



**UNIVERSIDAD POPULAR AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE PUEBLA**

MAESTRÍA EN ESTRUCTURAS

**APRECIACIÓN DE LA MECÁNICA DE LA
FRACTURA EN TUBOS A PRESIÓN**

Trabajo de Investigación
que para obtener el Grado de

MAESTRO EN ESTRUCTURAS

Presenta:

Juan José Gutiérrez Vidal

Puebla, Pue., México

Febrero de 2000



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis Padres y Hermanos

A Donají

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor el Dr. Oscar A. Flores Macías por su gran amistad y ayuda.

Al IMP, Delegación Zona Sur, por haberme otorgado la BECA y por su apoyo, en particular al Ing. Rogerio González Magaña, Gerente de Ingeniería, por su disposición.

Al personal de Planeación de la delegación, por su ayuda y apoyo en los trámites administrativos. A todos gracias.

A mis compañeros Teófilo Salomón García y Alejandro Vargas Colorado por su colaboración.

CONTENIDO

FIGURAS.	<i>iv</i>
TABLAS.	<i>v</i>
GRÁFICAS.	<i>vi</i>
RESUMEN.	<i>vii</i>
ABSTRACT.	<i>viii</i>
1. INTRODUCCIÓN.	<i>1</i>
2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA MIEMBROS CON GRIETAS.	<i>4</i>
2.1. ANTECEDENTES.	<i>4</i>
2.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA.	<i>6</i>
2.2.1. La Tasa de energía liberada.	<i>11</i>
2.2.2. Condición de estabilidad en grietas.	<i>12</i>
2.2.3. Efecto de un ancho finito sobre la distribución de esfuerzos en la placa.	<i>14</i>
2.2.4. Relación entre K y G .	<i>17</i>
2.3. DEFORMACIÓN DEL EXTREMO DE LA GRIETA.	<i>20</i>
2.4. SUPERPOSICIÓN DE LOS FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.	<i>23</i>
2.5. DESPLAZAMIENTO DE ABERTURA EN LA PUNTA DE LA GRIETA (COD).	<i>24</i>
2.6. ECUACIONES DE FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.	<i>25</i>
2.6.1. Grieta a través del espesor.	<i>25</i>
2.6.2. Placa doblemente agrietada.	<i>26</i>
2.6.3. Placa con grieta lateral.	<i>28</i>
2.6.4. Grietas en orificios.	<i>29</i>
2.6.5. Grieta simple en una viga en flexión.	<i>29</i>
2.6.6. Grieta circular o elíptica en una placa infinita.	<i>31</i>
2.6.7. Superficie agrietada.	<i>35</i>
2.6.8. Grieta en muestras tipo Wol.	<i>37</i>

3. DISEÑO DE FRACTURA MECÁNICA.	40
3.1. INTRODUCCIÓN.	40
3.2. FACTORES RELEVANTES EN LA MECÁNICA DE LA FRACTURA.	43
3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE FRACTURA FRÁGIL.	45
3.4. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL DISEÑO.	47
3.5. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN MECÁNICA DE LA FRACTURA POR FALLA TERMINAL.	51
3.6. CRITERIO DE FRACTURA.	62
3.7. PLANES DE CONTROL DE FRACTURA.	62
4. NORMA TIVIDAD Y CÁLCULO DE ESFUERZOS.	65
4.1. INTRODUCCIÓN.	65
4.2. ALCANCES DE LOS CÓDIGOS.	67
4.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS ACTUANTES Y PERMISIBLES.	70
4.3.1. ASME B31.3.	70
4.3.2. ASME B31.4.	74
4.3.3. ASME B31.8.	77
4.4. REVISIÓN DE ESPESORES.	80
4.4.1. ASME B31.3.	80
4.4.2. ASME B31.4.	82
4.4.3. ASME B31.8.	83
4.5. FUERZAS Y MOMENTOS PERMISIBLES EN EQUIPOS.	84
4.5.1. Fuerzas y momentos permisibles en turbinas de vapor.	84
4.5.2. Fuerzas y momentos permisibles en compresores.	87
4.5.3. Fuerzas y momentos permisibles en bombas.	89
4.5.4. Fuerzas y momentos permisibles en enfriadores por aire.	92
4.5.5. Fuerzas y momentos permisibles en hornos.	93
4.6. CÁLCULOS DE ESFUERZO CON EL PROGRAMA AUTOPIPE.	94
4.6.1. ASME B31.3.	94
4.6.2. ASME B31.4.	98
4.6.3. ASME B31.8.	102

