

Estabilidad elástica de laminaciones no coplanares en tubos aplicando MEF

Elastic stability of non coplanar blisters in pipes, by FEM

J. L. González, J. M. Hallen y A. Morales*
ESIQIE-IPN, Departamento de Ingeniería Metalúrgica,
Unidad Profesional Adolfo López Mateos,
AP 75-874, México DF, CP 07738, México

*Departamento de Ingeniería Mecánica,
Instituto Tecnológico de Puebla,
Av. Tecnológico No. 420, Puebla, Puebla, CP 72220, México
amorales@mexssub.com

Resumen

En este trabajo se analizan laminaciones del tipo planar formadas a diferentes profundidades del espesor del tubo y que generalmente son causadas por el agrietamiento inducido por Hidrógeno (AIH). Cuando estos defectos están presentes en un componente sometido a presión existe la posibilidad de que se interconecten formando un escalón, por lo que la resistencia residual es severamente afectada debido a la interacción y coalescencia de estas grietas, procediendo así a reparar o reemplazar el tubo. Se modeló la interacción de laminaciones presurizadas contenidas en la pared del tubo con presión interna previas a su coalescencia, variando la separación en la vertical y la horizontal de los frentes de grieta correspondientes a la región interlaminar. Simulando mediante elementos finitos en condiciones no lineales del material bajo la ley de endurecimiento isotrópico y considerando las propiedades del material (API 5L-X52) obtenidas de probetas con estos defectos. Los resultados indican la evolución de los campos de esfuerzos y deformaciones en el área interlaminar en función de la presión del defecto, además, de la probable dirección del agrietamiento. Obtenidas las condiciones que conllevan a la interconexión se simuló el escalonamiento y se presurizó monotónicamente para comparar gráficamente los estados pre y post escalonamiento.

Palabras claves: Laminaciones, agrietamiento inducido por hidrógeno, elemento finito, no linealidad, resistencia residual.

Abstract

In this work, laminations of planar type formed at different depths in the thickness of pipe are analyzed, usually caused by hydrogen induced cracking (HIC). When HIC cracks are present in a component with pressure, there is always a possibility that where they will interconnect form a stepwise crack. The remaining strength is severely affected due to the interaction and coalescence of neighbor cracks and the pipe containing it is repaired or replaced. The interaction of pressurized laminations contained in the walls of pipe under internal pressure previous to coalescence was modeled, varying vertical and horizontal separation of crack fronts to the interlaminar region, applying the finite element method in non-linear conditions of the material using the isotropic hardening law and considering the properties of the material (API 5L-X52). The results evaluated indicative the evolution of the stress fields and deformations in the interlaminar area as a function of the pressure inside the lamination, furthermore, probable direction of the interconnecting cracks. Once the conditions that lead to the interconnection were obtained, the stepwise crack was simulated and it was pressurized monotonically in order to compare graphically the post and pre stepwise states.

Key words: Laminations, blister, hydrogen induced cracking, finite element, non-linear, remaining strength.

1 Introducción

Las laminaciones presentes en ductos destinados al transporte de hidrocarburos son discontinuidades del tipo planar contenidas en el espesor, que pueden tener su origen en el proceso de manufactura de los tubos, o bien ser formadas durante el servicio por la absorción de hidrógeno proveniente de la reacción de corrosión del acero en un medio amargo.

Si dos laminaciones se forman en el mismo plano al interconectarse se construye una grieta de mayor tamaño sin escalonamiento y si las grietas se forman en diferentes planos al interconectarse crean un escalón (González, 1998). Previo a la etapa del escalonamiento el mecanismo de falla obedece al incremento en la presión interna de los defectos y por ende a la interacción de los campos de esfuerzo en la cercanía de las grietas. En la Fig. 1 se observa el defecto mencionado.

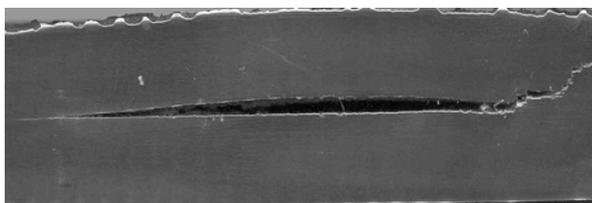


Fig. 1. Laminación escalonada, tubo de 508 mm de diámetro, espesor 15.9 mm, especificación API 5LX52.

