

ESFUERZOS RESIDUALES INDUCIDOS POR ABOLLADURAS EN TUBERÍAS

Edgardo Arrieta Ortíz,

Msc. Ing. Mec.,

Javier Paredes Riaño,

Ing. Mec. U. Andes

Alejandro Pacheco,

Ing. Mec. U. Andes.

Resumen.

Las abolladuras ocurridas en tuberías para oleoducto, representan un inminente peligro para la transmisión de fluido a través del mismo. En este artículo se muestra el comportamiento no lineal de la deformación residual obtenida como función de la carga que provoca la abolladura, al igual que se describen los resultados obtenidos usando simulaciones bidimensionales por elementos finitos de este fenómeno.

1. CONCEPTOS BÁSICOS.

Hemos tratado de determinar la dependencia entre deformación final residual y esfuerzos finales residuales en una tubería para oleoductos abollada de manera típica.



Figura 1.1

La Fig. 1.1 muestra la forma típica de un tubo abollado. Claramente no tenemos información precisa acerca del proceso de deformación sino solamente de la deformación final.

Una medida de ésta es el porcentaje de abolladura, igual al porcentaje de reducción del diámetro de la sección abollada.

Una caracterización geométrica precisa de las abolladuras debe incluir no solamente este porcentaje, sino los radios de curvatura encontrados en la zona abollada.

La hipótesis básica entonces es que podemos hallar información acerca de los esfuerzos inducidos en la tubería como función de la geometría final de la misma. Sabemos de antemano que los procesos de deformación plástica dependen de la historia del proceso de deformación, así que la incógnita es qué tanta información podemos obtener a partir de la geometría final.

En particular hemos realizado varias series de experimentos computacionales orientados a lograr esta información.

2. MODELO ELÁSTICO LINEAL

El modelo más simple para un proceso de deformación es un modelo lineal elástico. Por la iniciativa de OCENSA S.A., consideramos entonces un tubo sin esfuerzos residuales, como si hubiese sido construido en la forma final, con el objeto de determinar hasta qué punto podría resistir presión interna.

2.1 Tipo de elementos

Usamos un modelo bidimensional asumiendo que el tubo hubiese sido deformado por igual en toda su longitud.

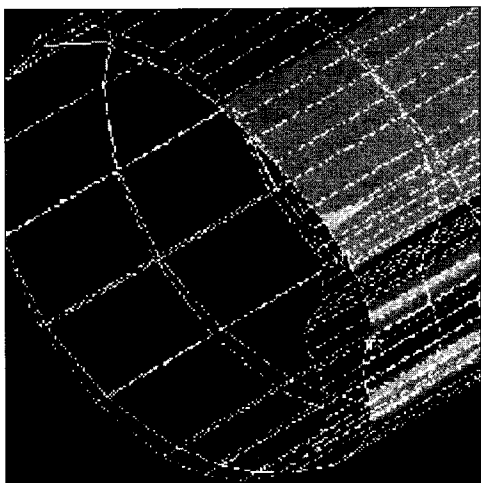


Figura 2.1

Usando ANSYS 5.3 determinamos que modelos de placas (3D) como el que se muestra en la Fig. 2.1 y de celdas 2D como el que muestra la Fig. 2.2, producían resultados congruentes, por lo que elegimos el esquema 2D.

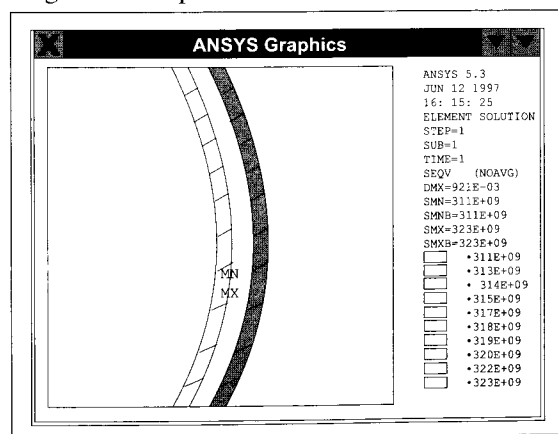
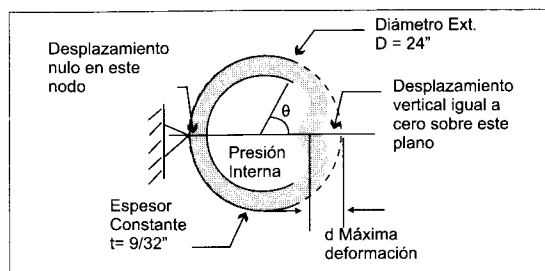


Figura 2.2

2.2 Condiciones de Borde

Al modelo escogido le aplicamos las siguientes condiciones de borde :



$$\frac{d}{D} = f \quad \% \text{ de abolladura}$$

Fig. 2.3

La presión de operación es el 72% de la que provocaría cedencia en la pared :

$$\text{Presión} = 0.72 \text{ Syt.} \left[\frac{2t}{D} \right]$$

2.3 Calibración

La comparación de resultados entre los predichos por la teoría para tubos de pared gruesa, y los esfuerzos calculados en ansis para factor de abolladura 0.0, mostraron errores del 0.06%, lo cual consideramos muy aceptable.