4.7. OBSERVACIONES.	106
5. APLICACIÓN DE FÓRMULAS DE FRACTURAS EN CILINDROS CON GRIETAS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.	108
5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.	108
5.2. ESTUDIO PARAMÉTRICO.	109
5.3. CILINDRO SOMETIDO A FLEXIÓN Y TENSIÓN COMBINADOS.	110
5.3.1. Tensión axial.	111
5.3.2. Momento flexionante.	115
5.3.3. Presión interna.	118
5.4. CILINDRO SUJETO A PRESIÓN INTERNA, GRIETA DE LONGITUD FINITA A TRAVÉS DEL ESPESOR DEL CILINDRO.	122
5.5. CILINDRO SUJETO A PRESIÓN INTERNA, GRIETA INTERNA.	126
5.6. GRIETA AXISIMETRICA EN UN CILINDRO SUJETO A TENSIÓN UNIFORME.	130
5.7. GRIETA SEMIELÍPTICA EN UN CILINDRO SUJETO A TENSIÓN UNIFORME.	133
5.8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.	136
6. CONCLUSIONES.	139
APÉNDICE.	142
NOMENCLATURA.	169
REFERENCIAS.	172

FIGURAS.

Figura 2.1. Modos de carga elementales que se pueden aplicar a una grieta	7
Figura 2.2. Definición de los ejes coordenados delante de la punta de la grieta. La dirección z es normal al dibujo	9
Figura 2.3. Diagrama esquemático de la fuerza causante G / curva R	13
Figura 2.4. Efectos en la concentración de esfuerzos, para una placa con ancho finito y ancho infinito, debido a una grieta que atraviesa toda la placa.....	15
Figura 2.5. Grietas colineales en una placa infinita sujeta a tensión remota	16
Figura 2.6. Acortamiento Δa en la grieta debido a la aplicación de un esfuerzo que tiende a cerrar la grieta ...	18
Figura 2.7. Distribución del componente de esfuerzo σ_y en la punta de la grieta.....	22
Figura 2.8. Representación esquemática de la zona plástica en la punta de la grieta.....	23
Figura 2.9. Desplazamiento de abertura en la punta de la grieta, δ	25
Figura 2.10. Placa de ancho finito que contiene una grieta a través del espesor.....	27
Figura 2.11. Placa doblemente agrietada	30
Figura 2.12. Placa con grieta lateral de ancho finito	30
Figura 2.13. Análisis de Newman de coeficientes de factores de intensidad de esfuerzos para una grieta producida en un agujero elíptico sujeta a tensión uniaxial	33
Figura 2.14. Grieta en una viga sujeta a flexión	34
Figura 2.15. Grieta elíptica en un cuerpo infinito sujeta a tensión uniforme	34
Figura 2.16. Grieta semi-elíptica	36
Figura 2.17. Dependencia de los parámetros de la forma de la grieta y la relación de la profundidad / la longitud de la superficie agrietada.	36
Figura 2.18. Idealización del modelo de tipo WOL.....	38
Figura 2.19. Valores de K_I para varias geometrías agrietadas	39
Figura 3.1 Relación esquemática entre esfuerzos, tamaño de grieta, y dureza del material	53
Figura 3.2. Relación tamaño de grieta-esfuerzo para la fractura a través del espesor	54
Figura 3.3. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que tiene un $K_{Ic} = 50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$	56
Figura 3.4. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que tiene un $K_{Ic} = 25 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$	57
Figura 3.5. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que muestra el valor más alto de K_{Ic} ($100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$).....	58
Figura 3.6. Relación esquemática entre esfuerzos. Tamaño de grieta, y dureza del material	59
Figura 3.7. Inestabilidad de la columna e inestabilidad de la grieta.....	61

T A B L A S.

Tabla 2.1. <i>Factor de corrección para placas anchas</i>	28
Tabla 2.2. <i>Factor de corrección para placas con grieta lateral</i>	31
Tabla 2.3 <i>Coeficientes de factor de intensidad de esfuerzos para una viga</i>	31
Tabla 3.1. <i>Valores de tamaño crítico de grieta como función de la resistencia a la fluencia y dureza de la muesca</i>	50
Tabla 4.1. <i>Fuerzas y Momentos permisibles</i>	90
Tabla 4.2. <i>Fuerzas y Momentos resultantes permisibles</i>	90
Tabla 4.3. <i>Fuerzas y momentos permisibles en enfriadores por aire</i>	92
Tabla 4.4. <i>Fuerzas y momentos permisibles en hornos</i>	93

GRÁFICAS.

