

Estudio paramétrico y análisis numérico-estadístico del crecimiento de grieta en recipientes a presión de pared delgada sometidos a cargas térmicas mediante un diseño de experimentos unifactorial

Luis David Pinzón Guiza

Cristian Felipe Moreno Sánchez

Trabajo de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

PhD. Manuel de Jesús Martínez

Codirector

Ingeniero Mecánico Omar Andrés Fuentes Manrique

Universidad Industrial de Santander

Facultad de ingeniería Físico-mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

A Dios por brindarme la fortaleza, el conocimiento y la perseverancia para poder llegar a este logro en mi vida.

A los profesores que estuvieron dispuestos y nos brindaron su colaboración para el desarrollo de este proyecto y crecimiento personal.

A mis compañeros de estudio y amigos que estuvieron durante este proceso de formación, por el apoyo y sus recomendaciones para poder avanzar en cada uno de los obstáculos que se presentaron en el camino.

A mi madre, mi padre, mi hermana, mis abuelos, mis tíos y a toda la familia. Por estar siempre apoyándome durante este proceso, motivándome a seguir adelante, siempre queriendo que yo cumpla cada una de mis metas propuestas.

A la Universidad Industrial de Santander, por permitir la culminación de esta meta, como miembro de esta importante institución.

A mi director y codirector de trabajo de grado por sus acompañamientos y el apoyo incondicional en el desarrollo del proyecto y todos sus consejos y recomendaciones.

A cada uno de los docentes, por toda su orientación, todo lo aprendido durante mi formación y camino para poder optar por el título de Profesional en Ingeniería Mecánica.

A mi familia y amigos por su apoyo incondicional y estar siempre motivándome.

***Luis David Pinzón Güiza***

En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme llegar hasta aquí, por ser mi guía y mi fortaleza.

A mis padres, Raúl Moreno y Flor Sánchez, por su amor incondicional, su apoyo inquebrantable y sus sacrificios silenciosos; por creer en mí y enseñarme que el esfuerzo es el camino para alcanzar los sueños.

A mis hermanos, Sergio Moreno y Edison Moreno, por su amor y apoyo incondicional, por ser mi refugio y mi motor.

A mi director y codirector de este trabajo de grado, por su valiosa orientación y su compromiso con mi formación académica, por sus acertados consejos y por compartir generosamente su conocimiento y experiencia.

A mi compañero de tesis, Luis Pinzón por el trabajo en equipo y por compartir conmigo este desafío.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica, por brindarme un entorno de excelencia y los recursos necesarios para formarme como ingeniero y como persona.

A mis amigos y compañeros, por hacer de este camino una experiencia inolvidable.

A todos los profesores que dejaron una huella en mi formación, gracias por compartir su conocimiento, por su exigencia, por inspirarme a crecer académica y personalmente.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento.

***Cristian Felipe Moreno Sánchez***

**Tabla de contenido**

|                                                                            | <b>Pág.</b> |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Introducción .....                                                         | 12          |
| 1. Objetivos .....                                                         | 14          |
| 1.1. Objetivo general .....                                                | 14          |
| 1.2. Objetivos específicos.....                                            | 14          |
| 2. Marco teórico .....                                                     | 15          |
| 2.1. Estado del arte .....                                                 | 15          |
| 2.1.2 Antecedentes.....                                                    | 15          |
| 2.2. Recipientes a Presión. ....                                           | 16          |
| 2.2.1. Generalidades del Código ASME .....                                 | 19          |
| 2.3. Mecánica de la fractura .....                                         | 20          |
| 2.3.1. Factor de intensidad de esfuerzos.....                              | 22          |
| 2.3.2. Modos de fractura.....                                              | 22          |
| 2.3.3. Tenacidad a la fractura KIC .....                                   | 23          |
| 2.3.4 Tasa de liberación de energía .....                                  | 24          |
| 2.3.5 Plasticidad en el frente de la grieta.....                           | 24          |
| 2.3.6 Corrección de Irwin.....                                             | 25          |
| 2.3.7 Límites de aplicabilidad del LEFM.....                               | 26          |
| 2.3.8. Mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP).....                  | 27          |
| 2.3.9. Curva de resistencia R-J en fractura elastoplástica. ....           | 28          |
| 2.4. Relación entre LEFM y EPFM.....                                       | 30          |
| 2.5. Formación y propagación de las grietas en recipientes a presión ..... | 30          |

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 2.5.1. Grietas de fabricación.....                                    | 30 |
| 2.5.2. Grietas en Servicio: .....                                     | 31 |
| 2.5.3. Clasificación geométrica de las grietas .....                  | 32 |
| 2.5.4. Zonas Críticas de Aparición de Grietas.....                    | 33 |
| 2.6. Esfuerzo térmico .....                                           | 34 |
| 2.6.1. Principio de superposición en mecánica de la fractura .....    | 35 |
| 2.7. Mecánica computacional y método numérico.....                    | 35 |
| 2.8. Diseño de experimentos y análisis de inferencia estadística..... | 37 |
| 2.8.1. Análisis de varianza ANOVA .....                               | 38 |
| 3. Marco metodológico .....                                           | 39 |
| 3.1. Descripción del sistema estudiado .....                          | 39 |
| 3.2. Identificación de parámetros .....                               | 41 |
| 3.2.1. Parámetros geométricos de la grieta.....                       | 42 |
| 3.2.2. Parámetros de carga .....                                      | 43 |
| 3.2.3. Parámetros del material.....                                   | 44 |
| 3.2.4. Supuestos del modelo.....                                      | 44 |
| 3.3. Modelado numérico.....                                           | 45 |
| 3.3.1. Obtención geometría .....                                      | 46 |
| 3.3.2. Análisis por elementos finitos .....                           | 47 |
| 3.3.3. Aplicación de cargas y condiciones de frontera .....           | 49 |
| 3.3.4. Generación de malla.....                                       | 53 |
| 3.3.5. Incorporación de la grieta al recipiente .....                 | 54 |
| 3.3.6. Estudio de convergencia de malla .....                         | 55 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3.7. Selección de la malla.....                                         | 57 |
| 4. Resultados .....                                                       | 59 |
| 4.1. Validación del modelo.....                                           | 59 |
| 4.2. Tamaño de grieta .....                                               | 63 |
| 4.3. Diseño de experimentos y análisis estadístico .....                  | 65 |
| 5. Análisis de resultados .....                                           | 71 |
| 5.1. Análisis del factor de intensidad de esfuerzos y la integral J ..... | 71 |
| 5.1.1. Transición al régimen elastoplástico .....                         | 72 |
| 5.2. Interpretación del ANOVA.....                                        | 72 |
| 6. Conclusiones .....                                                     | 74 |
| 7. Recomendaciones.....                                                   | 76 |
| Referencias bibliográficas .....                                          | 77 |

**Lista de tablas**

|                                                                                      | <b>Pág.</b> |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Tabla 1 <i>Relación LEFM y EPFM.</i> .....                                           | 30          |
| Tabla 2. <i>Condiciones de trabajo del recipiente.</i> .....                         | 40          |
| Tabla 3. <i>Propiedades del material.</i> .....                                      | 44          |
| Tabla 4. <i>Especificaciones del material según ASME</i> .....                       | 49          |
| Tabla 5. <i>Parámetros del diseño de la grieta.</i> .....                            | 55          |
| Tabla 6. <i>Convergencia de malla en la punta de la grieta.</i> .....                | 56          |
| Tabla 7. <i>Datos seleccionados del mallado en ANSYS.</i> .....                      | 58          |
| Tabla 8. <i>Datos de <math>K_I</math> para las diferentes presiones.</i> .....       | 60          |
| Tabla 9. <i>Datos de la integral <math>J</math> para diferentes presiones.</i> ..... | 62          |
| Tabla 10. <i>Parámetros escogidos con sus niveles.</i> .....                         | 65          |
| Tabla 11. <i>Valores de profundidad.</i> .....                                       | 66          |
| Tabla 12. <i>Datos de temperatura.</i> .....                                         | 66          |
| Tabla 13. <i>Diseño de experimentos.</i> .....                                       | 67          |
| Tabla 14. <i>Diseño experimental del factor Presión.</i> .....                       | 68          |
| Tabla 15. <i>Diseño experimental del factor Gradiente de Temperatura.</i> .....      | 69          |
| Tabla 16. <i>Diseño experimental del factor Profundidad Relativa.</i> .....          | 70          |
| Tabla 17. <i>Valores del cuadrado medio para cada parámetro.</i> .....               | 71          |

**Lista de figuras**

|                                                                                                | <b>Pág.</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Figura 1. <i>Recipiente a presión cilíndrico horizontal.</i> .....                             | 17          |
| Figura 2. <i>Código ASME aceros para recipientes a presión.</i> .....                          | 20          |
| Figura 3. <i>Grieta en placa infinita sujeta a tensión remota.</i> .....                       | 21          |
| Figura 4. <i>Modos de carga que se le aplica a una grieta.</i> .....                           | 23          |
| Figura 5. <i>Estimación zona plástica</i> .....                                                | 25          |
| Figura 6. <i>Corrección de Irwin en zona plástica</i> .....                                    | 26          |
| Figura 7. <i>Curva J-R de un material dúctil.</i> .....                                        | 28          |
| Figura 8. <i>Tipos de corrosión en la industria petrolera.</i> .....                           | 32          |
| Figura 9. <i>Esfuerzos un recipiente a presión cilíndrico.</i> .....                           | 33          |
| Figura 10. <i>Sistema de fuerzas incluyendo cargas y reacciones de enlaces externos.</i> ..... | 36          |
| Figura 11. <i>Clasificación de los recipientes a presión.</i> .....                            | 40          |
| Figura 12. <i>Esquema del recipiente a presión.</i> .....                                      | 46          |
| Figura 13. <i>Diseño del recipiente a presión.</i> .....                                       | 47          |
| Figura 14. <i>Lamina analizada en ANSYS.</i> .....                                             | 48          |
| Figura 15. <i>Lamina analizada en ANSYS con su longitud</i> .....                              | 48          |
| Figura 16. <i>Lamina con vista frontal en ANSYS</i> .....                                      | 50          |
| Figura 17. <i>Lamina con vista isométrica en ANSYS</i> .....                                   | 51          |
| Figura 18. <i>Carga mecánica en ANSYS</i> .....                                                | 52          |
| Figura 19. <i>Carga térmica en ANSYS</i> .....                                                 | 53          |
| Figura 20. <i>Malla general en ANSYS</i> .....                                                 | 54          |
| Figura 21. <i>Grieta en ANSYS</i> .....                                                        | 55          |

|                                                                                   |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 22. <i>Curva de la convergencia de malla.</i> .....                        | 57 |
| Figura 23. <i>Mallado en la punta de la grieta.</i> .....                         | 58 |
| Figura 24. <i>Mallado con la grieta.</i> .....                                    | 59 |
| Figura 25 <i>Factor de intensidad de esfuerzos vs Presión.</i> .....              | 61 |
| Figura 26. <i>Factor de intensidad de esfuerzos vs Longitud de grieta.</i> .....  | 61 |
| Figura 27. <i>Influencia de la profundidad inicial de la grieta</i> .....         | 64 |
| Figura 28. <i>Análisis de varianza del factor presión.</i> .....                  | 69 |
| Figura 29. <i>Análisis de varianza del factor Gradiente de Temperatura.</i> ..... | 69 |
| Figura 30. <i>Análisis de varianza del factor Profundidad Relativa.</i> .....     | 70 |

## Resumen

**Título:** Estudio paramétrico y análisis numérico-estadístico del crecimiento de grieta en recipientes a presión de pared delgada sometidos a cargas térmicas mediante un diseño de experimentos unifactorial

**Autores:** Luis David Pinzón Guiza y Cristian Felipe Moreno Sánchez

**Palabras clave:** Recipientes a presión, crecimiento de grieta, estudio paramétrico, Diseño de Experimentos unifactorial

**Descripción:** La integridad estructural de los recipientes a presión es crítica en la industria, especialmente cuando se ven sometidos a la presencia de defectos tipo grieta bajo condiciones combinadas de carga mecánica y térmica. En este proyecto se realizó un estudio paramétrico para determinar qué parámetro influye mayormente en el crecimiento de una grieta ya existente en el recipiente a presión horizontal de pared delgada, por medio del Factor de Intensidad de Esfuerzos ( $K_I$ ), mediante el método de elementos finitos en ANSYS, a partir de un modelo generado en SolidWorks, con el fin de representar computacionalmente el comportamiento de la grieta sometida a diferentes tipos de cargas. Los resultados obtenidos permiten establecer la sensibilidad del parámetro  $K_I$  corregido por la plasticidad, ante variaciones de presión, temperatura y profundidad de la grieta. Utilizando un diseño de experimentos unifactorial que nos indicará cuál es el parámetro con mayor impacto en la propagación de la grieta, para determinar niveles críticos que afectan la integridad estructural. Los resultados obtenidos permiten establecer la presión como el factor más influyente con un 99.3%, el factor de profundidad un 0.38% y el factor térmico un 0.29%. Esta metodología ayudará en la industria a identificar mejor las condiciones de crecimiento de la grieta, por medio del análisis computacional de la mecánica de fractura el cual ha sido aceptado como un buen reemplazo para las pruebas piloto y los ensayos de laboratorio.

---

Trabajo de grado

Facultad de ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Manuel de Jesús Martínez, Ingeniero Mecánico. Codirector: Omar Andrés Fuentes Manrique.

### Abstract

**Title:** Parametric study and numerical-statistical analysis of crack growth in thin-walled pressure vessels subjected to thermal loads using a single-factor experimental design

**Authors:** Luis David Pinzón Guiza y Cristian Felipe Moreno Sánchez

**Key Words:** Pressure vessels, crack growth, parametric study, single-factor design of experiments

**Description:** The structural integrity of pressure vessels is critical in the industry, especially when they are subjected to crack-type defects under combined conditions of mechanical and thermal loading. In this project, a parametric study will be carried out to determine which parameter has the greatest influence on the growth of an existing crack in the thin-walled horizontal pressure vessel, using the Stress Intensity Factor ( $K_I$ ) corrected by plasticity, through the finite element method in ANSYS, based on a model generated in SolidWorks, in order to computationally represent the behavior of the crack subjected to different types of loads. The results obtained allow us to establish the sensitivity of the parameter  $K_I$  to variations in pressure, temperature and depth of the crack. Using a one-factor experimental design that would indicate which parameter has the greatest impact on crack propagation, to determine critical levels that affect structural integrity. The results obtained allow us to establish pressure as the most influential factor with 99.3%, the depth factor with 0.38% and the thermal factor with 0.29%. This methodology will help the industry to better identify crack growth conditions, through computational analysis of fracture mechanics, which has been accepted as a good replacement for pilot tests and laboratory trials.

---

Degree Work.

Industrial University of Santander. Mechanical Engineering. Director: Manuel de Jesús Martínez.

Codirector: Omar Andrés Fuentes Manrique.

## Introducción

La presencia y propagación de grietas en recipientes a presión de pared delgada representa un desafío significativo en la ingeniería mecánica, pues compromete la integridad estructural del equipo (Megyesy, 2001). Múltiples factores y mecanismos, como sobrecarga, fatiga, fragilización y defectos de fabricación pueden propiciar la iniciación de grietas microscópicas en sus paredes (Red River, 2022). Una vez iniciadas, estas grietas tienden a evolucionar y propagarse con el tiempo bajo la influencia de parámetros operativos como la presión interna cíclica y la temperatura, con el riesgo de fallar a valores de esfuerzos inferiores a los admisibles por el material (AROTEC, 2023). Por esta razón, la predicción precisa del crecimiento de grietas constituye un aspecto fundamental en los planes de inspección y mantenimiento para gestionar el ciclo de vida del equipo (Joshi & Price, 2009), y así evitar fallas catastróficas que afecten la seguridad industrial y generen pérdidas económicas significativas (ASME, 2023).

El análisis de este fenómeno se complica por la interacción simultánea de múltiples variables. El riesgo de una grieta es normalmente evaluado mediante el cálculo de parámetros de fractomecánica como el Factor de Intensidad de Esfuerzos (Anderson, 2017), pero su crecimiento es de difícil predicción analítica o experimental debido al alto costo y riesgo asociado a los ensayos físicos. Por ello, la simulación numérica por el Método de Elementos Finitos (MEF) surge como una respuesta robusta y se encuentra contemplada dentro de los métodos Fitness-For-Service (FFS) para evaluación de integridad estructural (API 579-1/ASME FFS-1, 2016; Mellings & Baynham, 2010).

Ante este panorama, resulta fundamental complementar el alcance predictivo del MEF con metodologías estadísticas que permitan optimizar el proceso de experimentación e interpretar los resultados de manera robusta. El Diseño de Experimentos y el Análisis de Varianza (ANOVA) son

métodos de estadísticos que permiten planificar un conjunto mínimo de simulaciones numéricas para obtener el máximo conocimiento, aislando el efecto de cada variable y determinando su significancia estadística con un nivel de confianza definido (Rushing et al, 2013).