Reporta (Makio Iino, 1978), que el AIH se caracteriza por la formación de ampollas producto de la precipitación de hidrógeno en la interfase matriz inclusión, las cuales se interconectan por la presión del hidrógeno, y que el agrietamiento se acompaña por una considerable deformación plástica, argumentando que la fractura se desarrolla por la interconexión de micro grietas formadas fuera del plano aproximadamente perpendicular al eje de carga (agrietamiento ortogonal), y es influenciada por la presencia del esfuerzo externo.

Destacan (Zacaria y Davies, 1993), que la presión de hidrógeno actúa de una forma hidrostática, y conforme el tamaño de la grieta se incrementa de un valor nominal a_0 a un valor $a_0 + \Delta a$, la presión del H dentro de la grieta disminuirá instantáneamente y dependiendo del criterio de energía y de la concentración de H locales, la propagación de esta grieta ya sea que se detenga o que disminuya lentamente.

W. A. Moussa et al, 1999, analizó mediante MEF dos grietas no coplanares traslapadas y separadas en la vertical sujetas a una carga de tensión, concluyendo la influencia que tiene la interacción del tamaño de grietas y esta separación, obteniendo una función cuadrática de las variables tamaño de grieta y espesor.

Con el objetivo de analizar la interacción de estos defectos se modelaron dos arreglos de laminaciones variando la separación vertical y horizontal. El sistema se

simuló aplicando el elemento finito en condiciones no lineales del material con una ley de endurecimiento isotrópico, por la evidencia física de la deformación plástica en el entorno de las laminaciones, la cual es asociada a las altas presiones que produce el Hidrógeno molecular en el interior del defecto, además de la presión de operación del tubo.

Los resultados se presentan en graficas: esfuerzo vM & por separación (x,y), esfuerzo principal & presión en las laminaciones, lo cual permite destacar el papel de la interacción de las grietas y la interconexión si están muy próximas sin necesidad de la formación de grietas secundarias.

2 Formulación no lineal del material

Una diferencia importante entre las relaciones correspondientes a los rangos elástico y plástico consiste en que dado un estado de esfuerzos puede calcularse la deformación mediante relaciones finitas como la ley de Hook, esto es para el primer rango, en cambio en el rango plástico las deformaciones no están en general determinadas unívocamente por los esfuerzos, sino que deben tratarse con relaciones diferenciales incrementales. La teoría de la plasticidad provee las relaciones matemáticas que caracterizan la respuesta de los materiales elastoplásticos. Los componentes de la teoría de la plasticidad son:

- Criterio de fluencia
- Regla de flujo
- Regla de endurecimiento

Los infinitos estados de esfuerzo que determinan la entrada del material en el campo plástico, constituyen una superficie cerrada denominada superficie de fluencia. La expresión de la superficie de fluencia es en general una función de las variables de estado dada por:

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}^p, k) = 0 \quad (1)$$

Donde k es un coeficiente que mide el endurecimiento por deformación.

Se emplea el criterio de fluencia de Von Mises, lo que determina cuando se inicializa la cedencia, denominado esfuerzo equivalente (ANSYS theory referente):

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = f(\{\sigma\}) \quad (2)$$

La deformación total dada por la ecuación 3, esta compuesta por los incrementos de la deformación elástica ε^{el} e incrementos de la deformación plástica ε^p .

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^p \quad (3)$$

En el régimen elastoplástico las relaciones esfuerzo deformación están dadas por:

$$d\sigma = E^{\tan} d\varepsilon \tag{4}$$

Donde E^{\tan} es la pendiente de la curva esfuerzo deformación.

