








Aplicaciones de la ecuación de Griffith en el estudio de la grieta desarrollada en elementos mecánicos sujetos a esfuerzos axiales, que trabajan bajo condiciones de envejecimiento acelerado

Applications of Griffith's equation in the study of cracks developed in mechanical elements subject to axial stresses, working under accelerated aging conditions

M. Flores-Báez ^{a,b*}, I. Flores-Báez ^{a,b}, A. Sánchez-Cervantes ^b, G. Urriolagoitia-Sosa ^b
B. Romero-Ángeles ^b, I. F. Barajas-Ambríz ^b, G. Ramírez -Sánchez ^a.

^a Centro de Ingeniería Avanzada, Universidad Politécnica de Tecámac, Av. 5 de mayo, 557740, Tecámac de Felipe Villanueva, México.

^b Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, Edificio 5, 2° Piso, Col. Lindavista. C.P 07300, Ciudad de México.

Resumen

Los componentes mecánicos a menudo sufren fracturas debido a porosidades que se forman y se convierten en grietas debido a esfuerzos y la exposición al medio ambiente, sobre todo cuando trabajan en ambientes agresivos. Debido a esto es necesario estudiar y simular los aspectos que causan estas fracturas de forma inicial y así entender cómo se desarrollan y propagan. La mecánica de la fractura generalmente se aplica cuando el componente ya está a punto de fallar, utilizando el análisis de elementos finitos para evaluar el comportamiento de la fractura, sin embargo, también es esencial analizar las etapas anteriores para prever la vida útil restante y evaluar factores de corrosión del ambiente. Las variables externas incluyen radiación UV, temperatura y humedad, mientras que las variables internas son propiedades mecánicas del material. La degradación esperada se representa como una función del tiempo y estas variables. Se calcula el esfuerzo máximo aceptable y la longitud máxima permisible de la grieta para determinar si el componente es seguro. Se presentan algunos casos de estudio en materiales ferrosos AISI 4140, donde se midió la degradación en la periferia de una probeta y se calculó la tendencia de la degradación, así como el estudio del análisis del elemento finito, para poder identificar los procesos principales máximos que rodean a los límites de la grieta.

Palabras Clave:

Mecánica de la fractura, propagación de la grieta, tendencia a la degradación, intensificador de esfuerzos y análisis de elemento finito.

Abstract

Mechanical components often suffer fractures due to porosities that form and become cracks due to stress and exposure to the environment, especially when working in aggressive environments. Because of this, it is necessary to study and simulate the aspects that cause these fractures in the first place and thus understand how they develop and spread. Fracture mechanics is usually applied when the component is already on the verge of failure, using finite element analysis to evaluate the fracture behavior, however, it is also essential to analyze the previous stages to forecast the remaining service life and evaluate corrosion factors from the environment. The external variables include UV radiation, temperature, and humidity, while the internal variables are mechanical properties of the material. The expected degradation is represented as a function of time and these variables. The maximum acceptable stress and maximum allowable crack length are calculated to determine whether the component is safe. Some case studies in AISI 4140 ferrous materials are presented, where the degradation was measured at the periphery of a specimen and the degradation trend was calculated, as well as the study of finite element analysis, in order to identify the maximum main processes surrounding the crack boundaries.

Keywords:

Fracture mechanics, crack propagation, degradation tendency, stress intensifier, and finite element analysis.

1. Introducción

Los métodos existentes para el análisis de fracturas están bien establecidos para grietas visibles en componentes mecánicos, pero utilizando el análisis de elementos finitos, es posible prever los efectos de los esfuerzos en el elemento y comprender el

mecanismo de fractura en la zona elástica lineal. Sin embargo, estos análisis se realizan cuando el componente está al borde del fallo y su vida útil ha concluido. En etapas anteriores, cuando aún queda un tiempo de vida útil considerable, se pueden evaluar factores de corrosión del medio ambiente mediante herramientas estadísticas y analíticas. Debido a la aplicación de diversas variables durante el proceso de envejecimiento acelerado, se