Gráfica 5.1 . Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	112
Gráfica 5.2 . Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	113
Gráfica 5.3. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	114
Gráfica 5.4. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	116
Gráfica 5.5. Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	117
Gráfica 5.6. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	119
Gráfica 5.7. Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	120
Gráfica 5.8. Valores de K_I al variar la presión. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.	121
Gráfica 5.9. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	123
Gráfica 5.10. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	124
Gráfica 5.11. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	125
Gráfica 5.12. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	127
Gráfica 5.13. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	128
Gráfica 5.14. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	129
Gráfica 5.15. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	131
Gráfica 5.16. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	132
Gráfica 5.17. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	134
Gráfica 5.18. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta . El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{m}$ es la resistencia a la fractura del acero.....	135

RESUMEN

El objetivo central de este trabajo será mostrar algunas aplicaciones posibles de la mecánica de la fractura en el análisis de tuberías de conducción de hidrocarburos. Para ello presentamos algunos antecedentes históricos de la mecánica de fractura, conceptos básicos y planes para el control de fractura.

Presentaremos asimismo una descripción de los parámetros utilizados en la mecánica de la fractura lineal elástica para el análisis de esfuerzos en miembros agrietados. Entre ellos contamos al factor de intensidad de esfuerzo, K , y la tasa de liberación de energía, G . Además hablaremos de los requisitos para la estabilidad de grietas y las condiciones existentes en la punta de la misma.

Se hablará brevemente de los procedimientos de diseño en la mecánica de la fractura por falla terminal, así como se darán algunas recomendaciones para la selección de materiales. Por otro lado se muestran también una interpretación y alcance de las principales normas como son *ASME B31.3*, *ASME B31.4* y *ASME B31*.

Finalmente se presentará un estudio paramétrico de las fórmulas más comunes utilizadas para analizar tuberías agrietadas. El propósito de dicho análisis será mostrar de manera gráfica cual es son los principales parámetros.

Palabras claves: Mecánica de la fractura, Factor de intensidad de esfuerzo, Tasa de liberación de energía, Estabilidad de grietas, Análisis de flexibilidad, Tuberías, Esfuerzos actuantes y permisibles.

ABSTRACT

Some applications of Fracture Mechanics in analyzing hydrocarbon pipelines are shown. Historical backgrounds, basic concepts and plans to control fracture are also shown.

Parameters used in Fracture Mechanics for analyzing stresses in cracked members like stress intensity factor, K , and the energy release rate, G , are described, and it will be explained the requirements for the stability of cracks and the existing conditions in the crack tip.

A brief description of design procedures in Fracture Mechanics due to terminal failure will be give. In the same way some recommendations for selecting materials are given. On the other hand an interpretations and goals of codes are presented, ASME B31.3, ASME B31.4, and ASME B31.8.

Finally, a parametrical study of some formulas used in analyzing cracked pipelines in order to show graphically which are the most important parameters.

Keywords: Fracture Mechanics, stress intensity factor, energy release rate, stability of cracks, flexibility analysis, pipelines, actual stresses, allowable stresses.

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de la gente esta consiente de lo que representa, desde el punto de vista económico, la industria petrolera para nuestro país, además todos nos beneficiamos de manera directa o indirecta de los productos que del petróleo se obtienen. Pero la mayoría desconoce cuáles son los procesos que se llevan a cabo en esa industria, en ellos podemos distinguir tres etapas fundamentales: 1) producción, 2) distribución (o venta) y 3) procesamiento o refinación. Y entre cada una de éstas existen algunas etapas menos generales como son: separación de gas, aceite y agua, etc. Obviamente el proceso no es tan simple; esto debido a que cada unas de las etapas están relacionadas unas con otras ya que para pasar de una etapa a otra es necesario transportar la materia prima (petróleo u otros subproductos), lo cual se hace por lo general a través de tuberías o ductos los que a su vez pueden transportar los más diversos productos como por ejemplo: aceite, gas, gasolina y diesel, etc. También existen tuberías que pueden conducir diferentes tipos de productos a diferentes tiempos.

Las tuberías o líneas de conducción o simplemente ductos, son las uniones entre los diferentes sistemas, ya sea al interior de una planta o la unión entre ellas y también es el medio más seguro para transportar los productos finales a los diferentes centros de distribución ya sea en México o en cualquier otro país. Para diferenciar a cada una de las líneas de conducción, dependiendo del producto que transportan, se les asignan los nombres: oleoductos, gasoductos, oleogasoductos, gasolinoductos, amonioductos, y cuando transportan diversos materiales se denominan poliductos. Como pueden darnos cuenta éstos son *las venas* de distribución de los productos de la industria petrolera. De acuerdo a lo anterior sobra decir la importancia que tienen.