Se considera que la superficie de carga se expande conservando su forma, es decir, es la superficie de fluencia correspondiente a un material con solo endurecimiento isotrópico (O. C. Zienkiewick). El historial de la deformación plástica de un metal es a menudo caracterizado por el trabajo plástico dado por w_p :

$$w_p = \int \{\sigma\}^T \{d\varepsilon^p\} \tag{5}$$

Para este caso de estudio se considera la plasticidad asociativa, ya que el flujo plástico es normal a la superficie de cedencia. El problema general se formula en función del parámetro de discretización D (desplazamiento), en cada incremento el esquema iterativo anterior se ejecuta hasta que se alcanza la convergencia ó el máximo número de iteraciones. Durante cada incremento la matriz de rigidez tangente KT puede ser adaptada en cada iteración (método de Newton-Raphson) ecuación (6).

$$[K_T] \{\Delta D\} = \{F_e\} - \{F_{nr}\} \tag{6}$$

donde:

- $\{\Delta D\}$ = Matriz de desplazamiento
- $\{F_e\}$ = Vector de fuerzas externas
- $\{F_{nr}\}$ = Vector de fuerzas internas
- $[KT]$ = Matriz de rigidez

3 Propiedades del material

Se determinaron mediante pruebas de resistencia tensil las respectivas propiedades listadas en la Tabla 1, de acuerdo a la norma ASTM E8, instrumentando las probetas mediante sensores de deformación. El diagrama esfuerzo versus deformación correspondiente a los especímenes ensayados se muestra en la Fig. 2. Las propiedades así obtenidas se declaran en el preprocesamiento de las simulaciones.

Tabla 1. Propiedades del acero API5LX52.

| Propiedad | Magnitud |
|------------------------------------|----------|
| Esfuerzo de cedencia σ_{ys} | 358 MPa |
| Esfuerzo último σ_u | 453 MPa |
| Modulo de elasticidad E | 203 GPa |
| Relación de Poisson | 0.3 |
| % de reducción de área | 47% |
| % de alargamiento | 25% |

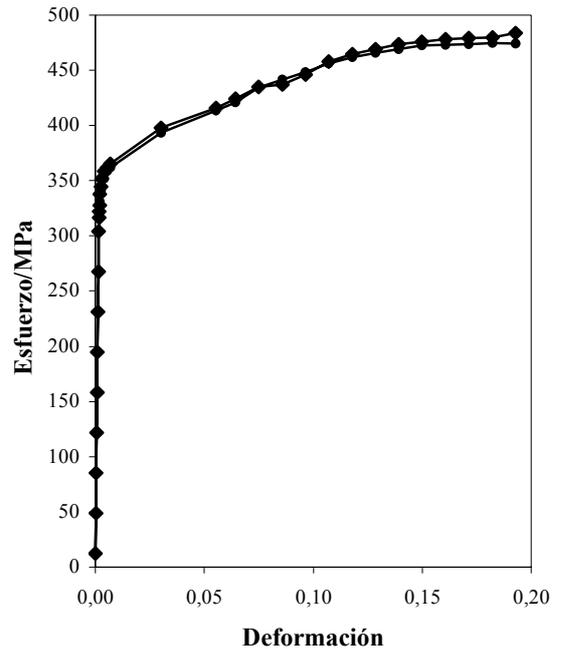


Fig. 2. Diagrama esfuerzo & deformación, material API5LX52.

4 Condiciones de la modelación por MEF

Las variables del modelo se representan en la Fig. 3 y se describen a continuación:

- r_d = Radio del defecto derecho
- r_i = Radio del defecto izquierdo
- d_y = Separación vertical
- d_x = Separación horizontal
- P_d = Presión en el defecto
- P_o = Presión de operación

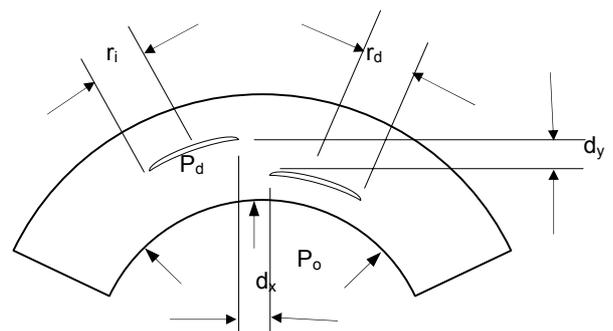


Fig. 3. Modelo geométrico.