*Autor para la correspondencia: misael_flores@uptecamac.edu.mx

Correo electrónico: misael_flores@uptecamac.edu.mx (Misael Flores Báez), israel_flores@uptecamac.edu.mx (Israel Flores Baez), arturasc4@hotmail.com (Arturo Sánchez Cervantes), gurriolagoitias@ipn.mx (Guillermo Urriolagoitia Sosa), romerobeatriz97@hotmail.com (Beatriz Romero Ángeles); ifba2001@hotmail.com (Israel Fernando Barajas Ambríz), gabriela_ramirez@uptecamac.edu.mx (Gabriela Ramírez Sánchez)

puede expresar el daño en el material como una función de la temperatura, niebla salina y radiación UV, considerándolas como variables externas, y las propiedades mecánicas internas del material como variables internas. Así, se representan las variables externas e internas respectivamente como X_i y Y_i , lo que permite expresar el desgaste esperado (DE) en función del tiempo (t):

Las variables externas aplicadas (X_i) son:

- a) Radiación UV - 350 a 380 nm.
- b) Temperatura del sistema - 50°C.
- c) Porcentaje de Humedad en el sistema (5% sal en peso) - 40%.
- d) Las variables internas del material (Y_i) incluyen:
- e) Resistencia a esfuerzos mecánicos.
- f) Dureza.

En Esta investigación se aborda el proceso de considerar la resistencia a los esfuerzos mecánicos en elementos como recipientes sujetos a presión interna. Se destacan las siguientes relaciones y conceptos clave, Se inicia definiendo las variables internas que son las atribuibles a las propiedades mecánicas del material y las externas que se refieren a las condiciones del medio ambiente y operación del componente, el siguiente paso es evaluar la resistencia a los esfuerzos mecánicos para lo que se introduce la relación.

$$P = (\mu \sigma) / r \tag{1}$$

Donde:

- P.- Es el esfuerzo máximo aceptable.
- μ .- Es el factor de seguridad.
- Σ .- Es el esfuerzo a la cedencia del material,
- r.- Es el radio del recipiente a presión.

Es importante considerar la importancia del factor K_{Ic} para medir la tenacidad del elemento y determinar la longitud máxima permisible de la grieta. Se presenta la ecuación

$$a = (K_{Ic})^2 / (\pi \sigma^2) \tag{2}$$

donde:

a.- es la longitud máxima permisible de la grieta.

Se destaca que estas ecuaciones consideran variables críticas como el tamaño de la grieta, el esfuerzo de cedencia y la intensidad de tensión crítica para evaluar si una grieta representa un riesgo para la estructura.

Se enfatiza que la presencia de intensificadores de esfuerzos, como agujeros o ranuras en el diseño del componente cerca de la grieta, puede alterar significativamente el comportamiento de la propagación de la fractura.

Se busca un enfoque para evaluar la integridad estructural de elementos sometidos a esfuerzos mecánicos, centrándose en factores clave como el tamaño de la grieta y la tenacidad del material. Es de suma importancia el considerar los intensificadores de esfuerzos en el análisis a desarrollar.

Tabla 1. Parámetros para el factor K,

Material	$G_{Ic} (kJm^{-2})$	$K_{Ic} (MNm^{3/2})$	$E (GPa)$
Acero aleado	107	150	210
Aluminio	20	37	69
Caucho	13	----	0.001
Madera	0.12	0.5	2.1

2. Desarrollo experimental

Parámetros del factor k para la resistencia a la fractura

Como siguiente paso se desarrolló el proceso de envejecimiento acelerado sobre la estructura del material acero *AISI D2*, durante un tiempo de 180 horas, el resultado del ataque se observó en la periferia de la probeta generando pequeñas microfracturas.

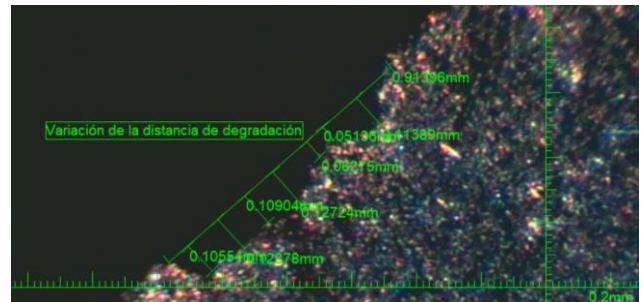


Figura 1.- Degradación en acero AISI 4140.

Se generaron los resultados de la profundidad de la degradación en la siguiente tabla.

Tabla 2: Resultados de la profundidad de la degradación.

