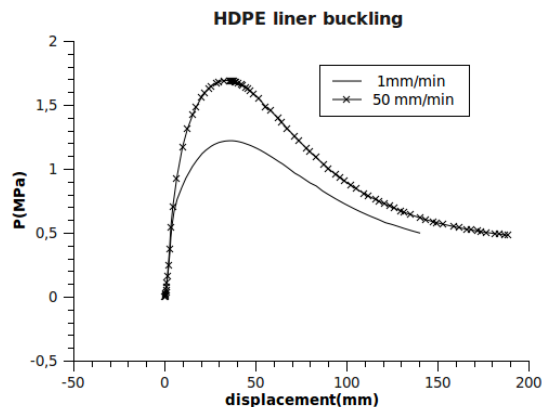


Figura 9. Curvas presión-desplazamiento según velocidad de sollicitación.

En la Figura 9, se puede observar una mayor presión de colapso a mayor velocidad de sollicitación. Estos resultados se obtuvieron configurando el sistema con los datos de tracción a 1 mm/min y a 50 mm/min.

3.4 Contraste de FEM con el modelo de Glock y de Jacobsen

Dado que el modelo de Jacobsen, solo considera el módulo elástico y la tensión de fluencia del material, el modelo utilizado en FEM para contrastar los resultados con Jacobsen fue un elastoplástico ideal con $E=1545$ y $S_y=30.25$. Se realizaron simulaciones FEM con los métodos de Riks con diferentes relaciones t/D y se compararon con los resultados de las ecuaciones de Jacobsen y Glock (figura 10).

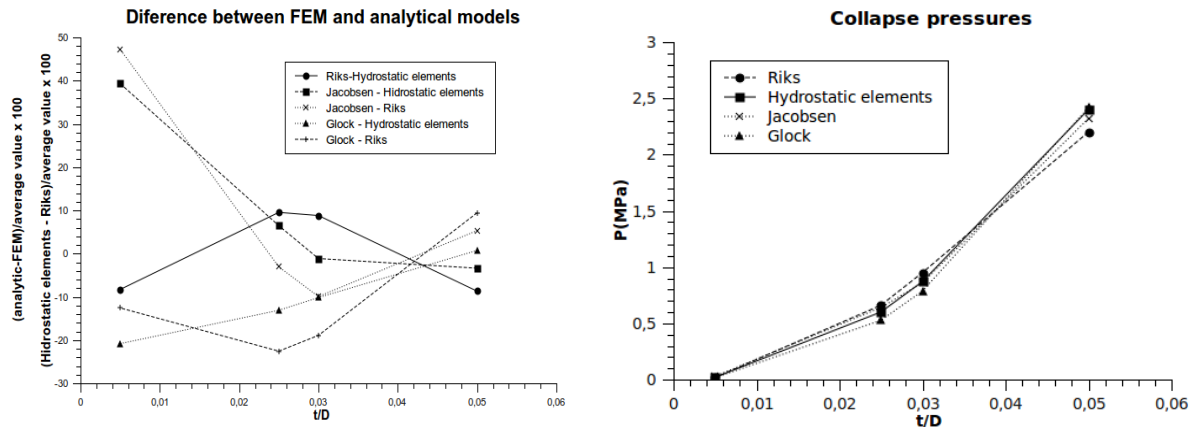


Figura 10. Contraste de resultados FEM por el método de Riks con resultados analíticos (izquierda). Diferencia entre modelos analíticos y FEM (derecha).

La diferencia existente entre los modelos analíticos y FEM, puede verse que en el caso de Jacobsen, el mayor porcentaje de diferencia se da para los menores valores de t/D . Esta diferencia positiva de casi un %50, indica además que Jacobsen sobreestima la presión de colapso. El modelo de Jacobsen considera como valor de presión crítica, aquel que genera el primer punto de fluencia en el material. Si se tiene en cuenta a partir de la Figura 8 que para las relaciones t/D de 0.005 el comportamiento de colapso es elástico, resultan lógicos estos valores, dado que el colapso por pandeo es anterior a la deformación plástica del material. En este caso, el modelo de Glock, resulta más eficiente.

Al aumentar la relación t/D la diferencia entre FEM y Jacobsen se reduce, sin embargo, no se ve que para el caso en consideración exista una notable mejora respecto del modelo de Glock, que considerando su facilidad de resolución, podría ser una buena alternativa de cálculo inmediato.