2.4 Resultados

Los resultados mostraron que asumir un comportamiento lineal del material y considerar el tubo deformado sin esfuerzos residuales al inicio, produce esfuerzos resultantes al aplicar presión interna, proporcionales al porcentaje de abolladura:

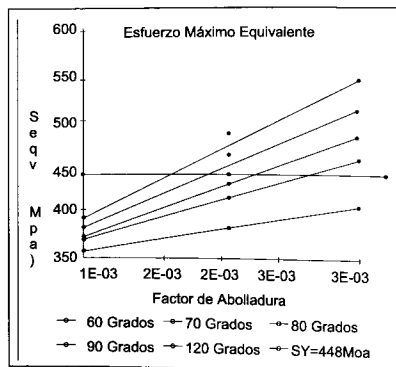


Figura 2.4

La figura 2.1 muestra el esfuerzo máximo equivalente de Von-Mises en la tubería como función del porcentaje de abolladura, y del ángulo de la abolladura. Sin embargo hay ya factores de abolladura de 0.002, esfuerzos superiores a la cedencia del material. Consideramos entonces que un comportamiento no lineal del tipo de “carga crítica”, causaba deformaciones significativas al tubo. Además la observación de los resultados mostró que la sección de mayores esfuerzos, se hallaba básicamente sujeta a un esfuerzo promedio más una carga por momento flector. En este caso se podía prever que el efecto de los esfuerzos residuales sería el de reducir el máximo esfuerzo flector¹. Entonces no sólo el comportamiento no-lineal propio de las cargas de pandeo sino también el correspondiente a la historia de deformación y en particular, los esfuerzos residuales son necesarios.

3. MODELO PLÁSTICO

De este modo, entonces decidimos estudiar un modelo 2D con las mismas condiciones de borde, sin presión interna y considerando el material como elasto plástico con módulo de endurecimiento determinado a partir de la curva esfuerzo-deformación del material. El estudiante Javier Paredes desarrolló su proyecto de grado en este tema². El objetivo entonces era lograr producir un tubo deformado con esfuerzos residuales por debajo del límite de cedencia del material, con forma final similar a la de tubos abollados conocidos en la realidad.

Los ensayos computacionales y las deformaciones obtenidas en laboratorio para algunos especímenes, mostraron que el paquete ALGOR era capaz de predecir el comportamiento elasto-plástico no-lineal dinámico transiente de láminas rectas de acero con precisiones cercanas al 1% en la deformación final.

Notoriamente, las condiciones de borde debieron ser cambiadas entonces por las siguientes :

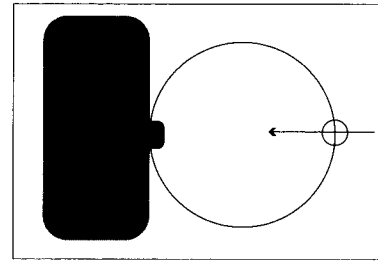


Figura 3.1

La adición de la pared a la izquierda mejoró sustancialmente los resultados del modelo. Entre las deformaciones obtenidas podemos mostrar:

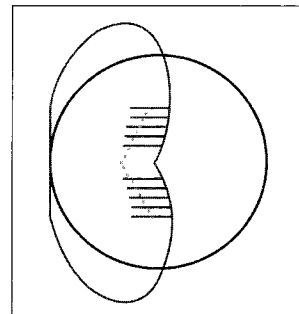


Figura 3.2

Un resultado típico muestra el esfuerzo equivalente encontrado.