No. de muestra	Profundidad en mm	XY	X^2
1	0.11389	0.11389	1
2	0.051	0.102	4
3	0.06275	0.18825	9
4	0.12724	0.50896	16
5	0.10904	0.5452	25
6	0.12878	0.77268	36
7	0.10554	0.73878	49
Σ	0.69824	2.96976	140

Con los valores obtenidos se generó el estudio de mínimos cuadrados generando las siguientes ecuaciones

$$Y = 0.07449 + 0.006314 x \tag{3}$$

Por lo que la tendencia a la degradación es de 0.006314 Las identificaciones del comportamiento de los valores de la degradación se pueden observar en el siguiente gráfico, así como la tendencia que se obtuvo.

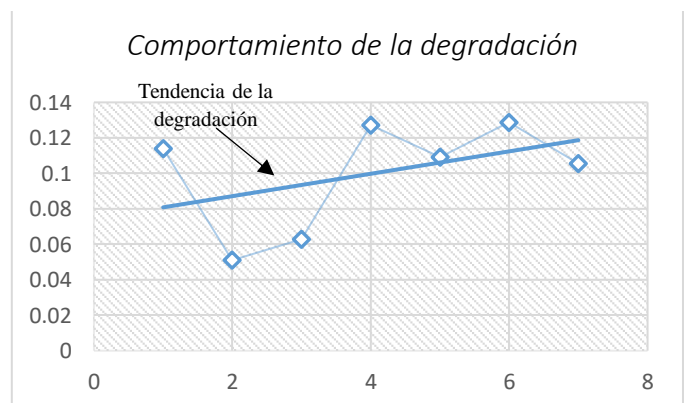


Figura 2.- Resultado de la degradación en probeta a 180 horas de envejecimiento acelerado.

Posteriormente se utilizó el software de simulación *LabView*, donde se aplicó la ecuación 2 y así evaluar si la distancia obtenida por el envejecimiento acelerado aplicado al material. Los datos iniciales para la aplicación de la simulación por *LabView* son los siguientes.

Radio del recipiente a presión 25 cm, factor de seguridad establecido de 0.85 y límite a la cedencia para el acero *AISI D2* se estableció en 200 MPa. El Software de simulación y control para procesos de ingeniería *LabView* genera los cálculos solicitados y representan los resultados en un ambiente gráfico que permite interpretar inmediatamente los resultados.

El algoritmo utilizado se basó en el desarrollo de la ecuación de Griffith.

$$A = \frac{K i c^2}{\pi \sigma^2} \quad (4)$$

Donde:

- Kic- Valor crítico de la intensidad de tensión.
- A- El valor máximo permisible de la grieta.
- σ – Esfuerzo a la cedencia del material.

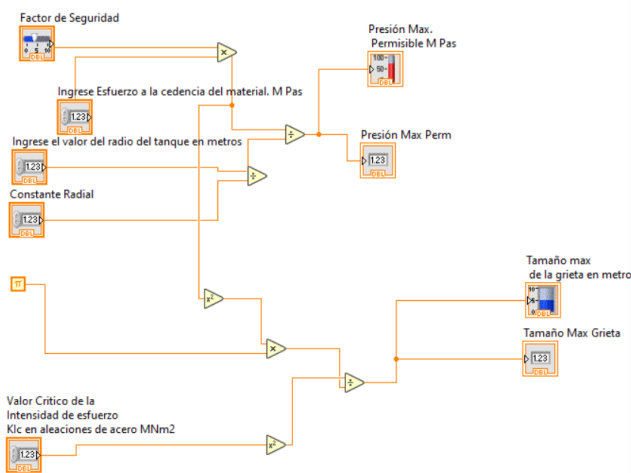


Figura 3.- Algoritmo utilizado para la obtención del tamaño permisible de la grieta

El desarrollo del algoritmo se generó para que arrojará de forma automática tanto el valor de la grieta máxima permisible como la presión máxima permisible que el tanque puede soportar. Los resultados arrojados se representan en la figura 4.

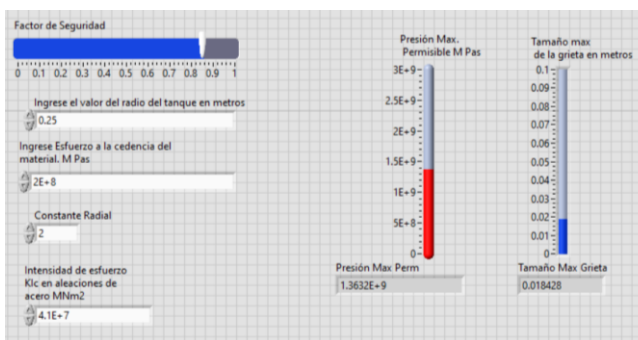


Figura 4.- Resultados arrojados por el algoritmo con la ecuación de Griffith.