En consecuencia, dado lo expuesto y considerando la necesidad de superar la limitación de los estudios numéricos que carecen de un análisis estadístico, surge la siguiente pregunta: ¿Cómo influyen individual y estadísticamente los parámetros operativos y geométricos clave (presión interna, temperatura y profundidad de la grieta) en el Factor de Intensidad de Tensiones, en la propagación de grietas en un recipiente a presión, y cuál de estos factores presenta una influencia más significativa en los recipientes a presión de pared delgada?

Para responder a esta pregunta, este trabajo propone una metodología que integra la simulación paramétrica por MEF utilizando ANSYS con un Diseño de Experimentos unifactorial y un posterior Análisis de Varianza (ANOVA). Este enfoque permitirá no solo modelar el fenómeno físico, sino también cuantificar con rigor estadístico el peso específico de cada parámetro en el crecimiento de la grieta, proporcionando así una herramienta valiosa para la priorización de esfuerzos en el mantenimiento predictivo y la optimización del diseño de estos equipos críticos.

## **1. Objetivos**

### **1.1. Objetivo general**

Realizar un estudio paramétrico en el crecimiento de grieta en un recipiente a presión cilíndrico horizontal de pared delgada y sometido a cargas térmicas para determinar la influencia de cada parámetro en su crecimiento, mediante un análisis numérico y un diseño de experimentos unifactorial.

### **1.2. Objetivos específicos**

Identificar y seleccionar un conjunto de parámetros que describan la grieta y su entorno termo-mecánico; definir para cada uno su alcance de variación y supuestos del modelo, con el fin de contar con una parametrización que permita un diseño de experimentos unifactorial.

Modelar numéricamente a través de un paquete de software un recipiente a presión cilíndrico horizontal de pared delgada con grieta, parametrizando sus dimensiones y forma de la grieta, así como las condiciones térmicas y mecánicas, para su posterior variación.

Realizar un diseño de experimentos unifactorial sobre el modelo parametrizado, variando de forma sistemática los parámetros definidos, y aplicando un análisis de varianza (ANOVA) sobre los resultados del modelo paramétrico, con el fin de identificar la importancia estadística de cada factor y cuantificar su influencia en la propagación de las grietas.

## **2. Marco teórico**

En este capítulo se muestra el estado del arte y fundamentos teóricos que nos ayudaran al desarrollo del problema planteado para el presente proyecto de grado.

### **2.1. Estado del arte**

En el estado del arte se muestra diferentes investigaciones acerca de los recipientes a presión que nos ayude a entender mejor los conceptos y nos permita analizar mejor los resultados del proyecto de grado.

#### **2.1.2 Antecedentes**

1. Jiménez, C. G. (2025, 25 julio) realizaron la investigación titulada “Aparición de grietas en equipos a presión”. En donde analizan mecanismos de aparición y propagación de grietas donde nos dice que los equipos sujetos a presión se relacionan con fallas frágiles que pueden aparecer o surgir sin deformaciones apreciables. Esto es principalmente riesgoso en recipientes donde la falla puede ser grave. Donde estudios industriales revelan que factores microestructurales como la concentración de elementos hidrogeno e impurezas además de la reducción de ductilidad y defectos superficiales son importantes en el inicio de grietas. En especial en zonas de unión soldadas donde forman puntos críticos durante la fabricación mediante soldadura, se generan gradientes térmicos que provocan tensiones residuales en las zonas fundidas y estas tensiones puede ayudar a la nucleación y crecimiento de las grietas si no son controladas. La simulación mediante elementos finitos modelando las propiedades térmicas y mecánicas dependientes de la temperatura ayudan a estimar de forma más realista la distribución de tensiones en el recipiente. (Jiménez,2025).

2. Camacho Pérez, F. A., & Caballero Pabón, K. A. (2022). Realizaron la investigación titulada “Análisis termoelástico computacional de fallas en juntas soldadas de recipientes a presión que almacenan hidrocarburos en el departamento de Santander bajo la Norma ASME” donde nos

habla acerca de tipos de fallas recurrentes en recipientes a presión, fallas frágiles, fatigas de alto y bajo ciclo corrosión bajo tensión y propagación por defectos de soldadura. La investigación integra un análisis termo-mecánico acoplados, manejando herramientas como ANSYS para la simulación de grietas ayudando a ver la evolución de estas bajo cargas combinadas térmicas y mecánicas, estos modelos ayudan a determinar la velocidad de propagación de grietas y la distribución de los esfuerzos mediante la ley de parís y factor de intensidad  $K_I$ , facilitando reducción de costos, manteniendo niveles adecuados de confiabilidad en la predicción de comportamiento estructural (Camacho Pérez, 2022).

## **2.2. Recipientes a Presión.**

Son recipientes completamente cerrados, diseñados específicamente para almacenar gases o líquidos a presión diferente de la atmosférica, normalmente suele ser mayor la interior de la exterior (Toledano, 2024). Normalmente se someten a una combinación de altas presiones con elevadas temperaturas y en algunas ocasiones con fluidos inflamables. La forma geométrica influye enormemente en la capacidad de soportar esfuerzos, suelen ser esféricos o cilíndricos, con extremos abovedados como se observa en la figura 1 (Chattopadhyay, 2005).

**Figura 1.**

*Recipiente a presión cilíndrico horizontal.*



Nota: Díaz del Castillo, F. (2018). Recipientes a Presión. In Lecturas de Ingeniería (Issue 27). Universidad Nacional Autónoma de Mexico.

EL recipiente cilíndrico sujeto a presión presenta un estado de esfuerzos en cualquier dirección como se muestra en la matriz, expresada en coordenadas cilíndricas  $r, z, \Theta$ :

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{rr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

$\sigma_{rr}$  = Esfuerzo radial

$\sigma_{zz}$  = Esfuerzo Longitudinal

$\sigma_{\theta\theta}$  = Esfuerzo Circunferencia

En la matriz se presentan tres tipos diferentes de esfuerzos: Radial, Longitudinal y circunferencial. Esto permite identificar estos valores como esfuerzos principales, determinados por las ecuaciones (2), (3) y (4) fundamentadas en el trabajo de Lamé (Dowling, 2013; Ward, 1992).

Aunque el recipiente estudiado corresponde a un recipiente de pared delgada, se presentan las ecuaciones generales de Lamé para constituir el caso más general del estado tridimensional de esfuerzos. Estas ecuaciones asumen la presión externa ( $P_e$ ) equivalente a la presión atmosférica.

$$\sigma_{rr} = \frac{PR_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \left( 1 - \frac{R_e^2}{r^2} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{zz} = \frac{PR_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{PR_i^2}{R_e^2 - R_i^2} \left( 1 + \frac{R_e^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

Donde:

$P$  = Presión interna

$R_i$  = Radio interno

$R_e$  = Radio externo

$r$  = Distancia radial donde se miden los esfuerzos

Los recipientes cilíndricos se pueden dividir en dos categorías de pared delgada y de pared gruesa, los recipientes de pared delgada deben cumplir con la siguiente relación  $(r/t) \geq 10$ , donde  $t$  es el espesor de pared y  $r$  es el radio (*JoaquinHoces*, s. f.-b). Muchos países industrializados cuentan con sus normas, para el caso de Colombia nos podemos guiar con código ASME sección VIII, división I, II y III, utilizados en USA, Canadá y otros países latinoamericanos (API, 2006; ASME, 2023).

### ***2.2.1. Generalidades del Código ASME***

El Código ASME (American Society of Mechanical Engineers) constituye el principal estándar internacional de normas y parámetros para el diseño, fabricación, inspección y evaluación de recipientes a presión. Surge como una respuesta general ante la alta incidencia de fallas catastróficas en equipos presurizados, con el objetivo fundamental de garantizar la seguridad del público además de la estandarización de tornillos y tuercas (Balkey,2020).

La sección VIII división I, II, III, empleada en Estado unidos, Canadá, Colombia y otros países latinoamericanos. Asimismo, utilizada en el sector petroquímico la norma API 510 para inspección, reparación y certificación de los recipientes a presión (API,2006; ASME ,2023).

Alcance de la sección VIII división I, está orientada a operar a presiones internas y externas bajas que no sobrepasen los 3000 psi utilizada en diversos campos de la industrial dado que se enfoca en recipientes de pared delgada (Chattopadhyay, 2005).

El código ASME menciona materiales empleados para la fabricación de los recipientes a presión mostrando las propiedades mecánicas y composición química de diferentes aceros, entre los más utilizados esta, SA 515 70, SA 285 C, y SA 516 70 como muestra en la figura 2 (Diaz, 2018).

**Figura 2.**

*Código ASME aceros para recipientes a presión.*

| Especificación           | Descripción y uso final                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ASTM/ASME SA 285 C       | Recipientes estacionarios de resistencia baja e intermedia.                 |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ASTM/ASME SA 455         | Recipientes estacionarios de alta resistencia.                              |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ASTM/ASME SA 516 60 y 70 | Recipientes de media resistencia para servicio de media y baja temperatura. |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| NMX B-475                | Recipientes a presión (esferas).                                            |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| ASTM/ASME SA 612         | Recipientes para camos tanque de Ferrocarril.                               |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| AAR TC-128-B             |                                                                             |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

| Composición química y propiedades mecánicas |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
|---------------------------------------------|----------------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|--------------------|--|
| Especificación                              | Composición química % en peso (máximo) |           |       |       |           |            | Límite elástico min. KSI | Última tensión min. KSI | % de elong. min. en 8" | Rango de dimensión |  |
|                                             | C                                      | Mn        | P     | S     | Si        | Cb         |                          |                         |                        |                    |  |
| ASTM/ASME SA 285 C                          | 0.28                                   | 0.90      | 0.035 | 0.035 | -         | -          | 30                       | 55-75                   | 23                     | 1                  |  |
| ASTM/ASME SA 455                            |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
| Epesor ≤ 0.375"                             | 0.33                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.10      | -          | 38                       | 75-95                   | 15                     | 2                  |  |
| Epesor > 0.375" ≤ 0.580"                    | 0.33                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.10      | -          | 37                       | 73-93                   | 15                     | 2                  |  |
| Epesor > 0.580" ≤ 0.750"                    | 0.33                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.10      | -          | 35                       | 70-90                   | 15                     | 2                  |  |
| ASTM/ASME SA 516 60                         |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
| Epesor ≤ 0.500"                             | 0.21                                   | 0.60-0.90 | 0.035 | 0.035 | 0.15-0.40 | -          | 32                       | 60-80                   | 21                     | 2                  |  |
| Epesor > 0.500" hasta 2"                    | 0.23                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.15-0.40 | -          | 32                       | 60-80                   | 21                     | 2                  |  |
| ASTM/ASME SA 516 70                         |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
| Epesor ≤ 0.500"                             | 0.27                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.15-0.40 | -          | 38                       | 70-90                   | 17                     | 2                  |  |
| Epesor > 0.500" hasta 2"                    | 0.28                                   | 0.85-1.20 | 0.035 | 0.035 | 0.15-0.40 | -          | 38                       | 70-90                   | 17                     | 2                  |  |
| NMX B-475 (1)                               |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
| Epesor > 0.1875" ≤ 1.375"                   | 0.22                                   | 1.0-1.60  | 0.035 | 0.030 | 0.50      | 0.020-0.05 | 55                       | 77-91                   | 17                     | 3                  |  |
| Epesor > 1.375" ≤ 2.0"                      | 0.22                                   | 1.0-1.60  | 0.035 | 0.030 | 0.50      | 0.020-0.05 | 53                       | 73-87                   | 17                     | 3                  |  |
| ASTM/ASME SA 612                            |                                        |           |       |       |           |            |                          |                         |                        |                    |  |
| Epesor ≤ 0.500"                             | 0.25                                   | 1.0-1.50  | 0.035 | 0.025 | 0.15-0.50 | -          | 50                       | 85-105                  | 16                     | 2                  |  |
| Epesor > 0.500" ≤ 1.0"                      | 0.25                                   | 1.0-1.50  | 0.035 | 0.025 | 0.15-0.50 | -          | 50                       | 85-101                  | 16                     | 2                  |  |
| AAR TC-128-B                                | 0.24                                   | 1.0-1.65  | 0.025 | 0.015 | 0.15-0.40 | 0.050      | 50                       | 85-101                  | 16                     | 2                  |  |

(1): Para estos grados de acero por sus requerimientos especiales, siempre se deberá solicitar una factibilidad de producción.

Nota: Díaz del Castillo, F. (2018). Recipientes a Presión. In *Lecturas de Ingeniería* (Issue 27). Universidad Nacional Autónoma de Mexico.

### 2.3. Mecánica de la fractura

Esta es una disciplina de la ingeniería, esta se ocupa del estudio del comportamiento de estructuras defectuosas o grietas, proporcionando un marco para predecir la expansión de la grieta (Anderson, 2017). La presencia de una grieta concentra las tensiones en su entorno creando un campo de esfuerzos en frente de la grieta, donde la propagación de la grieta se muestra por los parámetros de este campo de esfuerzos y no necesariamente por los esfuerzos nominales globales de la estructura (Megyesy, 2001; Jiménez, 2025).

La mecánica de la fractura se divide en dos alternativas para predecir la propagación de la grieta razón de energía de deformación relajada y factores de intensidad de esfuerzo. Griffith fue el primero en establecer que una fractura sucede cuando la energía elástica expulsada o liberada durante la propagación supera la energía necesaria para crear nuevas superficies. En cambio, Irwin plantea la tasa de expulsión o liberación de la energía  $G$  que se establece como la tasa de cambio en energía potencial por área de grieta para un material lineal elástico (Bilbao & Martínez, 2002).

Para una de esfuerzos de tensión aplicado como muestra la figura 3 y una longitud  $2a$  la tasa de liberación de energía es:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (5)$$

Donde:

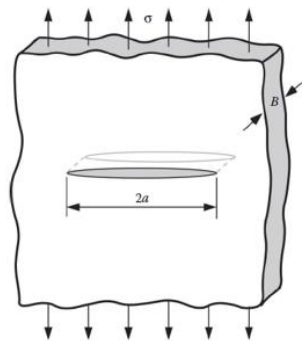
$E$  = Módulo de Young

$\sigma$  = Esfuerzo estipulado

$a$  = Mitad de longitud de grieta

### Figura 3.

*Grieta en placa infinita sujeta a tensión remota.*



*Nota.* Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.).

### 2.3.1. Factor de intensidad de esfuerzos

El factor de intensidad de esfuerzo  $K_I$ , caracteriza completamente una concentración de esfuerzos que se presentan en la punta de la grieta, para distintas configuraciones y cargas geométricas donde la ecuación puede expresarse como:

$$K_I = Y * \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

Donde:

$\sigma$  = esfuerzo nominal aplicado

$a$  = longitud de la grieta

$Y$  = factor geométrico adimensional

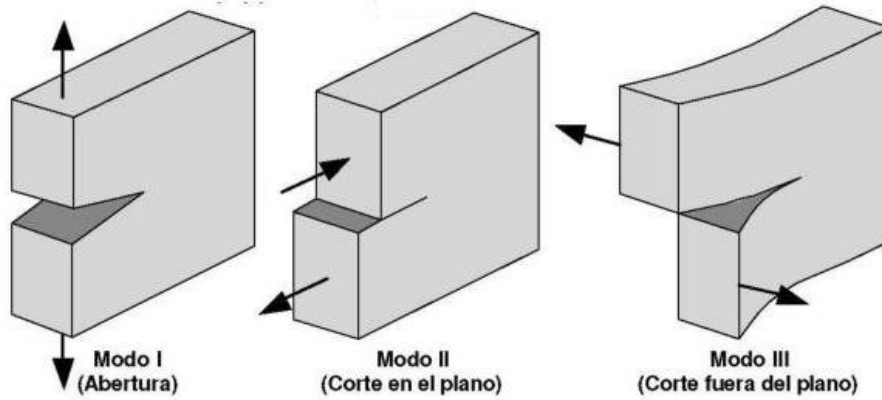
### 2.3.2. Modos de fractura

Existen tres modos de carga independientes que se pueden aplicar a una grieta, mostrados en la figura 4 donde cada uno produce su respectivo factor de intensidad ( $K_I$   $K_{II}$   $K_{III}$ ).

- Modo I Apertura ( $K_I$ ) : La carga actúa perpendicular al plano de la grieta, produciendo su apertura, es el modo más crítico en los recipientes a presión.
- Modo II Deslizamiento ( $K_{II}$ ) : Los esfuerzos actúan en el corte de plano de la grieta, desliza una cara de la grieta sobre la otra
- Modo III Desgarre ( $K_{III}$ ) : Los esfuerzos de corte actúan fuera del plano. (Anderson,2017)

**Figura 4.**

*Modos de carga que se le aplica a una grieta.*



*Nota.* Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed).