Debido a que las tuberías no son sistemas aislados, éstas están expuestas a todo tipo de daño ya sea causado por el medio ambiente (por ejemplo corrosión,) o por algún tipo de accidente (por ejemplo golpes, excavaciones, etc.) los cuales harán que se presenten fisuras o grietas las cuales pueden variar desde muy pequeñas o micro grietas hasta un tamaño detectable a simple vista. Cuando algunas de estas grietas crecen hasta alcanzar el tamaño crítico se presentará la falla en la línea de conducción, lo que trae consigo varias consecuencias; tomemos como ejemplo una línea de conducción de aceite, si ésta falla se pueden presentar paros en las plantas que están conectadas con dicha línea con la consecuente pérdida económica que esto significa, además debemos tomar en cuenta el desastre ecológico que esto puede significar, pero mas importante aún es que pueden presentarse pérdidas de vidas humanas. Debido a lo anterior resulta obvio la importancia de contar con un método que sea capaz de prevenir, cuando es posible tales desgracias, o en su defecto poder entender las causas del accidente.

La mecánica de la fractura es un método que sirve para evaluar las condiciones existentes en un sistema agrietado. Es decir, con él podemos saber si una grieta existente puede resistir las cargas de trabajo a las que está sujeta, pudiéndonos servir como criterio para la reparación o remoción de la pieza.

El objetivo central de este trabajo será mostrar algunas aplicaciones posibles de la mecánica de la fractura en el análisis de tuberías de conducción de hidrocarburos. Para ello presentamos en el segundo capítulo, algunos antecedentes históricos de la mecánica de fractura, conceptos básicos y planes de control de fractura. Además se presenta una descripción más detallada de los parámetros utilizados en la mecánica de la fractura lineal elástica para el análisis de esfuerzos en miembros agrietados. Entre ellos contamos al factor de intensidad de esfuerzo, K , y la tasa de liberación de energía G , así como la relación entre ambos. Además hablamos de las condiciones para la estabilidad de grietas, y las condiciones existentes en la punta de la grieta. Al final de éste se da una pequeña compilación de las fórmulas más comunes.

Los procedimientos de diseño en la mecánica de la fractura por falla terminal y la selección de materiales para el diseño se presentan en el capítulo tres, mediante la descripción de cómo la mecánica de la fractura puede ayudar al ingeniero en la selección inicial de materiales, niveles de esfuerzos y tamaño de grieta tolerable para el control de calidad o inspección.

Se presenta en el capítulo cuatro la interpretación y alcances de las principales normas como son *ASME B31.3*, *ASME B31.4* y *ASME B31.8*, así como el cálculo de los esfuerzos actuantes y permisibles de cada una de éstas, también se presentan las fuerzas y momentos permisibles de algunos de los principales equipos como por ejemplo compresores, bombas etc.

El capítulo cinco está dedicado a desarrollar un estudio paramétrico de las formulas más comunes utilizadas para analizar tuberías agrietadas, el propósito de dicho análisis es mostrar de manera gráfica cuáles son los principales parámetros en dichas ecuaciones, para poder sensibilizar al ingeniero que trabaja con elementos agrietados y tome las precauciones necesarias en cada caso.

Por último en el capítulo seis se dan las conclusiones y las posibles perspectiva de desarrollo en la misma línea de trabajo.

2. ANÁLISIS DE ESFUERZOS PARA MIEMBROS CON GRIETAS.

2.1. ANTECEDENTES.

La fractura es un problema que la humanidad a encarado hace ya mucho tiempo, se puede decir desde que el hombre a creado sus propias estructuras y herramientas. Actualmente el problema tiene consecuencias más graves que hace mucho tiempo, ya que debido al complejo mundo tecnológico en que vivimos la falla de una estructura puede significar un gran número de pérdidas humanas o económicas, en contraste con lo que pudo haber ocurrido siglos atrás. Muchos de nosotros hemos sufrido problemas de fractura sin darnos cuenta de ello, por ejemplo, es muy común que al estar cenando, o lavando, repentinamente un plato o vaso se parta o rompa sin razón aparente, obviamente para una persona que desconoce el problema de la fractura no encontrará una explicación al fenómeno, por otro lado alguien que conoce del tema puede sospechar que la pieza pudo haber tenido una pequeña grieta,

imperceptible a simple vista, la cual creció hasta provocar la falla, debido posiblemente al incremento de la temperatura o a un golpe accidental.

A lo largo de la historia han existido muchas e importante catástrofes provocadas por grietas o fisuras, como por ejemplo los buques Libertad de la segunda guerra mundial los cuales fallaron debido a los cambios en los procesos de construcción, ya que en un principio sus cascos se construían completamente utilizando remaches lo cual resultaba muy lento para la demanda que la guerra exigía, por lo que optaron cambiarlos por cascos completamente soldados provocando con ello altas concentraciones de esfuerzos en algunas piezas soldadas lo que provocaba que las micro grietas crecieran hasta provocar la falla. Los tanques T-2 sufrieron problemas similares.