Por la singularidad del esfuerzo en punta de grieta el modelo se construyo con elementos brick isoparamétricos con 20 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Se refino la malla en la región de interacción mediante elementos bi-cuadráticos para no afectar la sensibilidad del estudio por la diferencia de elementos de un modelo a otro. El total de

elementos utilizados fueron de 49569 con 199652 nodos, y se empleo el código comercial de elemento finito ANSYS V7.1. El modelo se muestra en la Fig. 4, en donde se observa la malla refinada en la región interlaminar.

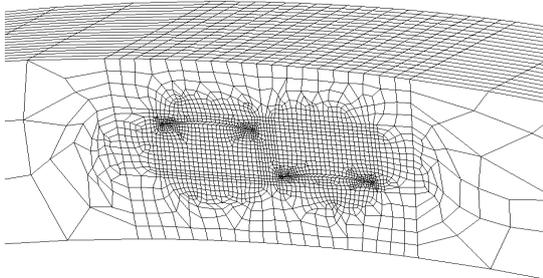


Fig. 4. Frenets de grietas región interlaminar. Discretización de dos laminaciones.

Las condiciones de frontera permiten la libre expansión del tubo mediante la rotación al sistema coordenado cilíndrico la restricción impuesta a los nodos, además de restringir en la dirección z para simular que forma parte de un continuo.

El tubo de 610 mm de diámetro y 25.4 mm de espesor se presurizó hasta 7 MPa y los defectos con pasos de carga antes y después de la cedencia. Las dimensiones utilizadas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Casos de estudio.

| C. N. | r_i, r_d /mm | dx /mm | dy /mm |
|-------|----------------|----------|----------|
| 1 | 6.35 | 0.79 | 0.79 |
| 2 | 6.35 | 0.79 | 1.58 |
| 3 | 6.35 | 0.79 | 3.17 |
| 4 | 6.35 | 0.79 | 9.52 |

5 Resultados

Se describen los resultados del primer caso de estudio en donde se presurizó el tubo con pasos de carga de presión de cero hasta 7 Mpa, y los defectos desde una presión inicial de cero hasta 124 Mpa. Se muestra en la Fig. 5 el mapa del campo de esfuerzo principal 1 en el entorno de las laminaciones, correspondiente al primer paso de carga es decir a una presión del tubo de 0.7 MPa y una presión interna en las grietas de 12.5 Mpa.

El mapa del esfuerzo principal en las grietas externas corresponde a la distribución esquemática de la zona plástica para el modo I, lo que coincide con la configuración reportada por A. Ikeda.

En la Fig. 6, se muestra el comportamiento de la región interlaminar con el incremento de presión en el defecto.

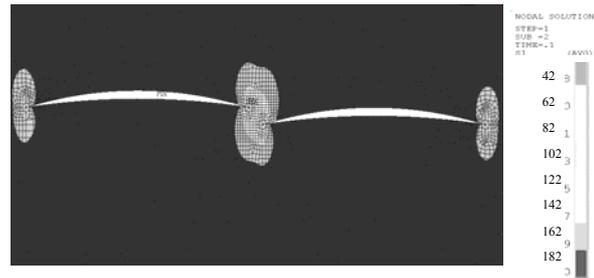


Fig. 5. Mapa del esfuerzo principal 1 en Mpa.

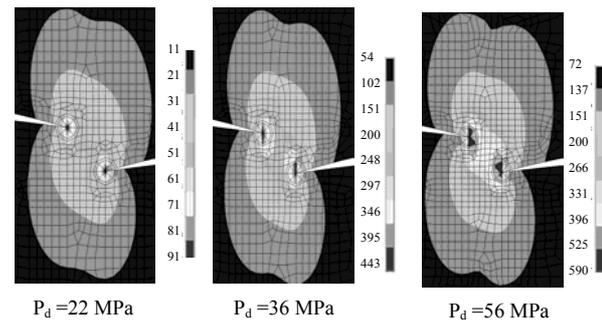


Fig. 6. Mapa del esfuerzo principal 1 en Mpa, correspondiente a la región interlaminar.