### 2.3.3. Tenacidad a la fractura $K_{Ic}$

La fractura sucede cuando el valor utilizado  $K_I$  alcanza el valor crítico frente a la propagación de la grieta en modo I apertura, para el cual ocurre la fractura inestable, nombrada tenacidad a la fractura.

$$K_I = K_{Ic} \quad (7)$$

$K_I$  actúa como la fuerza impulsora de la falla y  $K_{Ic}$  representa la resistencia intrínseca del material a una propagación de la grieta cuando se encuentra bajo condiciones de deformación plana, este parámetro depende de la microestructura, temperatura y condiciones de restricción geométrica. (Anderson, 2017).

### ***2.3.4 Tasa de liberación de energía***

Griffith establece una fractura ocurre cuando la energía elástica escapada durante la propagación de la grieta es suficiente como para exceder la energía necesaria para producir nuevas superficies con fractura. Luego, Irwin definió como la tasa de liberación de energía, define la energía utilizable para obtener una extensión de la grieta. (Anderson, 2017; Bilbao & Martínez, 2002).

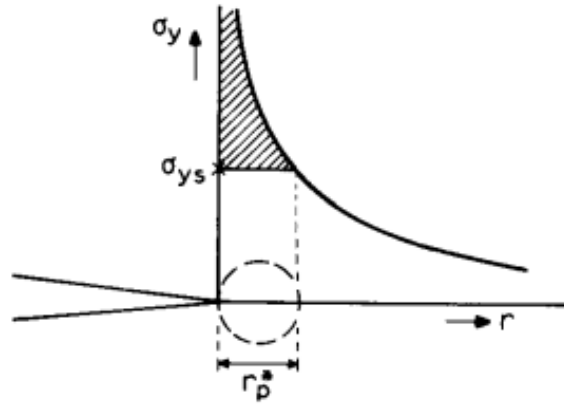
G se define como la tasa de cambio potencial total del sistema con respecto al área de la grieta. Donde para materiales elásticos lineales en un estado de esfuerzo plano se relaciona directamente con  $K_I$  mediante la ecuación:

$$G = \frac{k_I^2}{E} \quad (8)$$

Donde:  $E = \text{Modulo de young del material}$

### ***2.3.5 Plasticidad en el frente de la grieta***

La Mecánica de la Fractura Elástico-Lineal (MFEL) pronostica tensiones infinitas en la punta de la grieta, constituyendo una irregularidad matemática conocida como singularidad. No obstante, este comportamiento teórico no es físicamente realista en materiales dúctiles. En la práctica, cuando el nivel de esfuerzos locales supera el límite de fluencia del material, este se deforma plásticamente en el frente de la grieta; esto crea una zona plástica que redistribuye las tensiones y evita que alcancen valores infinitos como se observa en la figura 5 (Bilbao & González, 2002).

**Figura 5.***Estimación zona plástica*

*Nota. Bilbao, J. L. A., & González, J. (2002). Mecánica de fractura.*

### 2.3.6 Corrección de Irwin

Para cuantificar el tamaño en la zona plástica Irwin propuso la estimación para condiciones de esfuerzo plano donde estableció que la formación de esta zona de plasticidad produce que la grieta actúe como si fuera físicamente más larga que su tamaño original, a partir de una distribución elástica de tensiones, Irwin estimó el radio de la zona plástica como la distancia desde la punta de la grieta donde la tensión elástica iguala al límite elástico del material como se muestra a continuación (Bilbao & González, 2002).

$$r_p \geq \frac{1}{2\pi} \left( \frac{k_I}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

$\sigma_y$  = Límite elástico lineal

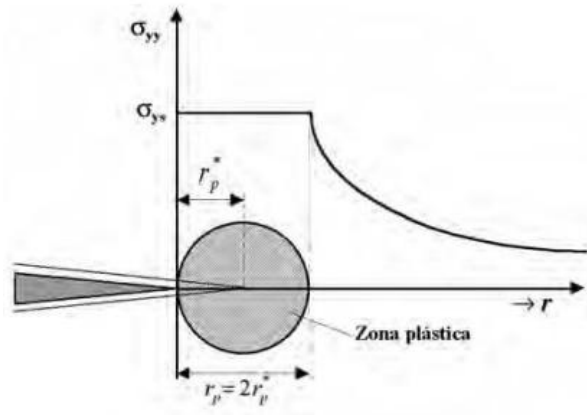
$r_p$  = Radio de la zona plástica

$K_I$  = Factor de intensidad de esfuerzos

En la figura 6 se observa que el valor del radio es la corrección de la zona plástica establecida por Irwin tomando una aproximación donde esta zona plástica tiene una geometría circular en donde las dimensiones efectivas de la grieta se extienden hasta la mitad de la zona plástica.

**Figura 6.**

*Corrección de Irwin en zona plástica*



*Nota. Bilbao, J. L. A., & González, J. (2002). Mecánica de fractura.*

### 2.3.7 Límites de aplicabilidad del LEFM

El factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  es válido cuando cumple la condición de fluencia a pequeña escala donde la zona plástica es confinada en una región muy pequeña en comparación con el tamaño de la grieta y las dimensiones del componente, para garantizar un estado de deformación plana y la validez del factor de intensidad de esfuerzos se evalúa mediante el criterio de validez (Bilbao & González, 2002).

$$B \approx (W - a) < 1 \left( \frac{k_1}{\sigma_y} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

$B = \text{Espesor del modelo}$

### 2.3.8. Mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP)

Cuando la zona plástica desarrollada en la punta de la grieta es apreciable, la Mecánica de Fractura Lineal Elástica (MFLE) pierde rigurosidad, ya que el comportamiento del material no puede describirse únicamente mediante el factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  en este caso resulta mejor emplear la Mecánica de Fractura Elastoplástica (MFEP) donde esta admite deformaciones grandes antes de la fractura, dentro de la cual la Integral J propuesta por Rice constituye los parámetros más utilizados matemáticamente (Bilbao & González, 2002).

$$J = \int_T \left( w \, dy - T \frac{\partial u_i}{\partial x} ds \right) \quad (11)$$

Donde:

$\partial_{u_i}$  = Desplazamiento

$T$  = Vector de tracciones

$w$  = Densidad de energía de deformación

La integral es un parámetro energético que representa la tasa de liberación de energía no lineal y es independiente de la trayectoria de integración alrededor de la punta de la grieta, donde se relaciona con el factor K mediante la siguiente ecuación.

$$J = G = \frac{K_I^2}{E'} \quad (10)$$

Donde:

$E = E'$  para esfuerzo plano

El uso de la Integral J es fundamental en los análisis de Aptitud para el Servicio (Fitness-For-Service) bajo la norma API 579-1/ASME la integral J ayuda a caracterizar condiciones en el

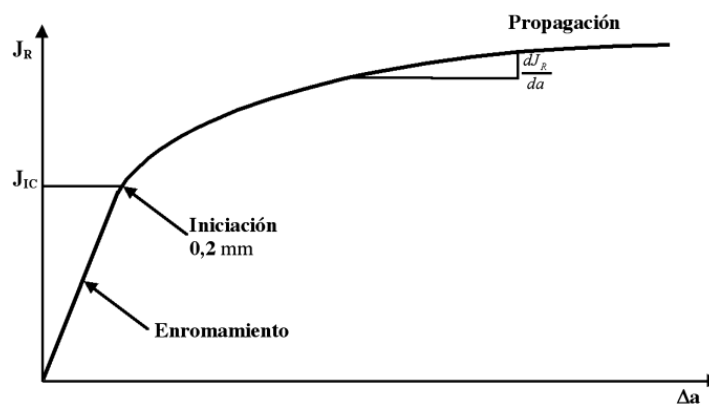
frente de grieta para un material elástico no lineal, para componentes donde el crecimiento de grieta es inminente (Bilbao & González, 2002).

### 2.3.9. Curva de resistencia $R$ - $J$ en fractura elastoplástica.

Algunos materiales dúctiles no fallan exclusivamente con un valor determinado de  $J$ , debido a que desarrollan una curva de propagación estable de la grieta, incrementando el tamaño de la grieta a medida que crece el valor de  $J$ . Para un material específico esta curva nos ayuda a verificar como resiste el material. En la figura 7 podemos observar el comportamiento que normalmente tiene esta curva para materiales dúctil, en las que se observan las diferentes etapas: Enrolamiento en el frente de la grieta, tiene un comportamiento lineal con un supuesto crecimiento de grieta haciendo que la punta se redondee aumentando su radio; En la segunda parte a medida que aumenta  $J$ , se inicia una etapa de propagación donde la grieta crece de forma estable.

**Figura 7.**

*Curva  $J$ - $R$  de un material dúctil.*



*Nota.* Anderson, T. L. (2017). Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.).

CRC Press.

Para hallar los valores de  $C_1$  y  $C_2$  se utilizaron las siguientes ecuaciones, las cuales emergen del estudio del comportamiento que se forma en la fractura dúctil del acero SA-516-Gr70 (Coêlho et al., 2023).

$$\delta = C_{1\delta}(\Delta A)^{C_2} \quad (11)$$

Donde:

$\delta =$  Desplazamiento de apertura (transversal)

$C_{1\delta} =$  Coeficiente de escala o amplitud

$\Delta A =$  Desplazamiento de apertura (longitudinal)

$C_2 =$  Factor de curvatura

$$\delta = \frac{J}{mX} \quad (12)$$

$m =$  Parametro adimensional

$X =$  Promedio del limite elastico

$$X = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{us}}{2} \quad (13)$$

$\sigma_{ys} =$  Limite elastico

$\sigma_{us} =$  Tension ultima

$$m = A_0 + A_1\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right) + A_2\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right)^2 + A_3\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right)^3 \quad (14)$$

$A_0 A_1 A_2 A_3 =$  Coeficientes constantes del material

## 2.4. Relación entre LEFM y EPFM

En el presente estudio se utilizó inicialmente MFLE para el análisis de  $K_I$ . Sin embargo, al identificar que a partir de  $P = 6.5$  MPa la condición de SSY dejaba de cumplirse, se optó por EPFM mediante el cálculo de la integral  $J$  para caracterizar el comportamiento de la grieta en régimen elastoplástico donde la relación de los dos métodos se observa en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Relación LEFM y EPFM.*

| Aspecto                   | LEFM                       | EPFM                               |
|---------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Parametro principal       | $K_I$                      | $J$                                |
| Tipo de material          | Fragil com poca ductilidad | Ductil Zona plastica significativa |
| Relacion entre parametros | $G=K_I^2/E'$               | $J=K_I^2/E'$                       |
| Aplicación en recipientes | Presiones bajas moderadas  | Presiones altas plasticidad        |

## 2.5. Formación y propagación de las grietas en recipientes a presión

Las grietas en los recipientes a presión pueden originarse por diversas causas durante su fabricación instalación u operación cuando son sometidos a variaciones térmicas y mecánicas, reduciendo severamente la estructura y causar fallos a tensiones nominales menores que la fluencia del material, donde la grieta se forma en defectos inherentes en la estructura, se dispersa bajo carga hasta un tamaño crítico y se propaga a través del material (Robert,1966; Anderson,2017).

### 2.5.1. Grietas de fabricación

- Grietas de soldadura: Son los puntos de mayor vulnerabilidad Aparecen durante el enfriamiento de uniones soldadas debido a tensiones residuales, o ciclos térmicos extremos, hidrógeno atrapado o inclusiones de escoria. Pueden ser longitudinales, transversales (ASME, 2023).

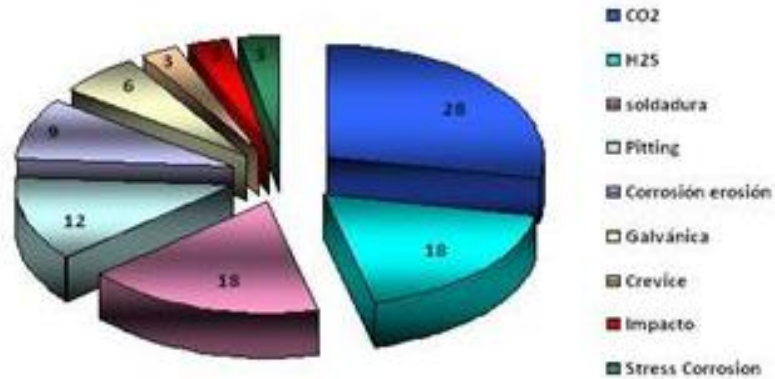
- Defectos de laminación: producidos durante el proceso de elaboración de las placas, como inclusiones no metálicas o segregaciones.
- Grietas de tratamiento térmico: causadas por enfriamientos bruscos o gradientes térmicos excesivos durante templados o revenidos.

#### ***2.5.2. Grietas en Servicio:***

- Grietas por fatiga: originadas por ciclos de presión interna y temperatura durante la operación lo que genera un crecimiento constante de la fisura hasta alcanzar un tamaño crítico. (AROTEC, 2023).
- Grietas por fragilización: Causadas por exposición prolongada a hidrógeno o temperaturas que afectan la cohesión interna de la microestructura del material.
- Grietas por fluencia: ocurren de forma repentina bajo condiciones de sobrecarga cuando operan a altas temperaturas durante largos periodos (Jiménez, 2025).
- Grietas por corrosión bajo tensión: Aparecen en entornos con presencia de agentes agresivos, por la acción combinada de un medio corrosivo específico y esfuerzos de tracción sostenidos como se ve en la figura 8 (Reilly, 2025).

**Figura 8.**

*Tipos de corrosión en la industria petrolera.*



*Nota.* Pérez, E. V. (2016, 6 diciembre). Metodología de análisis de fallas en recipientes a presión y tuberías

### 2.5.3. Clasificación geométrica de las grietas

- Grietas superficiales: Se producen en la superficie externa o interna del material y se propagan hacia el interior del espesor, no atraviesan completamente el recipiente. Son las más comunes en recipientes a presión. Tienen una profundidad finita.

$$a < t \quad (15)$$

donde:

$a$  = Profundidad de grieta

$t$  = Espesor del recipiente

- Grietas pasantes: Atraviesan completamente el espesor de pared, conectando la superficie interna con la externa, generando mayor intensidad de esfuerzos representando el estado más crítico previo a la falla. (Anderson, 2017)

$$a = t \quad (16)$$

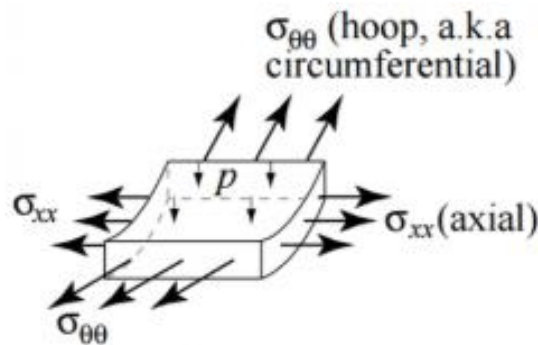
#### 2.5.4. Zonas Críticas de Aparición de Grietas

La zona de concentración de esfuerzos como se observa en la figura 9 es donde con mayor frecuencia se inician y propagan las grietas estas son (API,2006; Jiménez, 2025):

- Boquillas y conexiones: Las aberturas para boquillas, drenajes y otros accesorios generan concentraciones de esfuerzos significativas. Donde las grietas suelen iniciarse en los bordes de los refuerzos o en las soldaduras de unión.
- Cambios de geometría: En las uniones entre el casco cilíndrico y los cabezales. Estas zonas presentan discontinuidades geométricas que aumentan los esfuerzos locales.
- Soportes y anclajes: Las zonas de apoyo del recipiente concentran esfuerzos por peso propio o cargas de viento.

**Figura 9.**

*Esfuerzos un recipiente a presión cilíndrico.*



*Nota.* Arvengtraining. (2015). *Esfuerzos en Recipientes a Presión de pared delgada.* Arveng Training.

La presión interna en el recipiente es soportada mayormente por la tensión circunferencial, mientras que la tensión axial se presenta en menor medida.