A mediados de los años cincuenta dos aeronaves Cometa fallaron durante el vuelo. Una exhaustiva investigación indicó que las fallas se iniciaron por grietas muy pequeñas provocadas por fatiga en los agujeros de los remaches utilizados en el fuselaje. En este momento resulta conveniente dar una definición simplista de lo que significa la fractura: entendemos por fractura la separación de las moléculas de un material que inicialmente era continuo haciendo que éste presente fisuras, o en casos más graves la separación de uno o más partes del mismo pudiendo llegar a ocasionar la falla de la estructura.

Por los motivos antes mencionados fue necesario desarrollar un método que fuera capaz de analizar estos tipos de problemas, dicho método se le conoce como mecánica de la fractura y su propósito fundamental es poder describir de manera sencilla dicho fenómeno, de tal manera que el especialista en fractura cuente con fórmulas y procedimientos para poder analizarlo.

La mecánica de la fractura es un área de la mecánica de sólidos que abarca un gran número de condiciones de carga y tipos de materiales, pero de manera muy general podemos decir que se divide en dos categorías, lineal elástica y elasto-plástica.

2.2. MECÁNICA DE LA FRACTURA LINEAL ELÁSTICA.

La mecánica de la fractura lineal elástica se aplica a materiales que presentan una relación esfuerzo-deformación lineal, y es un método analítico que relaciona la magnitud y distribución de los esfuerzos alrededor de la punta de la grieta como función de los esfuerzos aplicados, tamaño, forma, orientación de la grieta y propiedades de los materiales, además de unos parámetros llamados factores de intensidad de esfuerzos. Estos últimos, denotados como, son considerados como factores de escala que toman en cuenta la alteración que sufren los esfuerzos en la punta de la grieta, debido a la presencia de ésta. La importancia de K es que estos describen el campo de esfuerzos en la cercanía de la grieta, y no solamente el mayor de ellos; como en el **caso de los factores de concentración de esfuerzos**, además cuando uno alcanza el valor crítico, K_c , la extensión de la grieta es inminente y por lo tanto, también se consideran como el parámetro que describe el nivel de resistencia del material.

Para establecer métodos de análisis de esfuerzos para grietas en sólidos elásticos, es conveniente suponer tres tipos de movimientos relativos elementales de las dos superficies de la grieta, relacionados con los modos de carga, mostrados en la figura 2.1. Estos modos de desplazamiento representan la deformación local en un elemento infinitesimal que contiene un frente de grieta.

El Modo I o modo de abertura, en donde la carga principal es aplicada de manera normal al plano de la grieta, se caracteriza por desplazamientos locales simétricos con respecto al plano x - y y x - z . Las dos superficies de la grieta se desplazan en direcciones opuestas una con respecto a la otra.

El Modo II o modo de cortante plano, cuyas caras de la grieta son simétricas con respecto al plano x - y y antisimétrica con respecto al plano x - z . Las dos superficies de la grieta se deslizan una encima de la otra en una dirección perpendicular al frente de la grieta.

El Modo III o modo de cortante antiplano, es asociado con desplazamientos locales que son antisimétricos con respecto a ambos planos x - y y x - z . Las dos superficies de la grieta se deslizan una encima de la otra en dirección paralela a la línea del frente de la grieta.

Cada uno de estos modos de deformación corresponde a un tipo básico de campo de esfuerzo en la cercanía del extremo de la grieta.