El esfuerzo máximo se presenta en las puntas de grieta de la región interlaminar, esto es un indicativo de la interacción de los campos de esfuerzos correspondientes a esta región, lo cual concuerda con el argumento del desarrollo del agrietamiento por la interconexión de grietas perpendiculares al eje de carga, según Makio Iino, la situación anterior se respalda con el diagrama vectorial de los esfuerzos principales haciendo mención al postulado de la mecánica de la fractura, el cual expresa que la dirección del agrietamiento corresponde a la dirección del esfuerzo principal dos, ver la Fig. 7.

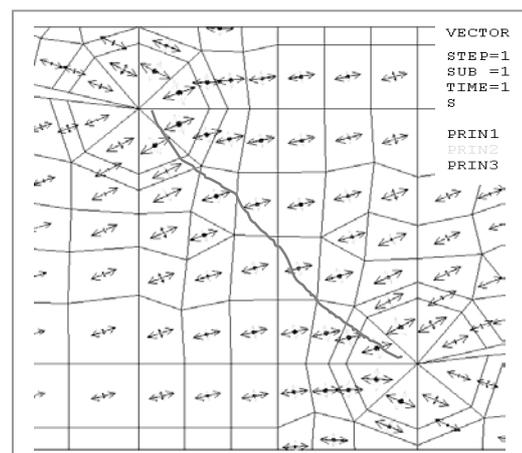


Fig. 7. Probable dirección del agrietamiento.

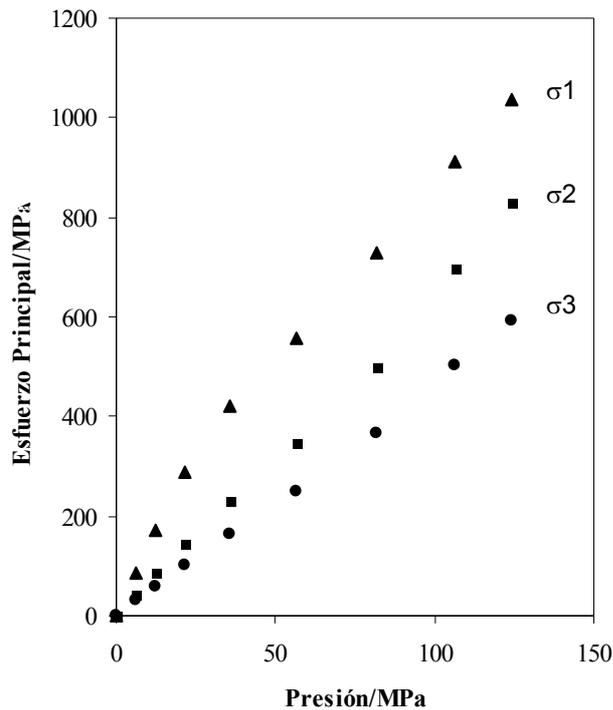


Fig. 8. Variación del esfuerzo versus la presión en el defecto.

En la Fig. 9 se muestra la variación del esfuerzo de Von Mises con la presión en la laminación.

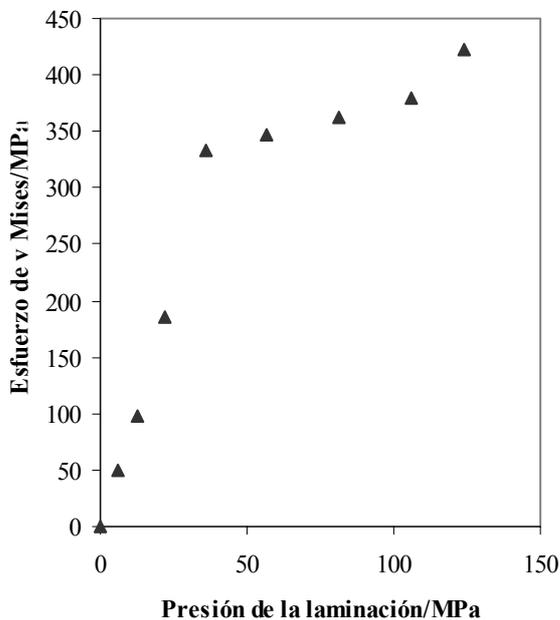


Fig. 9. Esfuerzo de Von Mises & presión en el defecto, en la región interlaminar.