Según su orientación respecto a los esfuerzos principales en un recipiente de pared delgada existen dos tipos:

- Longitudinales: Situadas paralelamente al eje del recipiente, particularmente críticas en los recipientes a presión ya que son perpendiculares al esfuerzo circunferencial que es el de mayor magnitud (Chattopadhyay, 2005).

$$\alpha_{\theta} = \frac{Pr}{t} \quad (17)$$

- Circunferenciales: Están en la zona perpendicular al eje longitudinal comúnmente la intensidad de esfuerzos es menor.

$$\alpha_L = \frac{Pr}{2t} \quad (18)$$

Donde:

$P = \text{Presion interna}$

$r = \text{Radio interno}$

$t = \text{Espesor}$

## 2.6. Esfuerzo térmico

La valoración de la integridad estructural de los recipientes a presión requiere considerar no solo las cargas mecánicas puras sino además la interacción de estas con los efectos térmicos derivados de la operación industrial, cuando un recipiente opera con un gradiente de temperatura a través de su espesor se generan esfuerzos térmicos debido a la restricción de la expansión térmica diferencial donde la diferencia de temperatura a través del espesor genera esfuerzos de flexión que superponen a los esfuerzos de membrana, para un recipiente de pared delgada con un gradiente térmico lineal el esfuerzo térmico en la superficie esta dado por la siguiente ecuación (Boley & Weiner (1997)).

$$\sigma_{termico} = \frac{E * \sigma * \Delta T}{2(1 - \nu)} \quad (19)$$

Donde:

$E = \text{Modulo de young}$

$\sigma = \text{Coeficiente de espacion termica lineal}$

$\Delta T = \text{Gradiente termico}$

$\nu = \text{Coeficiente de poisson}$

### 2.6.1. Principio de superposición en mecánica de la fractura

El campo de tensiones total en la punta de una grieta es la suma algebraica de las contribuciones de cada sistema de carga independiente este principio de superposición permite determinar el factor de intensidad de esfuerzos total (Anderson, 2017).

$$K_{total} = K_p + K_T \quad (20)$$

## 2.7. Mecánica computacional y método numérico

La mecánica computacional se ocupa de emplear técnicas numéricas y modelos matemáticos para prever el comportamiento, empleando el método de elementos finitos. Donde el método establece cómo actúa cualquier estructura al reemplazar la solución continua, que en muchos casos no es posible resolver, a través de una discontinua o discreta y, por ende, cercano. Con este fin, se distribuye la estructura en elementos finitos que están interconectados por un número determinado de puntos nombrados nodos (Flor, 2019).

El método de elementos finitos consiste en las siguientes etapas:

1. División elementos finitos: Se distribuye una estructura continua de elementos finitos, los cuales están interconectados por nodos que suelen estar ubicados en los bordes de cada elemento.

Al hacerlo, se transforma en un número finito con grados de libertad, que corresponde a la cantidad total de parámetros nodales.

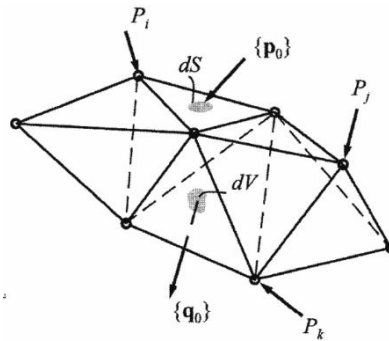
2. Vector desplazamientos del elemento: Esta etapa permite que se puedan identificar los desplazamientos que ocurren en cualquier parte del elemento de manera aproximada, que relacionan los desplazamientos en cualquier punto del elemento con los desplazamientos en los nodos.

3. Matriz de rigidez del elemento: Establece una matriz que posibilita el cálculo de los parámetros nodales de un elemento, según las fuerzas nodales que actúan. El teorema de los trabajos virtuales es formulado primero después se establece el principio de la energía potencial total.

4. Matriz completa de rigidez de la estructura: Para esta fase se tiene en cuenta una estructura que presenta ciertos grados de libertad y está equilibrada bajo un sistema de fuerzas observado en la figura 10.

**Figura 10.**

*Sistema de fuerzas incluyendo cargas y reacciones de enlaces externos.*



*Nota.* Flor, T. (2019). El método de Elementos Finitos, aplicado análisis estructural - Manuel

Vázquez, Eloísa López. *Academia*.

Estas fuerzas abarcan las reacciones y cargas de vínculos externos; las fuerzas ( $P_0$ ) establecidas en nodos, las fuerzas ( $q_0$ ) que se distribuyen por el volumen de la estructura y las fuerzas que se reparten por su superficie.

5. Respuesta de la estructura: En la última etapa del MEF se decide por el comportamiento de la estructura tomando en cuenta las condiciones de carga y contorno. Resolver el sistema posibilita encontrar los parámetros nodales desconocidos de los enlaces externos y a partir de estos se hallan los esfuerzos y deformaciones en cualquier punto.

La malla en elementos finitos se refina interactivamente, comenzando desde una malla aproximada, con la finalidad de garantizar una independencia de malla, demostrando que los  $K$  no varían significativamente al cambiar el tamaño del elemento (Flor,2019).

## 2.8. Diseño de experimentos y análisis de inferencia estadística

El diseño estadístico es el modo más efectivo para realizar pruebas donde consiste en determinar cuáles son las pruebas más apropiadas para realizar y de qué manera, con el objeto de obtener datos que me demuestren evidencias objetivas (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008). Se puede identificar un parámetro que influya mayormente en la tasa de propagación de la grieta bajo cargas térmicas y mecánicas. La hipótesis fundamental al comparar  $K$  niveles de un parámetro es:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_k = \mu \quad (21)$$

$$H_A: \mu_i \neq \mu_j \rightarrow i \neq j \quad (22)$$

Donde ( $H_0$ ) me indica una hipótesis nula y todos los parámetros que evalúan son iguales, Mientras que ( $H_A$ ) me indica una hipótesis alternativa, que me indica que al menos un parámetro de los evaluados es diferente.

Según expresa Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar ( 2008).existen cinco aspectos que son los más destacados a la hora de seleccionar el tipo de diseño de experimentos los cuales son: la finalidad del experimento, número total de factores que se va a analizar, número de niveles probados en cada factor, los efectos de interés a investigar, y por último el valor del experimento, precisión y tiempo deseado permitiendo.

- Identificar factores críticos que afectan el desempeño o la viabilidad del sistema.
- Optimizar procesos y diseños.
- Reducir la variabilidad.
- Minimizar el número de experimentos necesarios para obtener la información más significativa.

### ***2.8.1. Análisis de varianza ANOVA***

Es la técnica central para analizar los datos experimentales, su propósito es separar la variación total observada en el experimento en partes aplicables a cada fuente de variación específica

El diseño unifactorial estudia el efecto de un solo factor sobre una variable de respuesta, variando esta variable en diferentes niveles mientras se mantiene constante las demás donde el diseño se descompone en las siguientes partes: (Montgomery, 2013).

- Variabilidad debida al factor. Representa las diferencias entre los niveles de los parámetros estudiados.

- Variabilidad debida al error: Refleja la variación que no puede ser explicada por el factor estudiado.

**2.8.1.1. Criterio del valor P nivel de significancia.** Es la probabilidad de que el comportamiento observado se deba únicamente al azar si el valor  $p < 0.05$  se rechaza la hipótesis nula ( $H_0$ ) concluyendo que el factor influye significativamente en el crecimiento de la grieta (Montgomery, 2013).

**2.8.1.2. Verificación de los supuestos del modelo.** Para la validez de los resultados obtenidos se debe verificar los supuestos del modelo los cuales son:

Normalidad: Los residuos deben seguir una distribución con normalidad.

Varianza constante: Los residuos de cada factor deben tener una dispersión similar.

Independencia: Las mediciones deben ser independientes entre sí.

### **3. Marco metodológico**

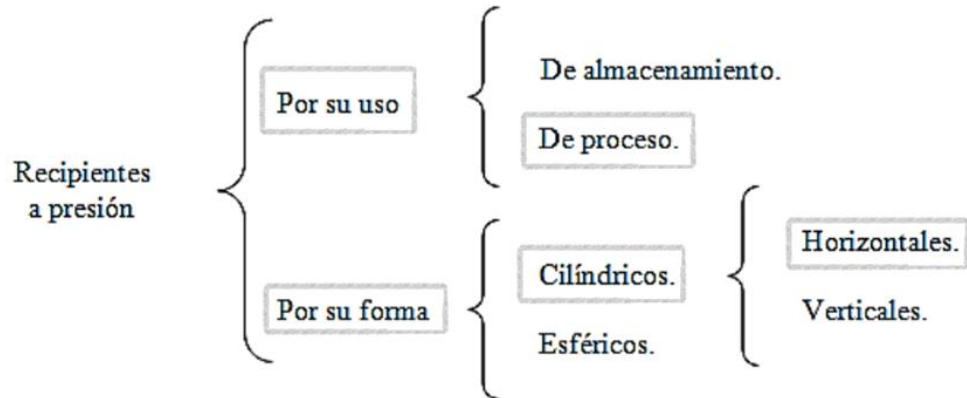
En esta investigación se desarrolló un análisis de parámetros, que afectan en el crecimiento de grieta en recipientes a presión de pared delgada, considerando el factor de intensidad de esfuerzos (KI) y la integral J. Con el fin de evidenciar cual parámetro es el que influye mayormente en el crecimiento de la grieta.

#### **3.1. Descripción del sistema estudiado**

Los recipientes a presión se pueden utilizar en varios procesos de la industria, para identificar nuestro caso de estudio se utilizó la figura 11 donde se muestran las clasificaciones de los recipientes a presión.

**Figura 11.**

*Clasificación de los recipientes a presión.*



El recipiente seleccionado corresponde a un recipiente a presión de pared delgada en el cual vamos a fijar nuestro análisis por su uso va a hacer de proceso ya que es un tratador de nafta donde va a ir circulado y además van a entrar otros componentes como la soda cáustica para su tratamiento de los más utilizados en la industria petroquímica donde sus dimensiones y condiciones de operación observados en la tabla 2 fueron tomadas de un recipiente real de la empresa colombiana de petróleos.

**Tabla 2.**

*Condiciones de trabajo del recipiente.*

| Parametro                            | Valor        |
|--------------------------------------|--------------|
| Presión interna [Psi]                | 100          |
| Temperatura [°F]                     | 150          |
| Tolerancia por corrosión [In]        | 0.125        |
| Diametro interno [In]                | 144          |
| Longitud [In]                        | 240          |
| Presión de prueba hidrostática [Psi] | 150          |
| GEOMETRIA                            |              |
| Espesor de la cáscara [In]           | 0.65         |
| Espesor de la cabeza [In]            | 0.93         |
| MATERIALES                           |              |
| Cáscara                              | SA-516 Gr.70 |
| Cabeza                               | SA-516 Gr.70 |

Teniendo las Condiciones de operación, los espesores y los materiales del recipiente a presión según la norma ASME sección VIII (API,2006; ASME ,2023). Podemos iniciar con la búsqueda de parámetros que se relacionen con el crecimiento de la longitud de grieta, con el fin de evaluar cada uno y así poder determinar cual afecta la grieta en una mayor medida.

### **3.2. Identificación de parámetros**

Se adopto un enfoque sistemático de parametrización con referencia en la metodología parsec donde fue propuesta por Sobieczky (1998) y seguidamente aplicada por Della Vecchia et al (2014) para la optimización de perfiles aerodinámicos. Donde este enfoque establece que cada parámetro contiene un significado directo, físico y un efecto importante en la variable de respuesta es este caso como lo es el factor de intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta.

En el contexto del presente estudio, la adopción de esta metodología se justifica por la interpretabilidad física, aislamiento de efectos, compatibilidad con DOE y eficiencia computacional donde el enfoque sistemático implicó las siguientes etapas:

Revisión bibliográfica se consultaron las referencias fundamentales en mecánica de fractura (Newman & Raju, 1981; Erdogan & Sih, 1963) y normas de evaluación de integridad estructural (API 579/ASME FFS-1, BS 7910) para identificar los parámetros que influyen en el factor  $k$

Selección de parámetros con significado físico donde se eligió un conjunto reducido de variables que describen la geometría de la grieta profundidad  $a$ , relación de aspecto  $a/c$ , orientación  $\theta$  el entorno de cargas presión  $p$ , temperatura  $\Delta T$ .

Definición de rangos de variación realistas para cada parámetro, se establecieron niveles de variación basados en condiciones operativas típicas reportadas en estudios previos.

### 3.2.1. *Parámetros geométricos de la grieta*

- Profundidad de grieta ( $a$ )

La profundidad de la grieta ( $a$ ) normalizada por el espesor de la pared ( $t$ ) constituye el descriptor geométrico más influyente en el valor del factor de intensidad de tensiones, dado que pequeños incrementos en profundidad de la grieta generen aumentos significativos en el campo de tensiones en la punta de la grieta (Anderson, 2017).

Estudios experimentales y numéricos sobre recipientes a presión definieron una grieta inicial de 2 mm de profundidad en un recipiente de espesor de 1.5 mm lo que equivale a una grieta avanzada próxima a atravesar la pared (Balac et al 2018), por otro lado según Saad y Bouabdellah (2023), llevaron a cabo un modelo numérico tridimensional en ANSYS para el calcula del factor de intensidad de tensiones a lo largo de la punta de una grieta semielíptica demostrando así la aplicabilidad del software para este tipo de análisis.

En este estudio se adoptó un rango de variación para la profundidad de la grieta relativa que abarca desde grietas iniciales desde 0,1 hasta grietas avanzadas con 0,7 por encima de este valor la grieta se aproxima a una grieta pasante por lo que el análisis cambia cualitativamente (Anderson, 2017).

- Relación de aspecto ( $a/c$ )

Define la forma de la grieta si es semicircular o alargada Según Newman y Raju (1984), demostraron que este término controla la distribución del factor  $K$  a lo largo del frente de la grieta, las grietas semicirculares con la relación de aspecto igual a 1,0 el factor  $k$  es prácticamente uniforme en grietas alargadas con la relación cercana a 0,2 la variación entre el punto más profundo y los extremos superficiales pueden alcanzar un orden de magnitud.

- Orientación longitudinal/circunferencial

Es el parámetro geométrico de mayor influencia sobre la distribución modal del factor de intensidad de tensiones donde una grieta puramente longitudinal responde predominantemente al esfuerzo circunferencial, que en un recipiente cilíndrico es el doble del esfuerzo longitudinal, por lo que constituye la orientación más conservadora desde la óptica de la integridad estructural donde por el contrario una grieta puramente circunferencial responde únicamente al esfuerzo longitudinal resultando menos crítica (Erdogan & Sih, 1963).

- Posición de la grieta

La ubicación de la grieta sobre la pared del cilindro determina el campo de tensiones de fondo al que está sometida donde Espinoza (2019) en su análisis de elementos finitos de un recipiente horizontal a presión, identificaron que las zonas críticas de concentración de esfuerzos se localizan en las aberturas centrales del recipiente donde en este estudio se fijó la posición de la grieta en el centro del cuerpo del cilindro.

### ***3.2.2. Parámetros de carga***

Representan las cargas operativas que actúan sobre el recipiente.

- Presión interna (P)

Es la carga primaria que genera el esfuerzo de circunferencia donde Espinoza (2019) utilizó una presión de diseño de 1.03 MPa y una presión de operación de 0.93 MPa en su análisis de un recipiente horizontal a presión fabricado en acero SA-516 Gr. 70, mismo material utilizado en el presente estudio, en el estudio de Balac (2018) ensayaron presiones de hasta 1.5 MPa en su investigación experimental y numérica. Sin embargo, el código ASME Sección VIII permite presiones de diseño de hasta 20 MPa para recipientes de pared delgada.

El rango de variación de la presión interna se definió desde 1 Mpa hasta 10 Mpa abarcando desde condiciones típicas de operación hasta un rango no superior a 20 Mpa límite superior normativo.

- Gradiente de Temperatura ( $\Delta T$ )

Carga que genera esfuerzos secundarios por expansión restringida este gradiente induce un perfil de temperatura no uniforme a través del espesor de la pared, generando tensiones auto equilibradas que se superponen al campo membranar y modifican el valor de  $K_I$  en el frente de grieta (Meshii & Watanabe, 2001). Donde para el estudio presente se adoptaron los siguientes gradientes térmicos 5°C, 25°C, 50°C y 100°C.

### 3.2.3. *Parámetros del material*

En un diseño de experimentos unifactorial, estos parámetros se mantienen constantes para aislar el efecto de los factores geométricos y de carga, valores observados en la tabla 3 donde estos están establecidos en ASME sección II y VIII División 1 (ASME, 2023).

**Tabla 3.**

*Propiedades del material.*

| Propiedad               | Símbolo | Valor | Unidad |
|-------------------------|---------|-------|--------|
| Módulo de elasticidad   | E       | 200   | Gpa    |
| Límite de fluencia      | Sy      | 262   | Mpa    |
| Coefficiente de Poisson | v       | 0.3   |        |
| Esfuerzo ultimo         | St      | 620   | Mpa    |

### 3.2.4. *Supuestos del modelo*

En el recipiente analizado se establecieron los siguientes supuestos para la modelación.