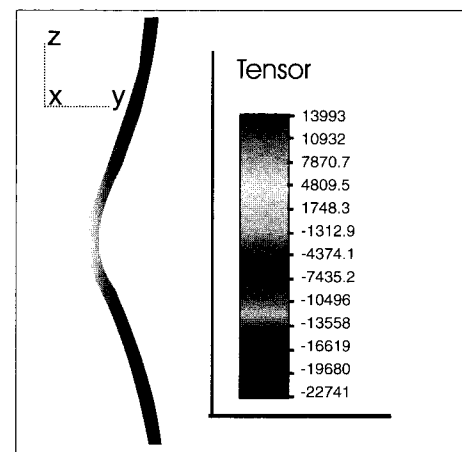


Figura 3.3

La deformación por la abolladura producía entonces esfuerzos residuales que precisamente se contrarrestarían con los añadidos al agregar presión interna.

¹ Juvinall, “Engineering Consideration of Stress, Strain and Strength”.

² Javier Paredes, Proyecto de grado, “Modelación computacional de deformaciones plásticas producidas por abolladuras en tuberías de Acero”, 1998. Asesor, Edgardo Arrieta.

Adicionalmente, la curva de carga del modelo, en el tiempo, permitía agregar y liberar la carga para observar la deformación remanente.

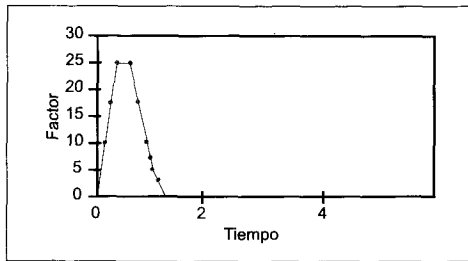


Figura 3.2

4. EVALUACIÓN DE SENSIBILIDAD AL MODELO PLÁSTICO

En algunos casos el modelo elasto plástico mostraba errores de convergencia numérica que atribuíamos a errores de redondeo internos del software usado. Sin embargo, la observación cuidadosa mostró que el modelo dinámico transiente al ser liberada la carga, oscilaba como un resonador lineal.

Los parámetros de amortiguamiento correspondiente, a pesar de la no-linealidad de la curva esfuerzo deformación del material requerían del uso de las constantes de Raleigh, para desacoplar el sistema dinámico.

Por medio de esta aproximación la matriz de coeficientes de amortiguación $[C]$ es función de la matriz de masas $[M]$ y rigidez $[K]$ multiplicadas por unas constantes α y β como se expresa en:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (1)$$

Al desacoplar el sistema de ecuaciones [1] se obtiene que:

$$2\zeta_i\omega_i = \alpha + \beta\omega_i^2 \quad (3)$$

Donde ω_i son las frecuencias propias del sistema y ζ_i es el factor de amortiguamiento para estas.

Luego procedimos a evaluar los rangos en que estas constantes producían resultados coherentes con la realidad y si los esfuerzos residuales finales eran afectados por las variaciones de estas constante que podrían drásticamente reducir el tiempo de atenuación de la vibración del espécimen.

Al estudiar las variaciones en los esfuerzos residuales como función de los cambios en la curva de carga, la distribución de la carga, y los parámetros de Raleigh, hemos logrado verificar la existencia de cargas críticas de pandeo. Es decir, la deformación residual final de la tubería como función de la carga máxima aplicada, sigue un patrón como el mostrado :

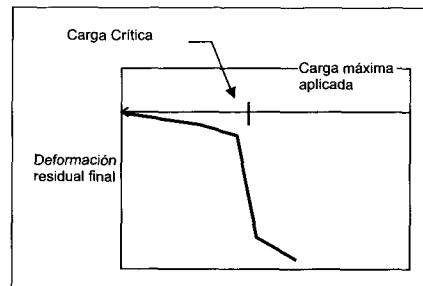


Figura 3.3

Este ha sido el trabajo inicial de la tesis de Magíster del estudiante Alejandro Pacheco. Y hasta el momento, salvo limitaciones computacionales, hemos podido realizar suficientes experimentos computacionales como para predecir esfuerzos residuales en un proceso de deformaciones plásticas como el que pueda causar una abolladura.

5. CONCLUSIÓN

Hasta el momento, haciendo evaluaciones computacionales y correlacionando resultados obtenidos al variar los parámetros significativos de propiedades del material, consideramos que el comportamiento elasto-plástico cuasiestático de un tubo deformado puede ser predicho con base en su deformación final solamente. Determinar rangos adecuados para establecer los valores de estos esfuerzos inducidos como función de parámetros geométricos es el contenido de un proyecto de investigación en curso. Las características de absorción de energía, así como las no-linealidades propias de la deformación de una columna por pandeo son indispensables en la simulación computacional de este tipo de eventos. La presencia del suelo y el contenido de la tubería (petróleo), al ser incluidos en el modelo, salvo limitaciones físicas de memoria y tiempo, harán más confiables estos resultados.