Se destaca que para una presión de 50 Mpa interior a los defectos se rebasa la cedencia en la región interlaminar, y para un valor de 135 Mpa se alcanza el

esfuerzo último del material lo cual es un indicativo de la cercanía a la coalescencia de los defectos.

De la interacción de las variables sobresale que mientras más próximas se encuentren las grietas el gradiente del esfuerzo crece considerablemente en la región interlaminar, esto es asociado al decremento de la sección del ligamento y a la interacción de los campos de esfuerzos de esa zona, lo anterior se confirma en la grafica 10 .

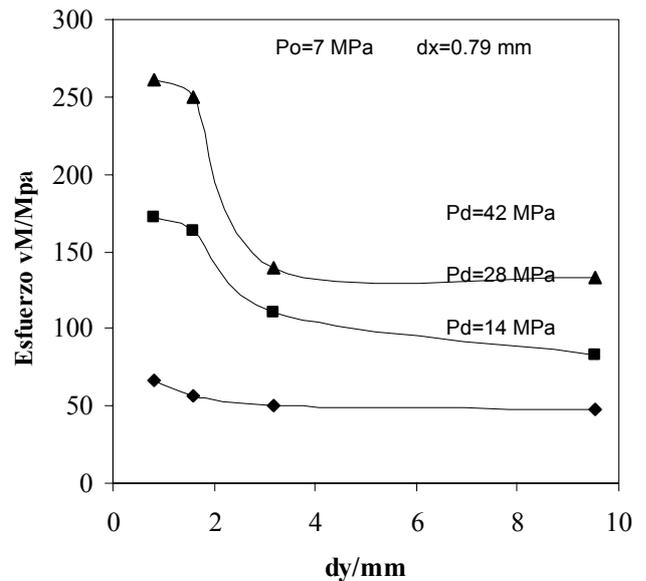


Fig. 10. Esfuerzo de v Mises en la región interlaminar con el incremento en dy, y Pd.

La presión en los defectos juega un papel preponderante ya que esta afecta directamente al esfuerzo gobernante en la región interlaminar, y más significativamente cuando la separación en la vertical oscila entre 1 y 3 mm, y la presión excede los 25 MPa. De acuerdo a los resultados obtenidos de las simulaciones se observa que el agrietamiento ortogonal ocurre a una presión en los defectos de 135 a 150 MPa, y en una dirección de aproximadamente 45°, lo cual nos lleva a simular el defecto interconectado, tal y como se muestra en la Fig. 11.

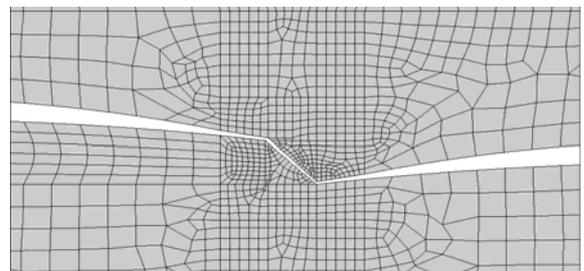


Fig. 11. Modelo de laminación escalonada CN 1.

En la Fig. 12 se observa el mapa de esfuerzo de v Mises en el defecto escalonado, y como las puntas de grieta registran mayor esfuerzo y una interacción simétrica respecto de la geometría del defecto.

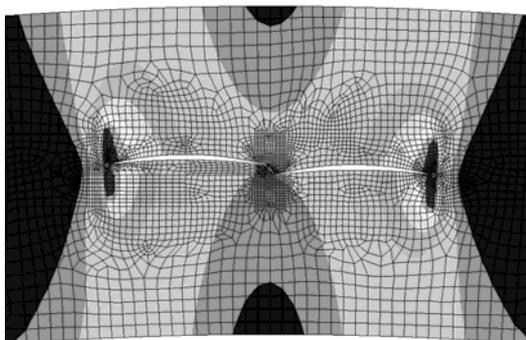


Fig. 12. Mapa del esfuerzo de Von Mises.