2.2 Estudio metalográfico.

El acero *AISI 4140*, maneja una aleación principal de Cr-Mo, este se conoce como acero Cromo Molibdeno, este acero es ideal cuando se necesita soportar presiones elevadas en tanques o recipientes a presión, es ampliamente usado en la industria aeronáutica y automotriz. Pasando por herramientas, dispositivos de sujeción entre otros. La composición química que maneja el acero *AISI 4140*, es la siguiente:

Tabla 3: Propiedades del acero *AISI 4140*.

Material	C	Si	Mn
Acero 4140	0.43%	0.35%	0.1%

Las propiedades mecánicas típicas se obtienen después de la aplicación del tratamiento térmico de normalizado a 870°C, un recocido desde los 815°C y templado a 540°C. Aplicando el proceso para la caracterización del material se obtuvo. Las condiciones de la metalografía se obtuvieron siguiendo el procedimiento de caracterización para visualizar las siguientes fases.



Figura 5.- Microscopio metalográfico invertido.

El proceso de pulido es de suma importancia se aplicó mediante pasta de diamante de 0.5 micras, paños adecuados y la aplicación de alcohol isopropílico en abundancia para obtener las imágenes adecuadas.

La estructura característica es la martensita que se puede identificar en la Figura 6. Mediante la aplicación de la solución de alcohol con ácido nítrico conocido como Nital durante 10 segundos.

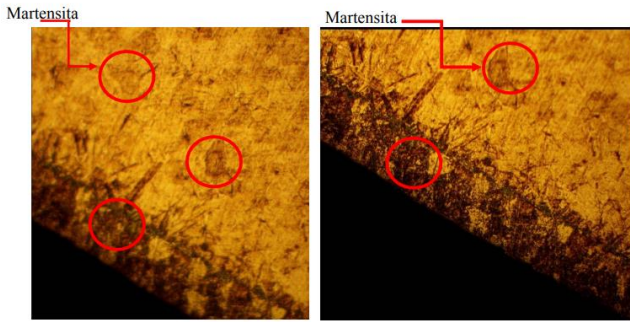


Figura 6. Metalografía del acero 4140 sin ataque de envejecimiento.

Después de la aplicación de los ciclos de envejecimiento al material durante 180 horas, se encontraron los siguientes resultados:

- a) El tamaño de grano se encuentra más definido, en el material posteriormente al ataque de envejecimiento.
- b) En la periferia de la probeta se pueden observar la formación de microgrietas, las cuales cambian la forma del perímetro del material.
- c) La condición de la grieta muestra las propiedades de una fractura de tipo dúctil, ya que permite observar la aparición de un plano interno en la grieta de estudio. La metalografía se muestra en la figura 7.

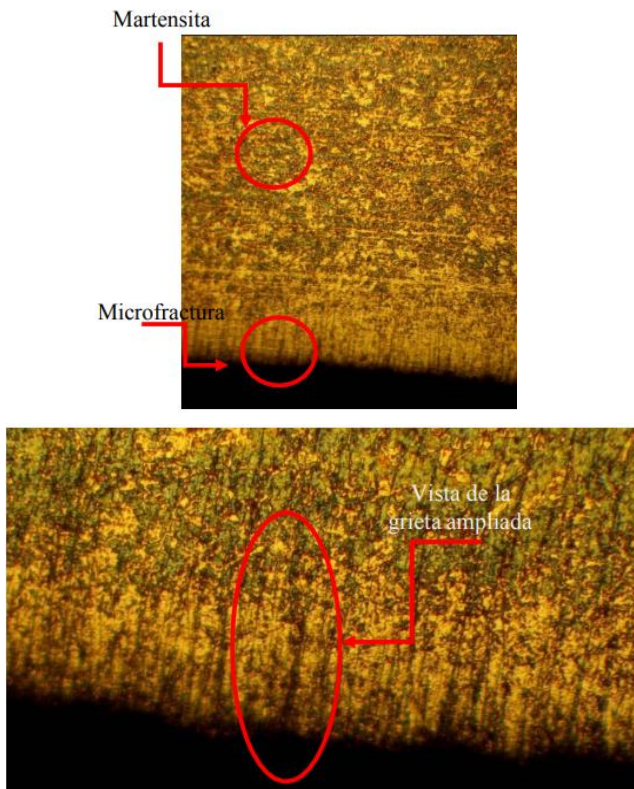


Figura 7.- Metalografía del acero 4140 atacado a 180 horas de envejecimiento acelerado.