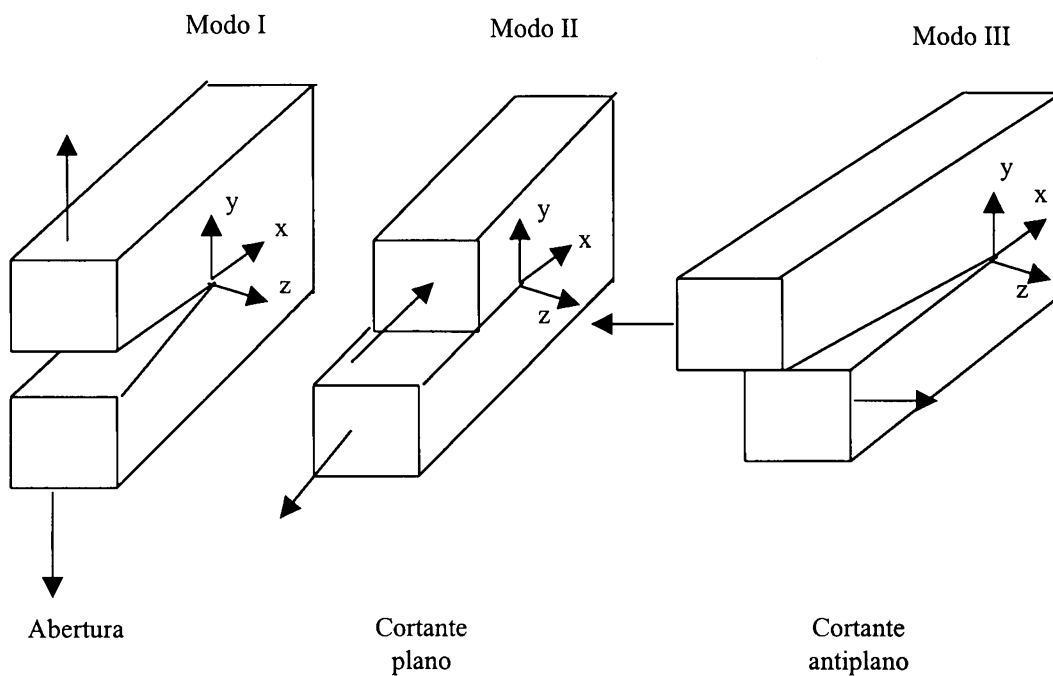


Figura 2.1. Modos de carga elementales que se pueden aplicar a una grieta

Un cuerpo agrietado puede estar sujeto a uno de estos modos de carga o a una combinación de ellos, pero generalmente el modo que domina la fractura es el Modo I o alguna combinación que puede modelarse muy bien con este modo. Empleando un método desarrollado por Westergaard¹, Irwin² encontró que el campo de esfuerzo y desplazamiento en la cercanía del extremo de la grieta sujeto a los tres modos de deformación están dados por:

Modo I:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \sigma_y &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_I}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
 \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \\
 u &= \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 v &= \frac{K_I}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu - \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 w &= 0
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

Modo II:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \sigma_y &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\
 \tau_{xy} &= \frac{K_{II}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\
 \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y), \quad \tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \\
 u &= \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 v &= \frac{K_{II}}{G} \left[\frac{r}{2\pi} \right]^{1/2} \cos \frac{\theta}{2} \left[-1 + 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2} \right] \\
 w &= 0
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Modo III:

$$\begin{aligned}
 \tau_{xy} &= -\frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \sin \frac{\theta}{2} \\
 \tau_{yz} &= \frac{K_{III}}{(2\pi r)^{1/2}} \cos \frac{\theta}{2} \\
 \sigma_x &= \sigma_y = \sigma_z = \tau_{xy} = 0 \\
 w &= \frac{K_{III}}{G} \left[\frac{2r}{\pi} \right]^{1/2} \sin \frac{\theta}{2} \\
 u &= v = 0
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Donde las componentes de esfuerzos y las coordenadas r y θ son mostradas en la figura 2.2; u , v y w son los desplazamientos en la dirección x , y y z , respectivamente; ν es la relación de Poisson; y G es el módulo de elasticidad al corte.

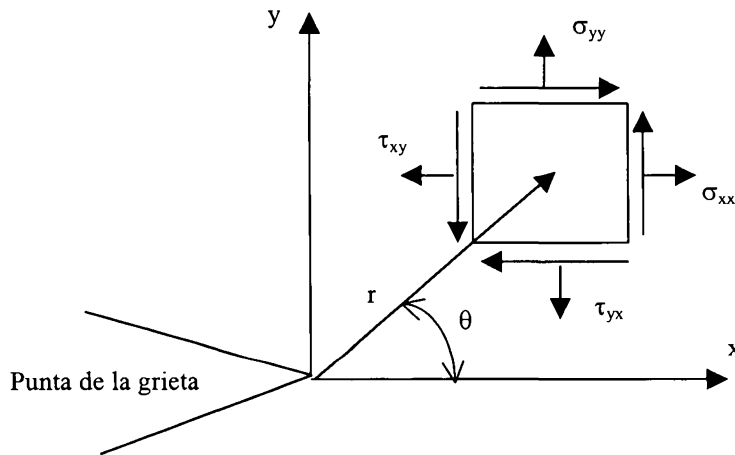


Figura 2.2. Definición de los ejes coordenados delante de la punta de la grieta. La dirección z es normal al dibujo.