Por otro lado, puede verse también que la diferencia entre los métodos de Riks y la utilización de elementos hidrostáticos, no supera el %10.

4 CONCLUSIONES

La simulación FEM por el método de Riks es capaz de describir la caída de presión durante el colapso de "liners" por presión externa registrada experimentalmente en contraste con simulaciones anteriores que no podían reproducir este efecto (Gerard, Dang and Mason, 2004).

La viabilidad de utilizar el método de Riks para calcular el colapso por pandeo por presión externa, fue evaluada en otras publicaciones para metales y con un modelo constitutivo más simple (El-Sawy, 2001).

Dada la naturaleza viscoelástica del material utilizado, puede observarse la necesidad de determinar la presión crítica de colapso en función de la velocidad de solicitación. Es decir, la presión crítica de colapso por pandeo no es un valor intrínseco de la tubería, sino que, depende en gran medida de las condiciones en las que se la solicita. En el caso de los materiales metálicos, este recaudo no es necesario. La simulación del colapso que incluya ecuaciones constitutivas dependientes del tiempo podría realizarse con la aplicación de elementos hidrostáticos. La máxima diferencia existente entre los valores obtenidos por Riks y utilizando elementos hidrostáticos es de %9,5. Esto permite pensar que la utilización de elementos hidrostáticos es también viable para esta aplicación.

En cuanto a la utilización de modelos analíticos o semi-analíticos, pudo observarse que para el HDPE, dada su relación σ_y/E' , no se justifica la aplicación del método de Jacobsen. Si bien, para algunas relaciones t/D Jacobsen resulta más efectivo, el método de Glock cuya aplicación es mucho más sencilla, predice con una máxima diferencia con FEM de %22 en

todo el rango. Por otro lado, a muy bajas relaciones t/D , en colapsos con un alto carácter elástico, el método de Jacosen predijo con una diferencia sobre-estimativa de hasta casi un %60.

5 REFERENCIAS

- Boot, J.C., and Naqvi, M.M., The Structural Characterisation Of Corrosion-Resistant Linings For Hydrocarbon Pipelines. *Corrosion*, 00777, 2000.
- Canadian Standards Association CSA Z662-03 Oil & Gas Pipeline Systems standard.
- El-Sawy, K.M., Inelastic stability of tightly fitted cylindrical liners subjected to external uniform pressure. *International Journal for Thin-Walled Structures*, 39 9: 731–744, 2001.
- Genoni, M., Bulleri, B., and Ticci, A., NUPI SpA; James Sutherland, Nupi Americas Inc. Engineering Thermoplastic-Liners, *Corrosion*, 04705, 2004.
- Gerard, F., Dang P., and Mason J.F., Design ananalysis of Polyamide-11 liners: operating higher than the critical buckling pressure. *Corrosion*, 04712, 2004.
- Glock D., Behavior of liners for rigid pipeline under external water pressure and thermal expansion. *Der Stahlbau*, 7: 212–217, 1997.
- Goerz, K., Simon, L., Little, J., and Hawn, D., A review of methods for confiming integrity of thermoplastic liners-field expeirences, *Coorrosion*, 04703, 2004.
- HR-370 Pipe Rehabilitation With Polyethylene Pipe Liners, report.
- Jacobsen S., Buckling of circular rings and cylindrical tubes under external pressure. *Water Power*, 26: 400–407, 1974.
- Lebsack, D.B., and Dorwin E., Extending Liner Installation Lenghts. *Corrosion*, 04714, 2004.
- Liners for Oilfield Pipelines, NACE Standard RP0304-2004
- Mason, J.F. and Alkire, J.D., Effect of rapid decompression conditions on liner materials. *Corrosion*, 04714, 2000.
- Pinel, E., Mason J., and O'Brien, G., Experimental investigation of buckling in highly aged Polyamide-11 liners. *Corrosion*, 0471, 2004.
- Sancho Aznal, J. M., and Ortiz Herrera, J., Implementacion de los Metodos de Riks-Wempner, Batoz-Dhatt, Powell-Simons y otros en el Programa De Elementos Finitos F.E.A.P. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Caiculo y Diseno en ingenieria*, 7, 3: 265-288, 1991.
- Szklarz, K.E., and Baron, J.J., Learnings from thermoplastic liner failures in Sour Gas pipeline service and replacemnte liner desing and installation. *Corrosion*, 04702, 2004.