2.3 Análisis de la dirección de la grieta

En el estudio del comportamiento de la fractura los esfuerzos que tienen un impacto directo se denominan esfuerzos principales y en el diseño mecánico, se conocen como esfuerzos principales máximos y esfuerzos principales mínimos, ya que los esfuerzos

cortantes son nulos. La determinación de los esfuerzos cortantes máximos se realiza cuando se produce una fractura de forma dúctil. Es decir, cuando se supera el límite de cedencia del material en algún punto del componente mecánico fracturado. En este punto, el esfuerzo cortante máximo se calcula a partir de la diferencia entre el esfuerzo cortante máximo y el esfuerzo cortante mínimo. El círculo de Mohr proporciona una representación gráfica adecuada de la relación entre los esfuerzos normales y los esfuerzos cortantes en función de su magnitud. El estudio del círculo de Mo se puede aplicar inicialmente en dos dimensiones, donde los esfuerzos torsionales actúan en el eje de las ordenadas desde el origen. Mientras que los esfuerzos normales se encuentran en el eje de las abscisas. La figura 5 nos ilustra la forma en que funciona el círculo de Mohr.

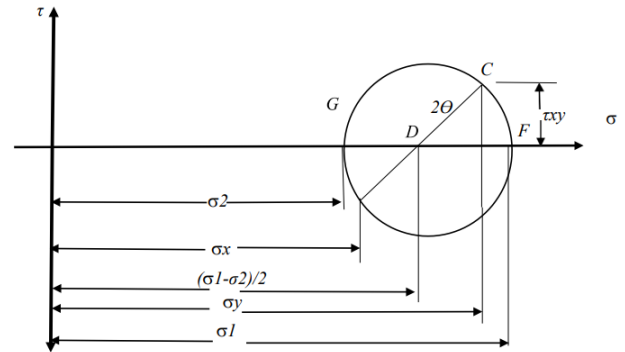


Figura 5.- Esfuerzos principales máximos en Círculo de Mohr.

Esto se desarrolla en conjunto de las teorías de falla que los materiales de los elementos mecánicos tienen cuando estos se encuentran en servicio, Existen seis teorías de falla que son utilizadas cuando un material se somete a cargas que generan esfuerzos de tipo axial, el más analizado es el esfuerzo a la tensión las expresiones que se desprenden de este análisis son: 1. El esfuerzo principal, se encuentra cuando el material llega al valor del límite de cedencia del material, cuando está sometido a tensión axial. 2. La deformación unitaria encontrada. 3. El trabajo total de la deformación 4. El trabajo de distorsión 5. El esfuerzo octaédrico. 6. El esfuerzo tangencial máximo.

Los criterios antes mencionados se pueden utilizar para lograr generar un parámetro que pueda predecir la plasticidad en los materiales. Aunque resulta demasiado complejo determinar cuál de estos factores es el que propicia la deformación plástica del material. La teoría de falla aplicables a la fractura que tomaremos como referencia para poder determinar el comportamiento de la fractura será la de la teoría para el máximo esfuerzo principal que establece que la condición de plasticidad en el material comenzará cuando las condiciones de los esfuerzos aplicados alcancen el valor del límite de cedencia que este material posea. Esta teoría es totalmente aplicable para los materiales que presentan una fractura frágil, para los materiales que presentan una fractura de tipo dúctil se considera más apropiado el análisis de la deformación lineal. Entonces debido a que se utiliza la teoría de Mohr se tomará la teoría del esfuerzo principal máximo para determinar

2.4 Aplicación en análisis de recipientes a presión

El objetivo de realizar el análisis de elemento finito, para encontrar la forma en que la grieta se propaga se aplicó a un

elemento mecánico muy común en las diferentes industrias, el estudio se genera para un recipiente sujeto a presión.

Las condiciones de frontera se tomaron siguiendo la norma ASME desarrollada para los recipientes sometidos a presión.

- a) Presión durante la operación 160 psi.
- b) Esfuerzo a la cedencia del material 15700 psi.
- c) Volumen del recipiente 600 ft³
- d) Límite elástico manejado 30000 psi.