Las ecuaciones 2.1 y 2.2 representan el caso de deformación plana ($w=0$) y despreciando los términos de orden superior en r . Debido a lo cual, estas ecuaciones son exactas cuando r se aproxima a cero la cual es una buena aproximación en la región donde r es pequeño comparado con otras dimensiones en el plano x - y . Estas ecuaciones demuestran que la distribución del campo de esfuerzo elástico y el campo de deformación en la cercanía del extremo de la grieta dependen del modo de carga y son independientes de las propiedades del material, es decir no varían para todas las estructuras sujetas al mismo modo de deformación y, la magnitud del campo del esfuerzo elástico puede describirse con un sólo parámetro, K_I , K_{II} , o K_{III} , que corresponden a los Modos I, II, III respectivamente. En otras palabras, el esfuerzo aplicado, la forma, tamaño de la grieta, y la configuración estructural asociada con los componentes estructurales sujetos a un cierto modo de deformación afecta el valor del factor de intensidad de esfuerzo pero no altera la distribución del campo de esfuerzo.

Análisis dimensionales de las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 indican que el factor de intensidad de esfuerzo debe relacionarse linealmente con el esfuerzo y directamente a la raíz cuadrada de una longitud característica. Basado en el análisis original de Griffith³ de especímenes de vidrio con grietas y la subsecuente extensión de ese trabajo a materiales más dúctiles, la longitud característica en un miembro estructural es la longitud de la grieta. Consecuentemente, la magnitud del factor de intensidad de esfuerzo debe relacionarse directamente a la magnitud del esfuerzo nominal aplicado, σ , y a la raíz cuadrada de la longitud de la grieta, a . En todos los casos, la forma general del factor de intensidad de esfuerzo esta dada por:

$$K = f(g) * \sigma * \sqrt{a} \quad (2.4)$$

Donde $f(g)$ es una función que depende de la muestra y la geometría de la grieta, ésta debe estar sujeta a extensas investigaciones y estudios. Afortunadamente varias relaciones entre el factor de intensidad de esfuerzo y varias configuraciones de cuerpos, tamaño de la grieta, orientación, forma y condiciones de carga están publicadas^{4, 5} y algunas de las más comunes son presentadas al final de este capítulo.

2.2.1. La tasa de energía liberada.

En 1956 Irwin⁶ propuso un método alternativo, muy parecido al de Griffith, pero de más fácil aplicación que este último. Irwin definió *una tasa de liberación de energía G*, como una medida para evaluar la energía disponible (o tasa de cambio en la energía debido a la presencia de una grieta) para un incremento del tamaño de la grieta.

$$G = - \frac{d\Pi}{dA} \quad (2.5)$$

G también se conoce como *fuerza para la extensión de la grieta o fuerza que provoca el agrietamiento*.

Según Anderson⁷, vemos que para placas anchas bajo esfuerzos planos y con una longitud de grieta = 2a, el valor de *G* es:

$$G = - \frac{\pi \sigma^2 a}{E} \quad (2.6)$$

la grieta comienza a crecer cuando *G* alcanza un valor crítico (Anderson¹¹)

$$G_c = - \frac{dW_s}{dA} = 2w_f \quad (2.7)$$

por lo tanto *G_c* es la resistencia que el material tiene para no fracturarse y *w_f* es la energía de la fractura. Es importante conocer que el valor de *G* definido en la ecuación 2.5 es independiente del tipo de sollicitación a la que este sujeto el cuerpo, es decir obtenemos los mismos resultados si el cuerpo esta sujeto a una carga conocida previamente o si esta sujeto a un desplazamiento también conocido previamente.

2.2.2. Condición de estabilidad en grietas.

Otro concepto que es importante dentro del fenómeno de la fractura es conocer si el comportamiento de la grieta bajo unas condiciones de carga dadas será estable o inestable. Como sabemos la condición para que una grieta crezca es que $G = 2w_f$, por conveniencia reemplazaremos a $2w_f$ por R , que es igual a la resistencia que el material presenta contra el agrietamiento. Una gráfica en el cual se compara a R con la extensión de la grieta se le conoce como *curva de resistencia* o *curva R* ; y la curva de G comparada con el mismo crecimiento de la grieta se le conoce como *curva de la fuerza que causa la fractura*.

Considérese la figura 2.3, en ella se muestra las gráficas para R y G superpuestas, en la primera se considera que el comportamiento de R con el crecimiento en el tamaño de la grieta es constante, es decir la gráfica R es “plana”, la energía de la fractura permanece constante. En cambio en la figura 2.3b observamos que el valor de R aumenta conforme el tamaño de la grieta también lo hace, por lo que R es “creciente”, o lo que es lo mismo, la energía de la fractura aumenta. En la figura 2.3a suponemos que la longitud inicial de la grieta es a_0 , cuando nosotros le aplicamos un esfuerzo σ_1 que es menor que σ_c la grieta no crece (no hay fractura) y, para este caso, decimos que la grieta es estable, ya que aún y cuando σ_1 sigue aumentando, como se ve en la gráfica, éste permanece por debajo del valor constante de σ_c .