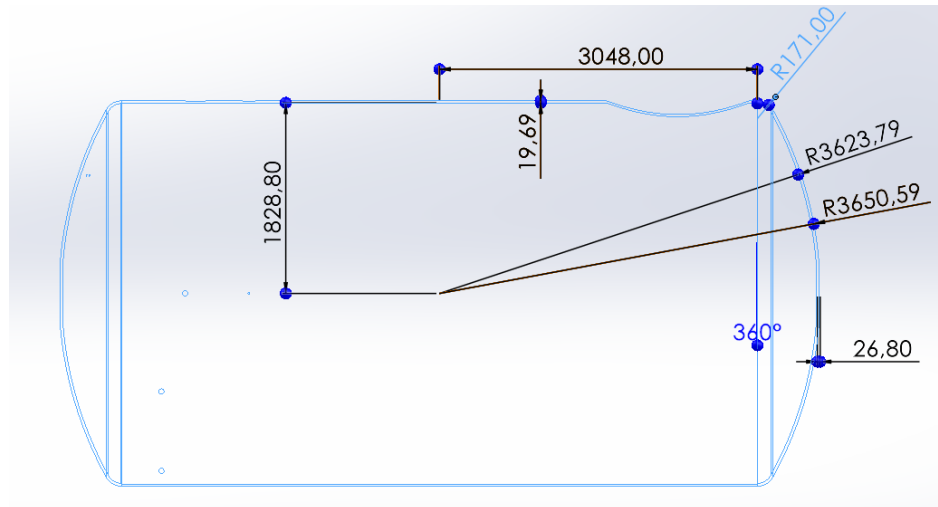
- Comportamiento del material, Para presiones bajas/moderadas, se aplica LEFM Mecánica de Fractura Lineal Elástica utilizando el Factor de Intensidad de Esfuerzos ( $K_I$ ) como variable respuesta, si la zona plástica deja de ser pequeña según la corrección de Irwin, se debe pasar a EPFM Mecánica de Fractura Elasto-Plástica utilizando la Integral J como variable de respuesta.
- Grieta semielíptica ubicada en la zona de mayor tensión.
- Material homogéneo e isotrópico
- Grieta inicialmente existente
- Sin corrosión
- Sin tensiones residuales

### 3.3. Modelado numérico

Teniendo en cuenta los parámetros seleccionados y definidos esta fase se enfocó en la modelación y simulación del recipiente donde mediante el software SolidWorks para la reconstrucción del recipiente como se ve en la figura 12 mediante los planos suministrados, luego el modelo se importó a ANSYS en formato. step, donde se realizó el análisis por elementos finitos para poder evaluar cómo actúa la grieta bajo las condiciones termo mecánicas establecidas.

**Figura 12.**

*Esquema del recipiente a presión.*



*Nota.* Dimensiones del recipiente

### 3.3.1. Obtención geometría

Se inicio con la modelación del recipiente mediante la obtención de un plano real de un recipiente a presión proporcionado por una empresa del sector donde contiene la especificación y dimensiones generales del recipiente como lo es el diámetro, longitud, espesor de igual manera la forma de los cabezales, la ubicación, dimensión de las boquillas, conexiones y las especificaciones del material donde se construyendo el recipiente en SolidWorks siguiendo fielmente las cotas de los planos dejándolo listo para ser importado a ANSYS como se puede observar en la figura 13.

**Figura 13.**

*Diseño del recipiente a presión.*



*Nota.* Recipiente a presión en SolidWorks

### **3.3.2. Análisis por elementos finitos**

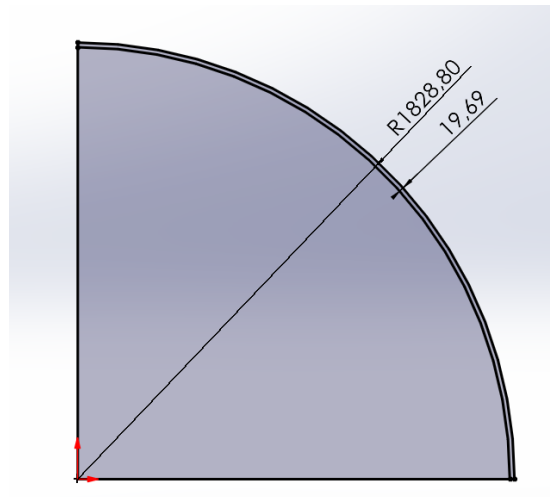
La precisión de una simulación numérica en ese caso de elementos finitos depende tanto de la calidad del modelo geométrico como de la correcta aplicación de las condiciones de frontera y las propiedades constitutivas del material (Zienkiewicz, Taylor & Zhu, 2013).

Donde se importó el modelo realizado en SolidWorks a ANSYS y se hicieron las siguientes configuraciones iniciales para iniciar la simulación.

Se establece la geometría: Se comprueba que la geometría se incorpore a ANSYS correctamente, donde se incorporó una sección de la carcasa del recipiente a presión horizontal de pared delgada con un radio interior de 1828,8 mm y espesor de 19,69 mm donde ya está incluida la tolerancia por corrosión y una longitud de 2400 mm como se observa en la figura 14 y 15.

**Figura 14.**

*Lamina analizada en ANSYS.*



*Nota.* Dimensiones de la placa que se va a analizar en ANSYS.

**Figura 15.**

*Lamina analizada en ANSYS con su longitud*



*Nota.* Dimensiones de la placa que se va a analizar en ANSYS.

Aplicación del material al modelo: Se aplico el material al recipiente en este caso acero al carbono tipo SA-516 Gr.70 ingresando sus propiedades mecánicas y térmicas guiadas de la norma ASME observadas en la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Especificaciones del material según ASME*

| <b>Especificación</b>            | <b>Acero SA-516-70</b>        |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Densidad                         | 7850[Kg/m <sup>3</sup> ]      |
| Modulo Elástico                  | 210 [Gpa]                     |
| Coeficiente de Poisson           | 0,3                           |
| Limite elástico                  | 262 [Mpa]                     |
| Esfuerzo Último                  | 620 [Mpa]                     |
| KIC (Kcrítico)                   | 4143 [Mpa*mm <sup>0.5</sup> ] |
| JIC(Jcrítico)                    | 81,73[mJ/mm <sup>2</sup> ]    |
| Modulo Tangente                  | 1,7 [Mpa]                     |
| Coeficiente de expansión térmica | 1,206E-5[C <sup>-1</sup> ]    |
| Conductividad Termica            | 52 [W/m*C]                    |

*Nota.* Adaptado de *ASME BPVC.II. A-2019 Section II Materials. ASME.*

### **3.3.3. Aplicación de cargas y condiciones de frontera**

La exactitud en las condiciones de cargas es especialmente critica en grietas donde pequeñas variaciones en el campo de tensiones tienen un valor significativo en el factor de intensidad que se calcule, donde las condiciones y cargas deben reflejar las solicitudes operativas normales y las condiciones reales del equipo (Anderson,2017).

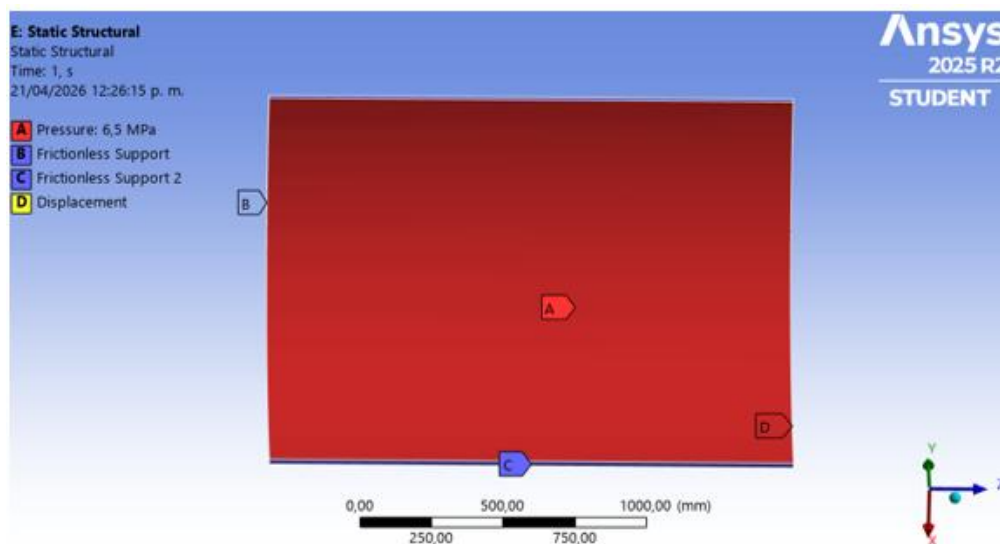
Se agregan condiciones de contorno como se ve en la figura 16 donde se implementó un modelo de simetría utilizando soportes sin fricción (Frictionless Support) en las secciones de corte longitudinal y transversal. Esta configuración permite la expansión radial y longitudinal del recipiente bajo condiciones de presión y temperatura, garantizando que el Factor de Intensidad de

Esfuerzos ( $K_I$ ) sea producto de la respuesta estructural auténtica del componente y no de restricciones mecánicas externas.

Condiciones de frontera: Se aplicaron restricciones de desplazamiento en el modelo evitando movimientos de cuerpo rígido donde se anexo la opción de Displacement en una cara lateral como se observa en la figura 17 donde se le restringe el movimiento en el eje Z ( $Z=0$ ) actuando como un anclaje puntual.

**Figura 16.**

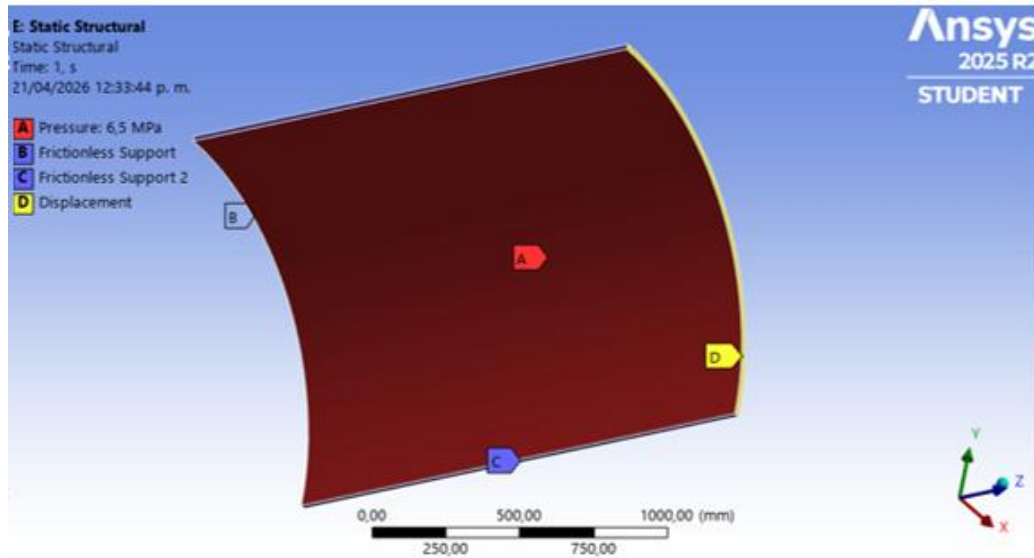
*Lamina con vista frontal en ANSYS*



*Nota.* Condiciones de frontera de la lámina analizada en ANSYS

**Figura 17.**

*Lamina con vista isométrica en ANSYS*



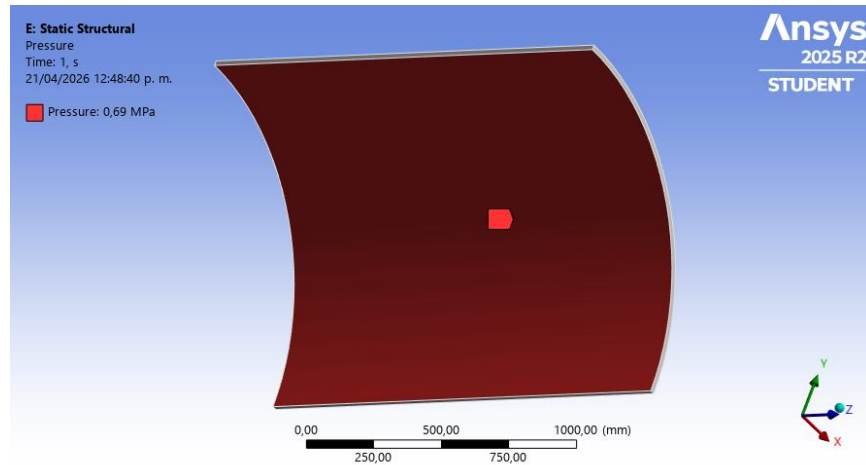
*Nota.* Condiciones de frontera de la lámina analizada en ANSYS vista isométrico

- Carga mecánica:

Se aplico una presión uniforme en toda la superficie interna del modelo en este caso en la pared interna del casco del cilindro, donde se observa en la figura 18 que se evalúa a la presión de operación del recipiente 0,69 Mpa, realizando exactamente lo mismo para las diferentes presiones que se evalúan para evidenciar los resultados del KI.

**Figura 18.**

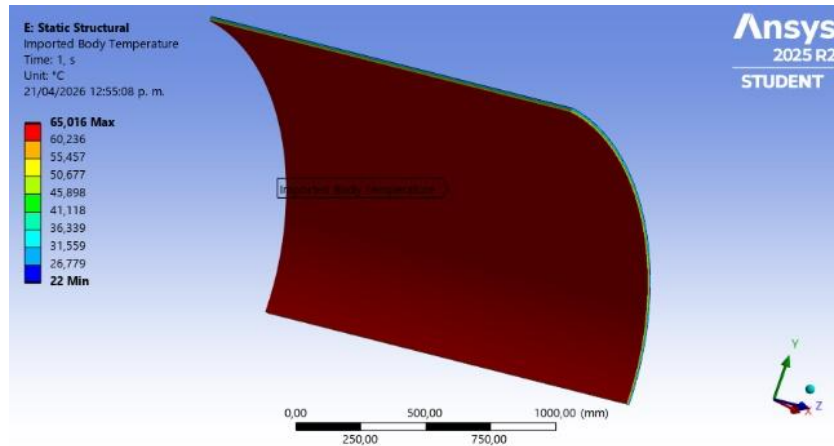
*Carga mecánica en ANSYS*



*Nota.* Condiciones de la carga de presión analizada en ANSYS.

- Carga térmica:

Se aplico un gradiente térmico a través del espesor de la pared la temperatura es la de operación en la superficie interna, normalmente está a 65°C. De igual manera se estableció una temperatura en superficie externa donde se consideró una temperatura ambiente de 22°C esta configuración genera un gradiente térmico que corresponde aproximadamente a los niveles reportados en la literatura como se observa en la figura 19 (Meshii & Watanabe, 2001).

**Figura 19.***Carga térmica en ANSYS*

*Nota.* Condiciones de la carga térmica analizada en ANSYS

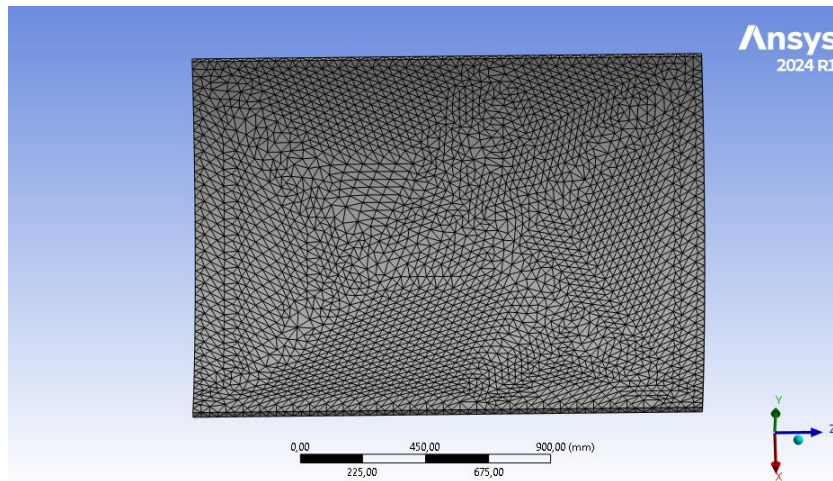
### 3.3.4. Generación de malla

La elaboración del mallado del modelo mediante elementos finitos es una parte crucial donde de la calidad del mallado en la punta de la grieta depende la exactitud del factor de intensidad (KI) y la velocidad de cómputo por lo tanto es la técnica más crítica para este estudio (Camacho Pérez, 2022). Se elaboro un mallado donde se definieron números de elementos, tamaños y nodos, equilibrando precisión y tiempo de cómputo donde se escogió la opción de Element Order (Quadratic), siendo de segundo orden donde la elección de elementos cuadráticos (SOLID186) se justifica por su capacidad para representar gradientes de esfuerzo extremos, característicos en la punta de una grieta, y por ser la opción recomendada en la guía de análisis de fractura de ANSYS (ANSYS, 2024). También se seleccionó la opción Physics Preference (Mechanical) ya que el motor de mallado prioriza la creación de elementos con alta resistencia a la distorsión bajo cargas de esfuerzo y deformación. La singularidad del campo de tensiones en la punta de una grieta se caracteriza por una dependencia  $r^{-1/2}$  donde  $r$  es la distancia radial desde la punta para capturar

adecuadamente esta singularidad sin un refinamiento excesivo de la malla como se observa en la figura 20.