De la grafica 13 se observa como a una presión de 124 MPa se alcanza el esfuerzo último.

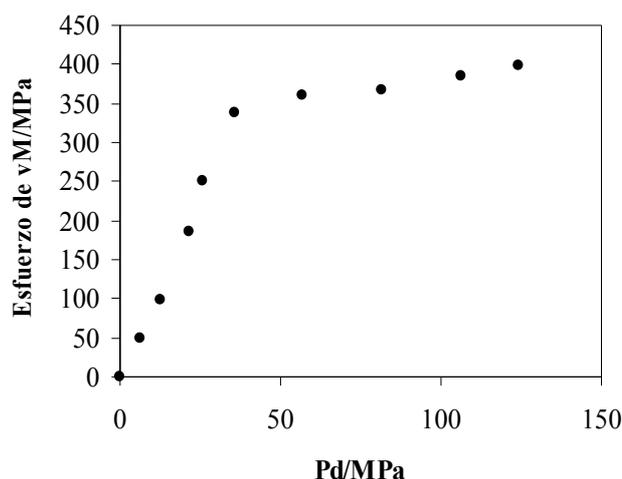


Fig. 13. Esfuerzo de vM & Pd región interlaminar para el caso No. 1.

6 Conclusiones

La presión en el defecto es preponderante en el modelo ya que la presión interna de los defectos produce una interacción tal que plastifica la región interlaminar.

A menor distancia de los defectos en la vertical se requiere de una menor presión en el defecto para que se logre la coalescencia de los mismos.

Una vez que se escalona el defecto y se presuriza nuevamente existe mayor interacción de los campos de esfuerzo a las superficies libres del tubo, esto es debido al mayor radio de la laminación ya escalonada, lo cual se manifiesta en el abultamiento localizado.

La influencia del esfuerzo externo es notoria ya que su mayor impacto se refleja en el efecto de cerradura del agrietamiento, situación que relaja el esfuerzo en la región interlaminar. Los ductos que más registran laminaciones son aquellos que trabajan a una menor presión de operación.

Una vez que se rebasa el esfuerzo último en la región interlaminar se interconectan estos defectos, además de contribuir a la plastificación de la parte media de la laminación, lo cual es justificante de la fractura al centro del abultamiento.

Referencias

- Miyosshi E y Tanaka T, 1976, Hydrogen- induced cracking os steels under wet hydrogen sulfide environment, *Journal of Engineering for Industry*, pp 12221-1230.
- Foxen J y Rahman S, 2000, Elastic-plastic of small cracks in tubes under internal pressure and bending, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 197, pp 75-87.
- Hirth J, 1980, Effects of hydrogen on the properties of iron and steel, *The Metallurgical Society of AIME*, Vol. 11 A, pp 861-890.
- Velázquez JL.G y Hallen JM, 1998, Mecánica de fractura en ductos de recolección y transporte de hidrocarburos, 3er Congreso de Ductos PEMEX, México, Vol. 1, pp 183-191.
- Iino M, 1978, The extension of hydrogen blister-crack array in linepipe steels, *Metallurgical Transactions*, Vol. 9A, pp 1581-1590.
- Zacaria MY and Davies TT, 1993, Formation and análisis of stack cracks in a pipeline steel, *Journal of Materials Science*, Vol. 28, pp 3322-3328.
- Zienkiewicz OC, 1995, *Finite element method*, Editorial Mc Graw Hill, España.
- Mishra SC y Parida BK, 1985, A study of crack-tip plastic zone by elastoplastic finite element analysis, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 22 No. 6, pp 951-956.
- Theory reference-Ansys, 2001, *Structures with Material Nonlinearities*, SAS IP Inc.
- Moussa WA, Bell R y Tan CL, 1999, The interaction of two parallel semi-elliptical surface cracks, under tension and bending, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 121, pp 323 -326.