Con respecto al margen de corrosión aceptable para los recipientes sujetos a presión en la práctica se establece que la condición aceptable es de 1.5875 mm, aproximadamente 1/16 in en el caso que operen para el servicio de vapor de agua, cuando se trate de algún fluido estático, el margen de corrosión aceptable queda a criterio del diseñador. Un factor que puede servir como indicador es el considerado por la Norma USC-25, que propone que, para un recipiente sujeto a presión, un desgaste de 1/16 in en doce años es aceptable, es decir aproximadamente 0.005 in por cada año. De acuerdo con estas normas en algunos casos el efecto de la corrosión queda como indeterminado y lo refieren como un aspecto que el diseñador debe considerar. Los aspectos críticos en el diseño de un recipiente sujeto a presión donde se considera un margen de corrosión son en la siguiente relación, para poder encontrar el parámetro F. Que es el que considera la relación del volumen a contener con la longitud del mismo.

$$F = P / (C * S * E * f) \tag{5}$$

- P.- Presión de diseño
- C.- Margen de Corrosión permitida.
- S.- Esfuerzo del material.
- E.- Eficiencia de la soldadura.

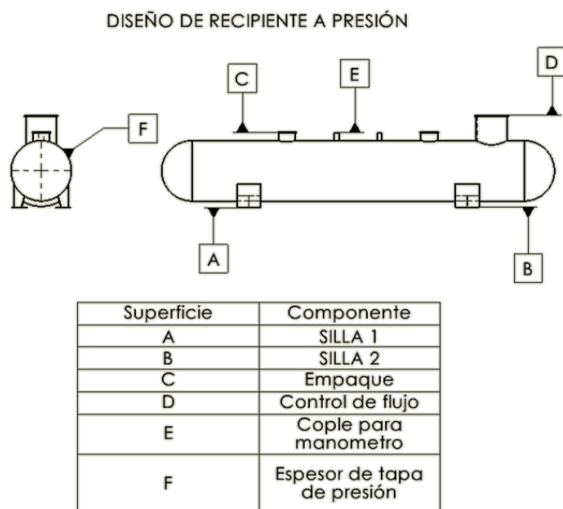


Figura 6. Figura del recipiente a presión a ser analizado.

Los valores encontrados establecen una grieta máxima permisible de 1.8mm y si lo comparamos con los valores de la degradación obtenida de 0.12878 mm, no representa ningún riesgo para la integridad estructural del componente.

Aplicando el análisis numérico se encontró mediante la realización de ecuaciones diferenciales parciales, una matriz de rigidez, la cual se genera con el mismo número de ecuaciones y el mismo número de nodos que se tengan en el componente, así que, se generó el discretizado de la sección del recipiente a presión, utilizando los siguientes parámetros:

- a) Parámetro del elemento 7.45 *10⁻² mm
- b) Se obtuvieron 10836 nodos.
- c) Se obtuvieron 4034 elementos.