**Figura 20.**

*Malla general en ANSYS*



*Nota.* Malla principal realizada en ANSYS

### **3.3.5. Incorporación de la grieta al recipiente**

Con base a la zona críticas encontradas en la bibliografía se selecciona la ubicación de la grieta en una de las zonas de mayor tensión como lo son el casco del cilindro, cerca de uniones con cabezales o soportes, o en cambios de sección.

Se genero la grieta superficial ( $a < t$ ) de forma semi-elíptica observada en la figura 21 ya que es la que se presenta en los recipientes a presión donde en la tabla 5 se definieron las dimensiones con una longitud de 4mm y una profundidad de 5mm.

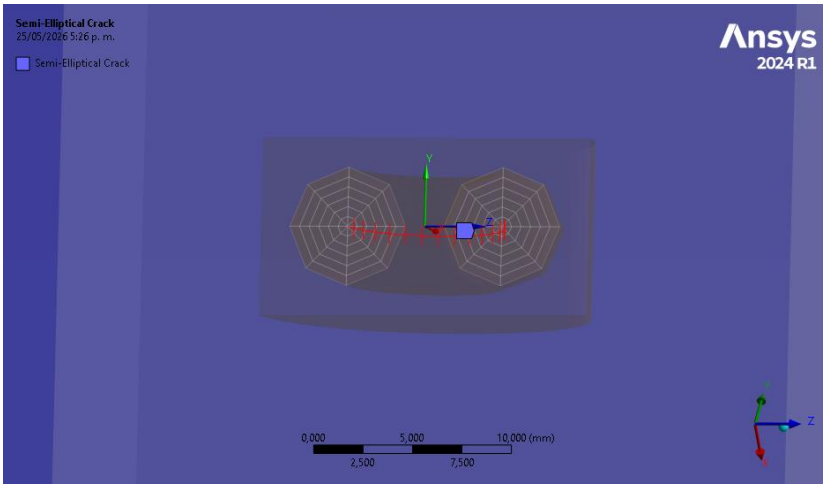
Tabla 5.

*Parámetros del diseño de la grieta.*

| Especificación           | Parametro    |
|--------------------------|--------------|
| Tipo de grieta           | Superficial  |
| Modo de grieta           | Modo 1       |
| Longitud de la grieta    | 4 mm         |
| Profundidad de la grieta | 5mm          |
| Orientacion              | Longitudinal |

Figura 21.

*Grieta en ANSYS*



*Nota.* Grieta semielíptica en ANSYS

3.3.6. *Estudio de convergencia de malla*

Para la independencia de malla se utilizó un valor de element size de 30mm en la malla general ya que los esfuerzos más importantes se concentran en el frente de grieta donde necesitamos un mallado mucho mejor detallado, la convergencia se realizó variando su calidad en el frente de la grieta donde hay tres parámetros que podemos ir cambiando para tener un mejor tiempo de cómputo se realizó un análisis iterativo, Crack Front Division, Mesh Contours y Circumferencial Divisions. Crack Front Division, controla la cantidad de puntos que se crean en toda la longitud del frente de

grieta. Mesh Contours son los anillos que rodean la punta de la grieta, al aumentar este valor se dará más espacio para calcular la integral lejos de la singularidad en la punta de la grieta. Circumferencial Divisions controla cuantos elementos hay alrededor de la grieta en forma circular. Además, están otros parámetros que intervienen, pero estos se dejan constantes que son: Largest Contour Radius, este parámetro define el radio físico del cilindro de integración que rodea el frente de grieta, que genera anillos concretos en forma de telaraña, este parámetro me permite que el resultado de la integral J no se vea afectado por la singularidad en la punta de la grieta. Fracture Affected Zone Height, este parámetro crea una caja que es la zona de refinamiento de la grieta, asegura que haya una transición suave entre los elementos diminutos de la punta de la grieta.

El valor de Mesh Contours se dejó fijo en 12 y Circumferencial Divisions en 32 mientras que Crack Front Divisions se varió desde 20 hasta 100 aumentando progresivamente el número de nodos y elementos en el modelo donde en la tabla 6 se presentan los resultados de la convergencia incluyendo el error relativo entre refinamientos sucesivos.

**Tabla 6.**

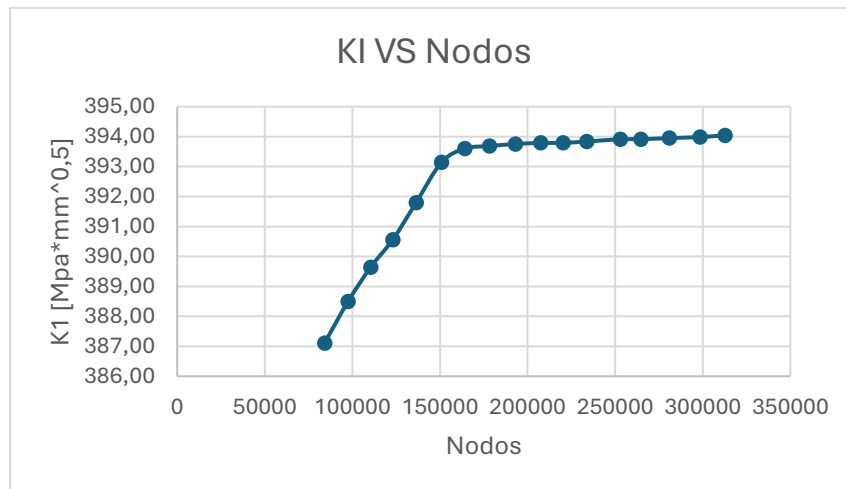
*Convergencia de malla en la punta de la grieta.*

| CONVERGENCIA DE MALLA |             |        |          |                          |                             |                |  |
|-----------------------|-------------|--------|----------|--------------------------|-----------------------------|----------------|--|
| Element size [mm]     | CFD/CD/MC   | Nodos  | Elements | J1 [mJ/mm <sup>2</sup> ] | K1 [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] | Error Relativo |  |
| 30                    | (20/32/12)  | 84116  | 32634    | 0,714                    | 387,11                      | -              |  |
| 30                    | (25/32/12)  | 97452  | 36957    | 0,719                    | 388,49                      | 0,00356        |  |
| 30                    | (30/32/12)  | 110417 | 40890    | 0,723                    | 389,64                      | 0,00295        |  |
| 30                    | (35/32/12)  | 122969 | 44702    | 0,726                    | 390,56                      | 0,00234        |  |
| 30                    | (40/32/12)  | 136389 | 48929    | 0,731                    | 391,80                      | 0,00317        |  |
| 30                    | (45/32/12)  | 150832 | 53568    | 0,736                    | 393,14                      | 0,00341        |  |
| 30                    | (50/32/12)  | 164067 | 57431    | 0,738                    | 393,60                      | 0,00116        |  |
| 30                    | (55/32/12)  | 178239 | 61878    | 0,738                    | 393,69                      | 0,00022        |  |
| 30                    | (60/32/12)  | 192971 | 66360    | 0,738                    | 393,75                      | 0,00017        |  |
| 30                    | (65/32/12)  | 207470 | 70689    | 0,738                    | 393,79                      | 0,00009        |  |
| 30                    | (70/32/12)  | 220173 | 74357    | 0,738                    | 393,79                      | 0,00001        |  |
| 30                    | (75/32/12)  | 233749 | 78372    | 0,739                    | 393,84                      | 0,00011        |  |
| 30                    | (80/32/12)  | 252898 | 84661    | 0,739                    | 393,91                      | 0,00019        |  |
| 30                    | (85/32/12)  | 264575 | 87962    | 0,739                    | 393,92                      | 0,00001        |  |
| 30                    | (90/32/12)  | 280886 | 93018    | 0,739                    | 393,95                      | 0,00009        |  |
| 30                    | (95/32/12)  | 298391 | 98427    | 0,739                    | 393,99                      | 0,00009        |  |
| 30                    | (100/32/12) | 312632 | 102794   | 0,739                    | 394,04                      | 0,00014        |  |

En la tabla se observa que a medida que se refina el mallado en la punta de la grieta aumentando el Crack Front Divisions nos indica que a partir de  $CFD = 60$  el valor de  $K_I$  se ha estabilizado en aproximadamente  $393.7 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{0,5}$  donde el criterio de convergencia adoptado fue que el error relativo entre dos refinamientos sucesivos es inferior al 0.05%. Por lo tanto, se seleccionó la configuración  $CFD = 60$ ,  $\text{Mesh Contours} = 12$  y  $\text{Circumferential Divisions} = 32$  como el balance óptimo entre precisión y eficiencia computacional.

**Figura 22.**

*Curva de la convergencia de malla.*



*Nota. Convergencia de  $k_i$  en función del número de nodos*

La figura 22 nos muestra tendencia creciente con estabilización asintótica sin caídas bruscas este comportamiento nos ayuda a saber que el modelo es numérico es consistente y que los resultados adquiridos son independientes de la malla a partir de un nivel de refinamiento moderado.

### 3.3.7. Selección de la malla

El refinamiento local en el frente de la grieta es un requisito en mecánica de la fractura requerido a la singularidad del campo de esfuerzos (Anderson, 2017) donde los resultados mostraron

que a partir de  $CFD = 60$  el valor de  $KI$  se estabiliza por lo tanto se seleccionó la configuración que se observa en la tabla 7 como el balance optimo entre precisión y eficiencia computacional.

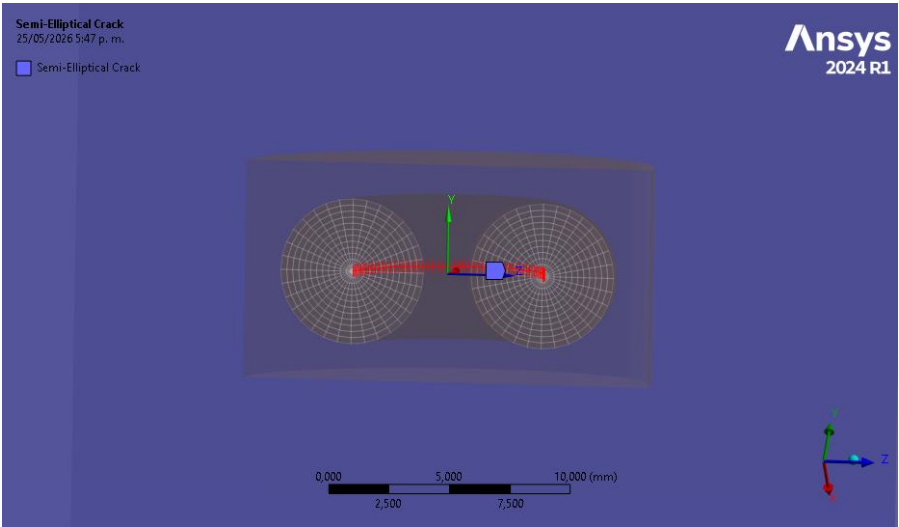
**Tabla 7.**

*Datos seleccionados del mallado en ANSYS.*

| MALLA SELECCIONADA |            |        |          |
|--------------------|------------|--------|----------|
| Element size [mm]  | CFD/CD/MD  | Nodos  | Elements |
| 30                 | (60/32/12) | 192971 | 66360    |

**Figura 23.**

*Mallado en la punta de la grieta.*

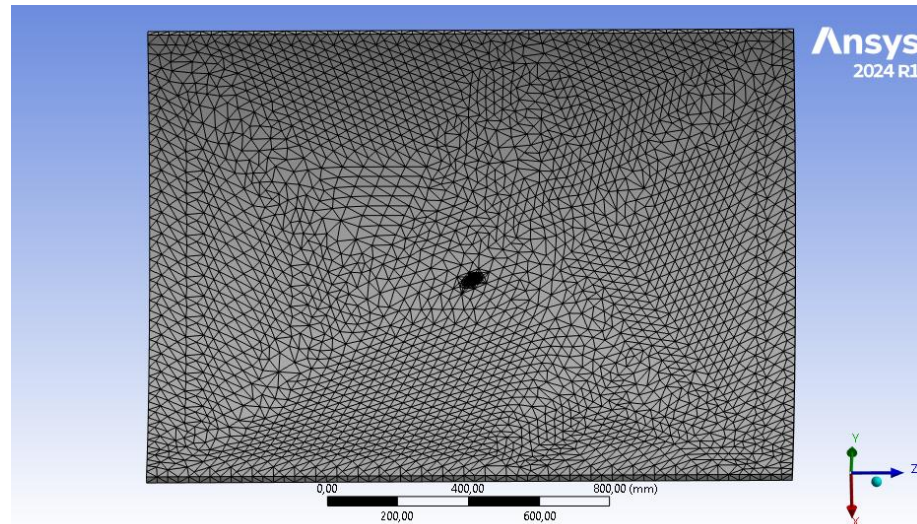


*Nota.* Grieta semielíptica en ANSYS con el mallado seleccionado.

Se presenta el detalle del mallado en la zona del frente de la grieta con la configuración seleccionada como se observa en la figura 23 donde los elementos se disponen en anillos concéntricos alrededor de la singularidad con una transición suave hacia el resto de la malla. Adicionalmente la malla base con la grieta incorporada mostrada en la figura 24 donde está compuesta por elementos tetraédricos.

**Figura 24.**

*Mallado con la grieta.*



*Nota.* Malla principal con la grieta incorporada.

### 3. Resultados

#### 4.1. Validación del modelo

Para validar en que régimen trabaja la grieta, se realizaron varias corridas con la malla seleccionada, una temperatura constante y un tamaño de grieta anteriormente especificada se hicieron varias corridas en el programa a diferentes presiones, con el fin de encontrar a que presión la grieta comienza a crecer ( $K_1 \geq K_c$ ).

**Tabla 8.***Datos de  $K_I$  para las diferentes presiones.*

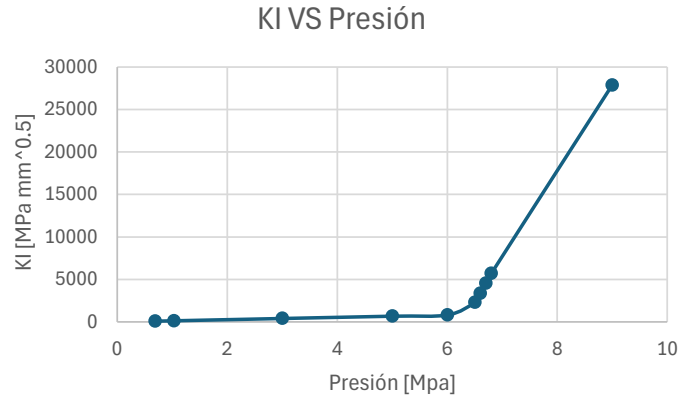
| Magnitud de presión | Factor $K_I$             |
|---------------------|--------------------------|
| MPa                 | [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] |
| 0,69                | 94,04                    |
| 1,03                | 140,47                   |
| 3                   | 411,46                   |
| 5                   | 682,22                   |
| 6                   | 823,08                   |
| 6,5                 | 2305,65                  |
| 6,6                 | 3381,66                  |
| 6,7                 | 4553,14                  |
| 6,8                 | 5711,95                  |
| 9                   | 27885,09                 |

Con valores observados en la tabla 8 podemos identificar que la grieta inicia su fase de crecimiento inestable a partir de una presión de 6,7 Mpa, punto en el cual el factor  $K_I$  supera el valor crítico de tenacidad a la fractura  $K_{IC}$  del material. Este incremento en  $K_I$  responde a la relación de proporcionalidad directa con la presión interna, aumentando el esfuerzo en la grieta. Asimismo, el comportamiento no lineal observado en valores superiores a 6,5 Mpa se debe a la expansión acelerada de la zona plástica en la punta de la grieta, aumentando la tasa de liberación de energía de deformación de manera acelerada hasta el colapso estructural.

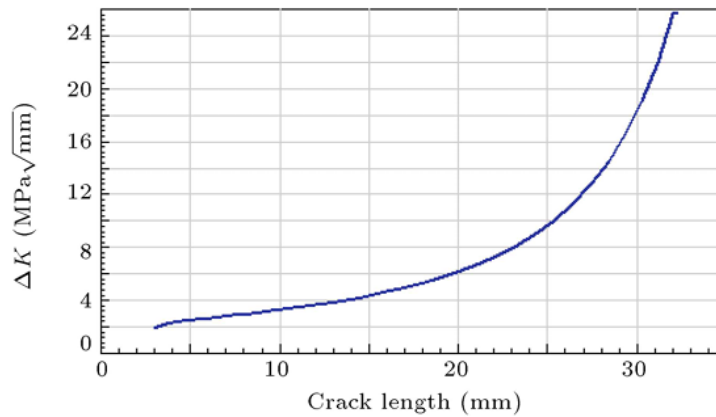
La validación del modelo se fundamenta en la relación entre la figura 25 y 26. Aunque tiene relaciones diferentes ambas coinciden en que a un valor de esfuerzo dado por la presión la grieta va a experimentar un aumento de longitud al principio de manera estable hasta que llega al punto de  $K_{IC}$  donde se ve en ambas graficas que aumentan bruscamente expresando un modelo no lineal de la propagación inestable.