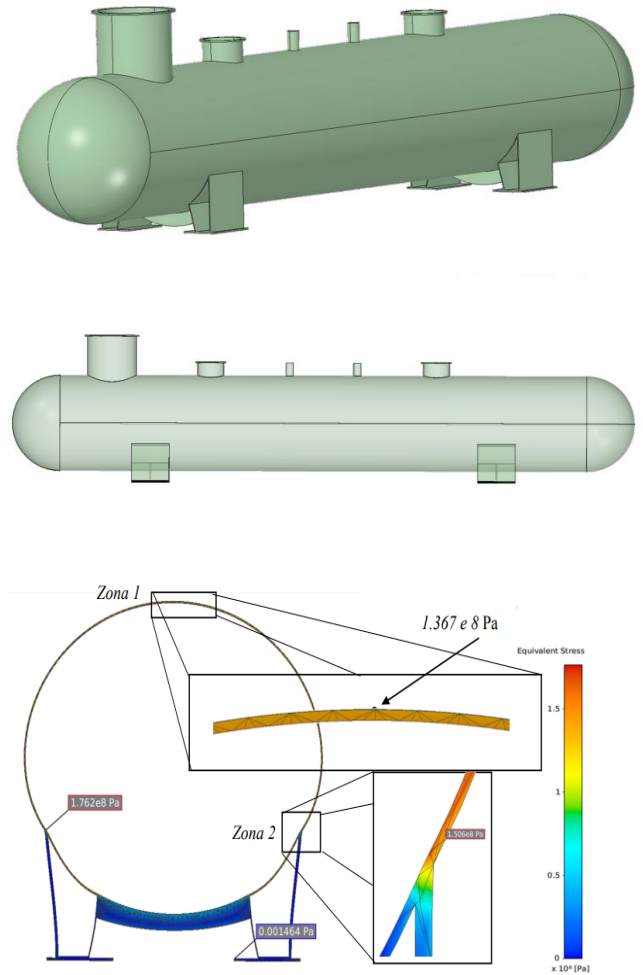


Figura 7. Diseño C.A.D a y Resultado del análisis del elemento finito b.

El resultado más alto se encontró en la zona 1 y zona 2 mostrada en la figura 7, estos son 1.36 e 8 Pa y 1.5 e 8 Pa, respectivamente. El análisis se desarrolló sin la aplicación de un envejecimiento en la estructura del recipiente a presión.

Posteriormente se aplicó en el diseño C.A.D, la aparición de un ataque de envejecimiento. Este se muestra en la figura 8.

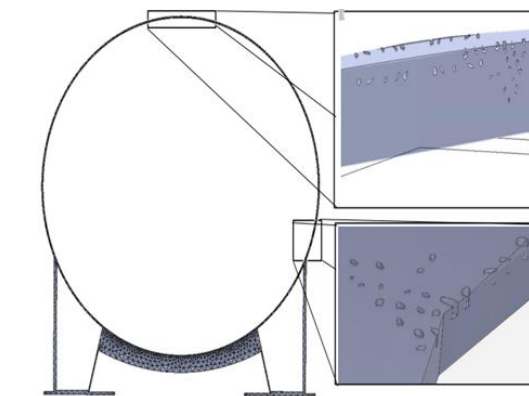


Figura 8. Aplicación en CAD, del envejecimiento acelerado.

Al modelo C.A.D se le aplicó la misma condición de presión interna mostrando los siguientes resultados en la figura 9.

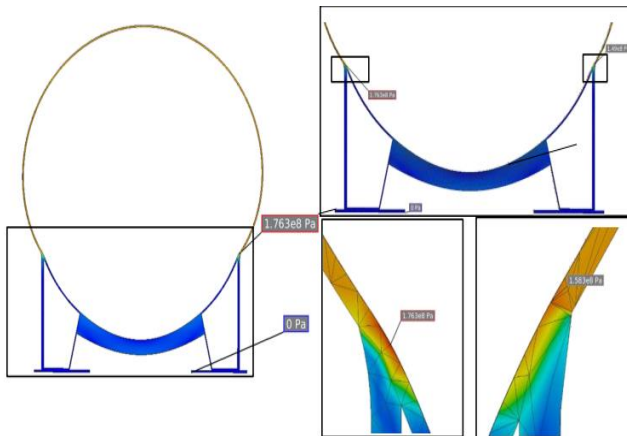


Figura 9. Resultado del envejecimiento acelerado.

El resultado en la propagación de la grieta se puede apreciar la propagación se genera en los nodos donde se presenta el esfuerzo principal máximo.

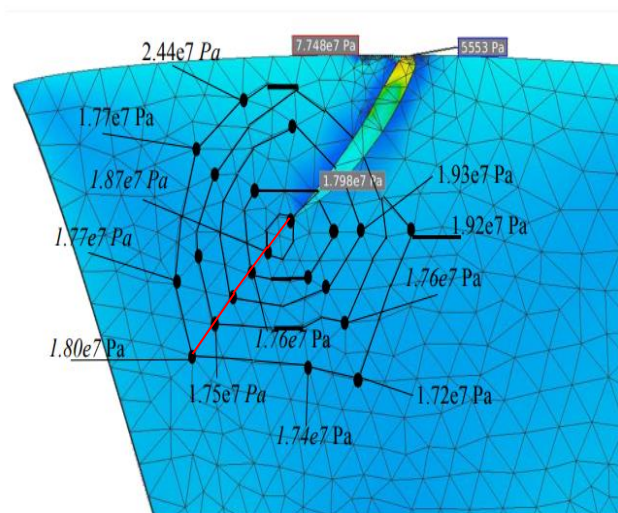


Figura 9. Propagación de la grieta en la periferia del tanque.

3. Resultados

La visión que nos dan los temas estudiados es que el efecto del envejecimiento acelerado en los materiales mecánicos desarrolla puntos concentradores de esfuerzos debido a que se desarrolla una disminución del espesor que el material tenga y también porque se van generando geometrías complejas junto con los cordones de soldadura que propician que la distribución de los esfuerzos mecánicos no sea la propicia para que el material tenga su mejor resistencia. Estas pequeñas grietas por corrosión tienden a ser iniciadoras de la propagación de las grietas, principalmente cuando el tipo de cargas aplicadas es cíclico, este fenómeno puede ser peligroso especialmente cuando se sobre pasa el espesor mínimo permisible de 1.58 mm, debido a esto, la corrosión y la aplicación de cargas por fatiga implican un fenómeno peligroso que no se debe pasar por alto ya que afectan la integridad estructural del recipiente.

El estudio del elemento finito determinó los siguientes aspectos:

- La grieta que se genera funciona como un intensificador de esfuerzos.
- La aplicación del envejecimiento acelerado puede llegar a comprometer la estructura de los recipientes sujetos a presión.
- Las grietas ocasionadas por envejecimiento se propagan siguiendo el esfuerzo principal máximo.
- Para componentes que operan en estas condiciones, es fundamental implementar estrategias de mantenimiento preventivo y selectivo de materiales que puedan resistir la corrosión y los esfuerzos mecánicos, con el fin de prolongar la vida útil y garantizar la seguridad y confiabilidad de los sistemas

4. Conclusiones

Las pruebas de envejecimiento acelerado son esenciales para evaluar la resistencia de los materiales y recubrimientos contra la corrosión, asegurando la calidad y durabilidad en diversas aplicaciones. En esta investigación se obtuvo un parámetro adecuado para medir la tendencia a la corrosión en un *Acero 4140* es de 0.006314 , mientras que se establece que después de la aplicación de *180 horas* de envejecimiento acelerado existe la aparición de microfracturas que de acuerdo a la simulación por elemento finito se convierten en puntos intensificadores de esfuerzos para favorecer la propagación de la grieta mediante la teoría encontrada por Urriolagoitia Calderón (2007), que establece que la grieta corre donde se encuentre el esfuerzo principal máximo. Por lo que corresponde a este estudio se puede afirmar que, a pesar de los amplios márgenes de seguridad, en entornos industriales con condiciones extremas, como altas temperaturas, presiones y esfuerzos mecánicos, pueden ocurrir accidentes debido a la formación de fisuras por fatiga y corrosión.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Politécnica de Tecámac, al Instituto Politécnico Nacional, y al CONACHYT por el apoyo brindado a esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- ANSYS, Versión R19.0, Estándar user manual, 2020.
- Arad, S., Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth in Viscoelastic Solids, Tesis de Doctorado, University of London. November 1972. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102943>
- Berkovits, A., Aeronautical fatigue in the electronic era, Proceedings of the 15th ICAF Symposium, pp 1-12, 1989.
- Boyer, H. E., Atlas of Fatigue Curves, Ed. American Society for Metals, 1986.
- Krishnan, K., Perez, R. y Kumar, V., Effects of pitting corrosion on the fatigue behavior of aluminum alloy 7075-T6 modeling and experimental studies, Journal of Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, Vol. 297, pp 223-229, 2001

- Dowling, N. E., *Mechanical Behavior of Materials*, Ed. Prentice-Hall International Editions, pp 500-650, 1993.
- Margolin, L. G., A generalized Griffith criterion for crack propagation, *Engineer Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 3, pp 539-543, 1984.
DOI: 10.1016/0013-7944(84)90010-9
- Press, W. H., Flannery, B. P., Teukolsky, S. A. y Vetterling, W. T., *Numerical Recipes*, Ed. Cambridge University Press, 1987.
DOI: <https://doi.org/10.2307/3616529>
- Smith, J. A. *Mecánica de Materiales Avanzada*, Ed. Universitaria, pp 78-80., 2020.
- Timoshenko, S. P. y Goodier, J. N., *Theory of Elasticity*, Ed. Mc Graw Hill International, 1970.
- Urriolagoitia S. G., Durodola, J. F. y Fellows, N. A., Effect of strain hardening on residual stress distribution in beams determined using the crack compliance method, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 42, No. 2, pp 151-121, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1243/03093247JSA165>
- Walter S., *A History of Fatigue*, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 54, N.o 2, pp 270-300. 1996.
DOI: 883ee8db2c2f274e