**Figura 25**

*Factor de intensidad de esfuerzos vs Presión.*

**Figura 26.**

*Factor de intensidad de esfuerzos vs Longitud de grieta.*



Nota: La grafica muestra la longitud de la grieta respecto al Factor de Intensidad de esfuerzos (Ghasemi et al., 2019).

Obtenidos estos resultados del factor de intensidad de esfuerzo podemos evaluar en qué punto la grieta comienza a trabajar en un régimen elastoplástico mediante la siguiente relación.

$$B < 1 \left( \frac{k_I}{\sigma_y} \right)^2$$

$$19,69 < 1 \left( \frac{2305,65}{262} \right)^2$$

$$19,69 < 77,443$$

Al cumplirse la relación evaluada con un valor de  $K_I$  a una presión de 6,5 Mpa, podemos evidenciar que la punta de la grieta supera el límite de fluencia, trabajando en una zona plástica lo suficientemente grande como para invalidar los resultados del factor de intensidad de esfuerzos de la Mecánica de la Fractura Lineal Elástica (MFLE), por esto se trabajara el modelo con un análisis de la Mecánica de la Fractura elasto-plástica (MFEP), mediante el uso de la integral J.

Por consiguiente, vamos a calcular del análisis numérico en ANSYS los valores de la tasa de liberación de energía presente en el frente de grieta por medio de la integral J.

**Tabla 9.**

*Datos de la integral J para diferentes presiones.*

| Magnitud de presión | Integral J            | Factor KI                |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|
| MPa                 | [mJ/mm <sup>2</sup> ] | [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] |
| 0,69                | 0,04                  | 89,84                    |
| 1,03                | 0,09                  | 134,24                   |
| 3                   | 0,74                  | 393,13                   |
| 5                   | 2,09                  | 662,54                   |
| 6                   | 3,36                  | 839,59                   |
| 6,5                 | 21,98                 | 2148,56                  |
| 6,6                 | 37,27                 | 2797,80                  |
| 6,7                 | 53,20                 | 3342,54                  |
| 6,8                 | 68,08                 | 3781,20                  |
| 9                   | 706,79                | 12182,99                 |

Posteriormente, mediante los fundamentos de equivalencia energética, este valor fue transformado en el Factor de Intensidad de Esfuerzos Equivalente (corregido por la plasticidad), mediante la ecuación (12) bajo un estado plano de esfuerzos observados en la tabla 9.

$$K_I = \sqrt{J * E}$$

$$K_I = \sqrt{21,982328 * 210000}$$

$$K_I = 2148,55508 \text{ Mpa} * \text{mm}^{0,5}$$

Se realizó el ejemplo del cálculo del Factor  $K_I$  corregido por plasticidad para la presión de 6,5 Mpa, con el valor de la integral J obtenida por medio de ANSYS.

Se puede observar en la comparación de ambas tablas la diferencia que hay entre el método elástico lineal ( $K_I$ ) y el elasto-plástico (Integral J) a partir de los 6.5 Mpa. Esta diferencia se debe a que el método elástico lineal sobreestima la severidad que se presenta en la grieta al no considerar la disipación de energía por deformación plástica. En el modelo elasto-plástico la integral J refleja con una mayor precisión como el acero SA 516 Gr70 utiliza su ductilidad para amortiguar los esfuerzos en el frente de grieta, en consecuencia, los valores de  $K_I$  obtenidos a partir de la integral J crecen de manera más conservadora.

#### 4.2. Tamaño de grieta

Para obtener el tamaño de la grieta se hace un análisis manual por medio de la teoría de la integral J, donde se hará uso de la curva J-R (curva de resistencia a la fractura), obteniendo los valores de C1 (coeficiente de resistencia) y C2 (exponente de endurecimiento por deformación), mediante la formulación propuesta por Coêlho et al. (2023).

$$X = \frac{\sigma_{ys} + \sigma_{us}}{2}$$

$$X = \frac{262 + 620}{2} = 441 \text{ Mpa}$$

$$m = A_0 + A_1\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right) + A_2\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right)^2 + A_3\left(\frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{us}}\right)^3$$

$$m = 3,62 + 4,21\left(\frac{262}{620}\right) + 4,33\left(\frac{262}{620}\right)^2 + 2\left(\frac{262}{620}\right)^3$$

$$m = 6,323$$

$$\delta = \frac{J}{mX} = \frac{706,787}{6,323 \cdot 441} = 0,253 \text{ mm}$$

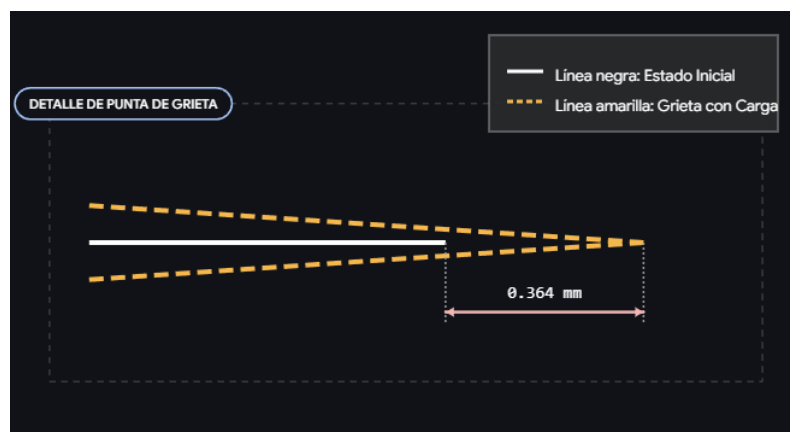
$$\delta = C_1(\Delta A)^{C_2}$$

$$\Delta A = \left(\frac{\delta}{C_1}\right)^{\frac{1}{C_2}} = \left(\frac{0,253}{0,47}\right)^{\frac{1}{0,613}} = 0,364 \text{ mm}$$

Esta longitud de la grieta se presenta para el dato de la tabla 9 a una presión de 9 Mpa, ya que es el único valor que excede el valor de  $J_{IC}$  donde la grieta comienza a expandirse longitudinalmente sobre el frente de grieta.

### Figura 27.

*Influencia de la profundidad inicial de la grieta*



Se muestra en la figura 27 la configuración inicial de la grieta donde se observa en la línea continua blanca y su posición final después de la propagación línea discontinua amarilla donde se

puede observar el crecimiento indicado en color rojo correspondiente a un avance del frente de grieta de igual a 0,364mm distancia calculada anteriormente.

#### 4.3. Diseño de experimentos y análisis estadístico

La combinación de las técnicas de simulación con el método de análisis de varianza ANOVA permite no solo detectar que parámetros son más significativos, sino que también cuantificar su apoyo relativo a la variabilidad del estudio, proporcionando un enfoque sistemático y eficiente para la experimentación (Gutiérrez Pulido & De la Vara Salazar, 2008).

Para la evaluación paramétrica del crecimiento de grieta bajo condiciones termo-mecánicas, se adoptó un diseño de experimentos de un solo factor. Este enfoque me permite aislar el efecto individual y cuantificar la influencia de cada factor por separado sobre la respuesta, que para nuestro estudio va a ser el factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  corregido por la plasticidad. Los parámetros de estudio seleccionados se presentan en la tabla 10, la selección de estos se fundamenta en la relevancia física que tiene frente a esfuerzos en la punta de la grieta, abarcando rangos operativos representativos de recipientes a presión industriales.

**Tabla 10.**

*Parámetros escogidos con sus niveles.*

| Parametros Estudiados |            |                               |
|-----------------------|------------|-------------------------------|
| Factor                | Simbolo    | Niveles (Valores)             |
| Profundidad relativa  | $a/t$      | 0.1; 0.3; 0.5; 0.7            |
| Presion interna       | $p$        | 2; 4; 6; 8MPa                 |
| Gradiente termico     | $\Delta t$ | 5 °C ; 25 °C ; 50 °C ; 100 °C |

Para el factor de profundidad relativa ( $a/t$ ), tenemos la profundidad sobre el espesor de la pared del recipiente a presión, como el espesor siempre va a permanecer constante, para cumplir con

la relación adimensional vamos a variar únicamente la profundidad relativa con los valores ya calculados observados en la tabla 11.

**Tabla 11.**

*Valores de profundidad.*

| Profundidad Relativa (a/t), Profundidad (a) |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 0,1                                         | 1,97 [mm]  |
| 0,3                                         | 5,91 [mm]  |
| 0,5                                         | 9,84 [mm]  |
| 0,7                                         | 13,84 [mm] |

Para el factor del gradiente térmico ( $\Delta t$ ), se hizo teniendo en cuenta las condiciones de temperatura interna y externa del recipiente a presión, donde vamos a tener una temperatura externa siempre constante de 22°C y el único valor que vamos a cambiar para que la relación se cumpla es la Temperatura interna como lo muestra la tabla (12).

**Tabla 12.**

*Datos de temperatura.*

| Gradiente de Temperatura | Temperatura int |
|--------------------------|-----------------|
| 5°C                      | 27°C            |
| 25°C                     | 47°C            |
| 50°C                     | 72°C            |
| 100°C                    | 122°C           |

En el diseño de experimentos de un solo factor, se estableció una configuración de referencia o línea base, esta configuración representa un punto de partida a partir del cual se varían los parámetros. Se eligieron los valores medios altos dentro del rango establecido para asegurar la estabilidad numérica del modelo y permitir variaciones en ambos sentidos, ascendente y descendente, con el propósito de obtener el análisis de sensibilidad a partir de la respuesta que es el

Factor de Intensidad de Esfuerzos  $K_I$  corregido por la plasticidad que se presenta en el frente de la grieta.

El procedimiento experimental consiste en variar sistemáticamente un solo parámetro a través de sus niveles ya definidos, manteniendo los dos factores restantes constantes en sus valores de referencia como se observa en la tabla 13. Este método nos permite realizar tres ANOVAS correspondientes a cada parámetro, facilitando la identificación del factor con mayor peso estadístico en la respuesta.

**Tabla 13.**

*Diseño de experimentos.*

| Punto de Analisis | Presión [Mpa] | Delta de Temperatura [°C] | Profundidad Relativa(a/t) | Integral J [mJ/mm <sup>2</sup> ] | K1 [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] | Nota        |
|-------------------|---------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|-------------|
| P0 (Base)         | 6             | 50                        | 0,5                       | 8,67                             | 1349,60                     | Línea Base  |
| P1                | 2             | 50                        | 0,5                       | 0,07                             | 122,10                      | Varia P     |
| P2                | 4             | 50                        | 0,5                       | 0,89                             | 433,40                      | Varia P     |
| P3                | 8             | 50                        | 0,5                       | 541,48                           | 10663,53                    | Varia P     |
| P4                | 6             | 5                         | 0,5                       | 4,71                             | 994,76                      | Varia T     |
| P5                | 6             | 25                        | 0,5                       | 4,84                             | 1007,79                     | Varia T     |
| P6                | 6             | 100                       | 0,5                       | 11,60                            | 1560,50                     | Varia T     |
| P7                | 6             | 50                        | 0,1                       | 2,85                             | 773,14                      | Varia (a/t) |
| P8                | 6             | 50                        | 0,3                       | 6,07                             | 1129,27                     | Varia (a/t) |
| P9                | 6             | 50                        | 0,7                       | 10,65                            | 1495,56                     | Varia (a/t) |

*Nota.* Diseño de experimentos con todos los parámetros establecidos.

Desde el análisis del diseño experimental, se realizó un estudio paramétrico compuesto por 10 escenarios de simulación, considerando una línea base y los cambios solo en una variable para el caso de presión interna, el gradiente térmico y la profundidad relativa de la grieta (a/t), como ANSYS es un software determinista es decir con la misma configuración de los valores para cada parámetro

siempre nos arroja la misma respuesta, es por esto que no se considera hacerlo como un diseño de experimentos completamente al azar.

A continuación, la tabla 14 expone los valores de  $K_I$  para los cuatro niveles de presión (P1 a P4), manteniendo constantes el gradiente térmico y la relación de profundidad relativa.

**Tabla 14.**

*Diseño experimental del factor Presión.*

|                                | Parámetro de Presión |        |         |          |
|--------------------------------|----------------------|--------|---------|----------|
|                                | P1                   | P2     | P3      | P4       |
| $K_I$ [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] | 122.11               | 433.39 | 1349.59 | 10663.52 |

En el siguiente ANOVA se presentan los resultados de la experimentación paramétrica de un solo factor, donde se evalúa la interacción de la carga mecánica de presión sobre el Factor de Intensidad de Esfuerzos Corregido ( $K_I$ ). Cabe recalcar que la recolección de estos datos de la tabla 14 se llevó a cabo mediante el Método de Elementos Finitos (MEF) a través del software ANSYS. Dada la naturaleza estrictamente determinística de este solucionador numérico, el sistema carece de ruido ambiental o variabilidad. Esto implica que la ejecución repetida de un mismo escenario arrojará resultados idénticos, haciendo que no se puedan obtener réplicas aleatorias reales, esto provoca que el error experimental puro sea matemáticamente cero.

Debido a la ausencia de este error residual, el cálculo tradicional del estadístico de Fisher (F) y el valor de P resulta inaplicable, ya que implicaría una división por cero. Por consiguiente, para cumplir con el análisis estadístico del estudio y evaluar objetivamente la influencia de cada parámetro, el Análisis de Varianza (ANOVA) se adaptó para enfocarse en la descomposición de la varianza. Todo el análisis posterior a la recolección de datos se desarrollará exclusivamente hasta el cálculo de la Suma de Cuadrados (SC) y mediante el Cuadrado Medio (CM), mediante el software

de Minitab. Esta métrica nos permitirá cuantificar y comparar la magnitud de la dispersión que cada parámetro inyecta al sistema como se observa en la figura 28 29 y 30.

### Figura 28.

*Análisis de varianza del factor presión.*

#### Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 3  | 76242374  | 25414125  | *       | *       |
| Error  | 0  | *         | *         |         |         |
| Total  | 3  | 76242374  |           |         |         |

En la tabla 15 expone los valores de  $K_I$  para los cuatro niveles del gradiente de temperatura ( $\Delta T1$  a  $\Delta T4$ ), manteniendo constantes los parámetros de presión y la relación de profundidad relativa.

### Tabla 15.

*Diseño experimental del factor Gradiente de Temperatura.*

| Parámetro Gradiente de Temperatura |        |         |         |         |
|------------------------------------|--------|---------|---------|---------|
|                                    | T1     | T2      | T3      | T4      |
| K1 [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ]        | 994.76 | 1007.79 | 1349.59 | 1560.49 |

### Figura 29.

*Análisis de varianza del factor Gradiente de Temperatura.*

#### Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 3  | 228236    | 76079     | *       | *       |
| Error  | 0  | *         | *         |         |         |
| Total  | 3  | 228236    |           |         |         |

En la tabla 16 expone los valores de  $K_I$  para los cuatro niveles de la relación de profundidad relativa  $((a/t)_1$  a  $(a/t)_4$ ), manteniendo constantes los parámetros de presión y el gradiente térmico.

**Tabla 16.**

*Diseño experimental del factor Profundidad Relativa.*

|                                | Parámetro de Profundidad relativa |         |         |         |
|--------------------------------|-----------------------------------|---------|---------|---------|
|                                | (a/t)1                            | (a/t)2  | (a/t)3  | (a/t)4  |
| $K_I$ [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] | 773.13                            | 1129.27 | 1349.59 | 1495.56 |

**Figura 30.**

*Análisis de varianza del factor Profundidad Relativa.*

### Análisis de Varianza

| Fuente | GL | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
|--------|----|-----------|-----------|---------|---------|
| Factor | 3  | 296263    | 98754     | *       | *       |
| Error  | 0  | *         | *         |         |         |
| Total  | 3  | 296263    |           |         |         |

Estos valores de la Suma de Cuadrados (SC) me representan estadísticamente la dispersión total o la magnitud de la variabilidad que tienen los parámetros evaluados mediante la variable de respuesta alrededor de su media global. Con estos valores del Cuadrado Medio (CM) podemos evidenciar cuál de los tres parámetros afecta en mayor medida el  $K_I$ , que directamente está relacionado con el crecimiento de la grieta, por lo tanto, podemos saber que parámetro afecta más el crecimiento de la grieta de acuerdo con la tabla 17. Las unidades del cuadrado medio corresponden a la variable de respuesta del modelo (factor de intensidad de esfuerzos) elevada al cuadrado, debido al proceso matemático de calculo de la suma de cuadrados en el análisis de varianza (ANOVA) por medio del software Minitab.

**Tabla 17.**

*Valores del cuadrado medio para cada parámetro.*

| Parámetro                | Cudrado Medio [Mpa*mm <sup>0,5</sup> ] <sup>2</sup> | Porcentaje [%] |
|--------------------------|-----------------------------------------------------|----------------|
| Presión                  | 25414125                                            | 99,317         |
| Gradiente de Temperatura | 76079                                               | 0,297          |
| Profundidad Relativa     | 98754                                               | 0,386          |
| TOTAL                    | 25588958                                            | 100            |

*Nota.* El porcentaje es la incidencia que tiene cada factor en el  $K_I$ .

#### 4. Análisis de resultados

##### 5.1. Análisis del factor de intensidad de esfuerzos y la integral J

La validación del modelo numérico confirmó que los resultados obtenidos en ANSYS son consistentes con las soluciones analíticas de la norma API 579-1/ASME FFS-1 y Ghasemi et al. (2019) donde a partir de esta base, se procedió a analizar el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  para diferentes niveles de presión interna, gradiente de temperatura y relación de profundidad relativa.

En la figura 25 se observa que el factor  $K_I$  crece de manera lineal y con el incremento de la presión interna cambia a un comportamiento no lineal. Este comportamiento es consistente con la teoría de la mecánica de fractura elástica lineal, donde  $K_I$  y el esfuerzo circunferencial es directamente proporcional a la presión sin embargo a partir de una presión de aproximadamente 6.5 MPa la relación entre la presión y el fator  $K_I$  deja de ser lineal lo que sugiere que la zona plástica en la punta de la grieta ha crecido lo suficiente como para invalidar el análisis puramente elástico.

### ***5.1.1. Transición al régimen elastoplástico***

Los resultados de la Tabla 8 muestran que la integral J también presenta un crecimiento más conservador a partir de los 6.5 MPa alcanzando valores significativamente menores a la tabla 7 que reflejan la disipación de energía plástica en el frente de la grieta este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura para aceros estructurales dúctiles como lo es el SA-516 Gr. 70 donde la zona plástica se desarrolla progresivamente a medida que la carga aumenta.

Este resultado tiene implicaciones importantes para la evaluación de integridad estructural del recipiente donde para presiones superiores a 6.5 MPa, el uso de la MFLE subestimaría el factor de intensidad de esfuerzos o sobrestimaría la resistencia del material, lo que podría llevar a conclusiones no conservadoras en términos de seguridad por esta razón se adoptó la mecánica de fractura elastoplástica (EPFM) mediante el cálculo de la integral J ya que proporciona una descripción más precisa del campo de deformaciones en la punta de la grieta.

## **5.2. Interpretación del ANOVA**

El diseño de experimentos unifactorial, complementado con el análisis de varianza, permitió cuantificar la importancia de cada uno de los tres factores evaluados sobre la variable respuesta  $K_I$  donde en la Tabla 16 se resume los resultados del ANOVA observando que la presión interna es el factor que ejerce la influencia más significativa con un 99.317%.

Este resultado es consistente con la teoría de recipientes de pared delgada donde el esfuerzo circunferencial es directamente proporcional a la presión interna y constituye la carga principal que actúa sobre una grieta longitudinal donde en el rango de presiones estudiado 2 a 8 MPa los esfuerzos de membrana inducidos por la presión son de tal magnitud que enmascaran los efectos de los otros dos factores. Esta influencia significativa de la presión se da al considerar presiones que superan los rangos nominales de operación con el fin de que haya un crecimiento en el frente de grieta.

Esto implica que para recipientes de pared delgada las estrategias de control de integridad estructural deben dar prioridad al monitoreo de sobrepresiones, teniendo en cuenta que el gradiente térmico podría incrementar su efecto en el factor  $K_I$  si se evalúa dentro de un régimen de operación nominal más estricto.

La profundidad relativa de la grieta contribuyó con solo un 0.386% este resultado, se explica por el hecho de que la profundidad de la grieta fue fijada en valores  $a/t = 0.1$  a  $0.7$  según (Saad & Bouabdellah, 2023) dentro del rango de validez de la MFLE. En este rango, el factor de forma y la raíz cuadrada de la profundidad varían de manera menos drástica que el esfuerzo de membrana inducido por la presión.

El gradiente térmico mostró la menor influencia, con apenas un 0.297%. Esto se justifica por la condición de pared delgada del recipiente  $(r/t) \geq 10$ . Al tener un espesor reducido, el gradiente de temperatura a través de la pared genera esfuerzos térmicos pequeños, ya que la restricción a la expansión térmica es limitada, si el análisis se hubiera realizado en un recipiente de pared gruesa, es esperable que los esfuerzos térmicos tuvieran una mayor contribución en el factor  $K_I$ .

## 5. Conclusiones

Con base en la revisión bibliográfica y en los lineamientos de la norma ASME Sección VIII y API 579/ASME FSS-1 se logró identificar y seleccionar un conjunto de parámetros geométricos y operativos que afectan la integridad del recipiente los cuales fueron profundidad relativa ( $a/t$ ) presión interna ( $p$ ) y el gradiente térmico ( $\Delta T$ ) a través del espesor, donde la definición de los rangos de variación para cada parámetro se fundamentó en la literatura especializada Newman & Raju, 1981; Erdogan & Sih, 1963; Meshii & Watanabe, 2001; Espinoza et al., 2019 y en los valores típicos de operación de recipientes industriales.

La parametrización propuesta nos permitió realizar un estudio sistemático y controlado del efecto de cada parámetro sobre el factor de respuesta  $K_I$ .

Se logró modelar numéricamente en ANSYS una placa del recipiente a presión cilíndrico horizontal de pared delgada con una grieta superficial semielíptica demostrando ser una metodología robusta para predecir el comportamiento de defectos superficiales en estructuras de pared delgada determinando el factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  en la punta de la grieta, logrando identificar cuál de los tres parámetros escogidos afecta en mayor medida el crecimiento de la grieta.

El régimen de mecánica de fractura lineal elástica (MFLE) tiene un límite operativo definido por la condición de Irwin, para el recipiente y el material SA-516 Gr 70 se identificó que a presiones superiores a 6,5 Mpa la zona plástica deja de ser pequeña en comparación con el espesor de la pared invalidando el parámetro  $K_I$  ante la plastificación se validó la transición hacia la mecánica de fractura elasto-plástica (MFEP) estableciendo la integral J como el parámetro energético vital para caracterizar con exactitud la fuerza impulsora de la grieta, donde posteriormente se vuelve a utilizar el factor  $K_I$  corregido por los efectos de la plasticidad en el frente de la grieta.

La presión interna constituye el parámetro dominante en la integridad estructural del recipiente, acumulando el 99.317% de la variabilidad de la respuesta el factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$ . Esto se debe a que los rangos de presión interna evaluados son mucho mayores que los valores de operación, por lo que se debía evaluar en un escenario donde la grieta estuviera en crecimiento. Esta influencia también se debe los esfuerzos de membrana (circunferenciales) que afectan en mayor medida la propagación de la grieta que los esfuerzos térmicos inducidos por el gradiente de temperatura a través del espesor. Este resultado sugiere que las estrategias de inspección deben priorizar recipientes sometidos a presiones elevadas.

La profundidad relativa de la grieta (a/t) presentó una contribución en la respuesta de apenas 0,386%. Esto nos indica que dentro del rango analizado con la línea base fija, el incremento del tamaño del defecto no altera de forma drástica el factor de intensidad de esfuerzos  $K_I$  en comparación con la magnitud que genera el cambio de presión.

El gradiente térmico mostró la menor influencia con un 0,297%. Esto se justifica teóricamente por la condición del sistema de pared delgada del recipiente; al tener un espesor mínimo, los esfuerzos generados por la diferencia de temperatura entre el interior y exterior son bajos, debido a que no hay suficiente material que permita una oposición severa que acumule tensiones drásticas en su estructura interna.

## 6. Recomendaciones

El presente estudio utilizó un diseño unifactorial el cual permitió identificar los efectos principales de cada factor sobre el factor de intensidad de esfuerzos sin embargo este diseño no captura interacciones entre factores donde se sugiere para trabajos futuros implementar un diseño factorial completo  $4^3$  o un diseño factorial fraccionado  $2^{k-p}$  para estudiar las interacciones de segundo orden entre cada uno de los factores.

Dado que el espesor restringe el flujo térmico, para un trabajo futuro se podría considerar el cambio a un recipiente de pared gruesa replicando el análisis paramétrico. Esto con el fin de evidenciar como crecería el porcentaje de esfuerzos térmicos, ya que la pared gruesa genera esfuerzos de compresión y tracción severos en las fibras internas del espesor, lo que alterará drásticamente la distribución del ANOVA.

Se recomienda para estudios futuros realizar un análisis de sensibilidad global utilizando un diseño de experimentos que considere rangos de variación acotados exclusivamente a los rangos de operación nominal del equipo (especialmente para la presión y temperatura), permitiendo así identificar interacciones que podrían estar ocultas por la alta variabilidad impuesta en este estudio a los parámetros nominales de operación.

### Referencias bibliográficas

- Anderson, T. L. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (4th ed.). CRC Press.
- API. (2006). *API 510: Pressure Vessel Inspection Code: In-Service Inspection, Rating, Repair, and Alteration*.
- AROTEC. (2023, October 25). How to detect the cracks while pressure vessels inspection. <https://www.arotec-co.de/articles/how-can-crack-detection-be-performed-during-the-inspection-of-pressure-vessels-in-the-production-stage/>
- Arvengtraining. (2015). *Esfuerzos en Recipientes a Presión de pared delgada*. Arveng Training & Engineering. <https://arvengtraining.com/esfuerzos-recipientes-a-presion-pared-delgada/>
- ASME. (2023). BPVC.VIII.1 - BPVC Section VIII-Rules for Construction of Pressure Vessels Division 1. [www.asme.org/cer](http://www.asme.org/cer)
- ASME. (2019). ASME BPVC.II.A-2019 Section II Materials (ASME Boiler and Pressure Vessel Code An International Code 2019 Part A Ferrous Material Specifications (SA-451 to End)). ASME. <https://es.slideshare.net/slideshow/asmeiipartdmetric2019pdf/265685039#66>
- Bilbao, J. L. A, & Martínez, J. J. G. (2002). *Mecánica de fractura*. En Servicio Editorial de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatearen Argitalpen Zerbitzua eBooks. <https://addi.ehu.es/bitstream/10810/9356/1/Mecanica%20de%20fractura.pdf>
- Boley, Bruno A, & Weiner Jerome H. (1997). Theory of Thermal Stresses. *Physics Today*, 14(3), 58-60. <https://doi.org/10.1063/1.3057466>
- Camacho Pérez, J. S., & Caballero Pabón, A. R. (2022). *Análisis termoelástico computacional de fallas en juntas soldadas de recipientes a presión que almacenan hidrocarburos en el*

- departamento de Santander bajo la norma ASME sección VIII división 1* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio Institucional UIS.
- Chattopadhyay, S. (2005). *Pressure vessels: Design and practice*. CRC Press.  
<https://books.google.com.co/books?id=QtQWiZSkBzMC>
- Coêlho, G. de C., Silva, A.A., dos Santos, M.A., Machado, J. J. M., & Tavares, J. M. R. S. (2023). Ductile fracture behavior of ASTM A516 Gr.70 pressure vessel steel by ASTM and ISO fracture toughness standards. *Metals*, 13(5), 867. <https://doi.org/10.3390/met13050867>
- Díaz del Castillo Rodríguez, Felipe. (2018). Recipientes a presión (Lecturas de Ingeniería 27). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Departamento de Ingeniería.
- Dowling, N. E. (2013). Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue (4th ed.). Pearson.
- Dymond, J. H., & Malhotra, R. (1988). The Tait equation: 100 years on. *International Journal Of Thermophysics*, 9(6), 941-951. <https://doi.org/10.1007/bf01133262>
- Erdogan, F., y Sih, G. C. (1963). On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering*, 85(4), 519-525. <https://doi.org/10.1115/1.3656897>
- Espinoza, L., González-Estrada, O. A., & Graciano, C. (2019, 1 septiembre). *Análisis de un interno tipo brida de un recipiente horizontal a presión utilizando elementos finitos*. <https://www.redalyc.org/journal/5537/553762534016/html/>
- Flor, T. (2019). El método de los Elementos Finitos, aplicado al análisis estructural - Manuel Vázquez, Eloísa López. Academia.  
[https://www.academia.edu/38827344/El\\_m%C3%A9todo\\_de\\_los\\_Elementos\\_Finitos\\_apli](https://www.academia.edu/38827344/El_m%C3%A9todo_de_los_Elementos_Finitos_apli)

[cado al an%C3%A1lisis estructural Manuel V%C3%A1zquez Elo%C3%ADsa L%C3%B3pez](#)

Folias, E. S. (1965). An axial crack in a pressurized cylindrical shell. *International Journal Of Fracture*, 1-1(2), 104-113. <https://doi.org/10.1007/bf00186748>

Ghasemi, H., Nejad, R. M., Jalayerian, A., & Tadi Beni, Y. (2019). Fatigue and fracture behavior of A516 steel used in thick-walled pressure vessels. *Scientia Iranica*.  
<https://es.scribd.com/document/684203614/SCI-Volume-27-Issue-6-Pages-2902-2914>

Gutiérrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2008). Análisis y diseño de experimentos (2th ed.). McGRAW-HILL interamericana.

Hosseini, A., Wimberly, D., & Zanganeh, K. (2019). *A comparison of API 579 and BS 7910 for assessment of cracks in pressure vessels*. ASME Pressure Vessels and Piping Conference.

Jiménez, C. G. (2025, 25 julio). Aparición de grietas en equipos a presión. CADE Engineered Technologies. <https://cadeengineering.com/es/aparicion-de-grietas-en-equipos-a-presion/>

JoaquinMiguelHocesZarate. (s. f.). Recipientes de pared delgada. Scribd.  
<https://es.scribd.com/document/391103432/Recipientes-de-Pared-Delgada>

Joshi, S., & Price, J. W. H. (2009). A comparative study on application of design codes for prediction of fatigue life of a mining dragline cluster. *Engineering Failure Analysis*, 16(5), 1562–1569.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2008.10.006>

Megyesy, E. F. (2001). Pressure vessel handbook. En *Medical Entomology and Zoology*.  
<http://ci.nii.ac.jp/ncid/BA56541428>

Mellings, S. C., & Baynham, J. M. W. (2010). Automatic fatigue crack growth. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, 6(PART B).  
<https://doi.org/10.1115/PVP2009-77252>

- Meshii, T., & Watanabe, K. (2004). Stress Intensity Factor of a Circumferential Crack in a Thick-Walled Cylinder Under Thermal Striping. *Journal Of Pressure Vessel Technology*, 126(2), 157-162. <https://doi.org/10.1115/1.1687797>
- Newman, J. C., y Raju, I. S. (1981). An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack. *Engineering Fracture Mechanics*, 15(1-2), 185-192. [https://doi.org/10.1016/00137944\(81\)90116-8](https://doi.org/10.1016/00137944(81)90116-8)
- Perez, E. V. (2016, 6 diciembre). Metodología de analisis de fallas en recipientes a presión y tuberías de mediano y gran tamaño <https://www.monografias.com/docs111/metodologia-analisis-fallas-recipientes-apresion-y-tuberias-mediano-y-gran-tamano/metodologia-analisis-fallas-recipientes-apresion-y-tuberias-mediano-y-gran-tamano>
- Reilly. (2025, 27 enero). Understanding the Causes of Pressure Vessel Failure. Red River. <https://www.redriver.team/understanding-the-causes-of-pressure-vessel-failure/>
- Rushing, H., Wisnowski, J., & Karl, A. T. (2013). Design and Analysis of Experiments by Douglas Montgomery: a supplement for using JMP. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2588366>
- Toledano, I. (2024, 13 marzo). ¿Qué es un recipiente a presión? Wattco. <https://www.wattco.com/es/2023/09/que-es-un-recipiente-a-presion/>
- Ward, J. P. (1992). Solid Mechanics: An Introduction (1st ed., Vol. 15). Springer Science + Business Media Dordrecht.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. (2013). The Finite Element Method: its Basis and Fundamentals. En *Elsevier eBooks*. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-24909-9>

Zhou, X., He, R., Zhou, T., & Liu, Z. (2022). Crack propagation on the surface of the bottleneck of a pressure vessel considering the initial crack angle. *Applied Sciences*, 12(8), 3913. <https://doi.org/10.3390/app12083913>