Por otro lado si aplicamos un esfuerzo σ_2 como el que se muestra en la gráfica, la fractura se presentará cuando σ_2 alcance el valor de σ_c , pero el crecimiento de la grieta será inestable ya que el esfuerzo σ_2 continuará aumentando mientras que el valor de R permanece constante aún cuando la grieta ha aumentado su tamaño.

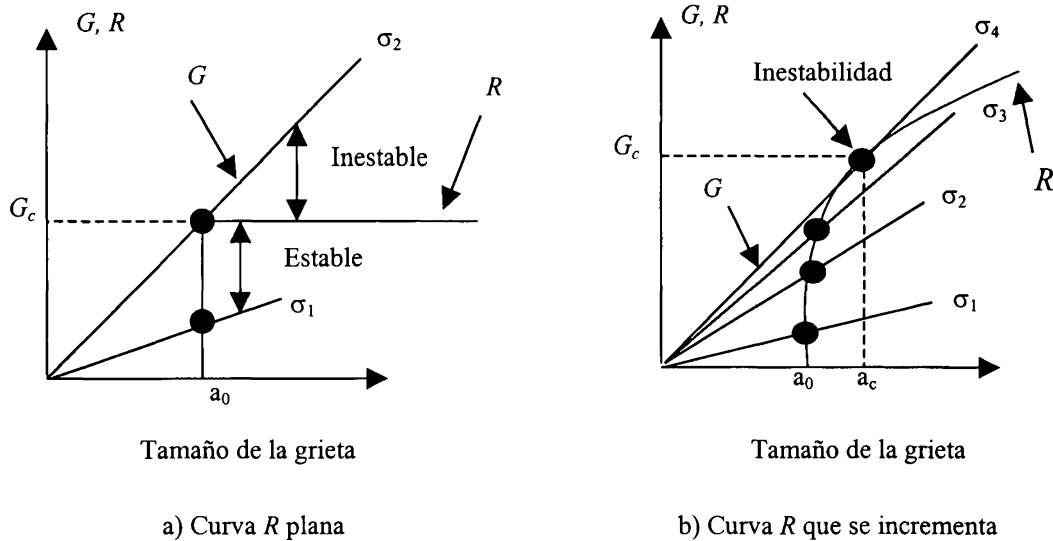


Figura 2.3. Diagrama esquemático de la fuerza causante G / curva R

Ahora consideremos a la figura 2.3b, la grieta crecerá un poco cuando el esfuerzo alcance el valor de σ_2 , pero ésta no seguirá creciendo a menos que el esfuerzo se incremente, observe que si el esfuerzo se comporta como lo hace σ_2 , la fuerza que provocará la fractura se incrementa más lentamente que como lo hace la resistencia del material. Aún y cuando el esfuerzo aumenta hasta σ_3 , el crecimiento de la grieta seguirá siendo estable, ya que nuevamente el crecimiento de G es más lento que el de R . Finalmente cuando el esfuerzo alcance el valor de σ_4 , provocará que la grieta sea inestable, ya que el valor de la fuerza causante de la falla, G , será tangente a la curva de la resistencia de material, es decir que el esfuerzo siempre tendrá un valor mayor que la resistencia del material.

Matemáticamente, la condición para una grieta estable puede escribirse como (Anderson¹¹):

$$G = R \quad (2.8)$$

y

$$\frac{dG}{da} \leq \frac{dR}{da} \quad (2.9)$$

Y un crecimiento inestable de la grieta estará dado por:

$$\frac{dG}{da} > \frac{dR}{da} \quad (2.10)$$

Cuando la curva de resistencia, R , es plana podemos definir sin ambigüedad un valor de G_c , pero un material con una curva R creciente no puede ser caracterizado por un sólo parámetro G_c . Materiales con una curva R creciente pueden caracterizarse por el valor G cuando comienza el incremento en el tamaño de la grieta. Aún y cuando la resistencia del material, G , para este punto es insensible a la geometría del sistema, hay otros factores que hacen difícil identificarlo, ya que es virtualmente imposible determinar el momento preciso cuando la grieta comienza a crecer; sin embargo podemos utilizar una definición parecida a la que se utiliza en ingeniería para determinar el esfuerzo de fluencia de un material. Otra limitación del punto que caracteriza la resistencia al momento de iniciarse la fractura es que éste sólo nos da el punto en que la grieta comienza a crecer y no nos proporciona ninguna información acerca de la forma de la curva R .

Generalmente un material frágil posee una curva R plana, y un material dúctil, como el acero, tiene una curva creciente.

2.2.3. Efecto de un ancho finito sobre la distribución de esfuerzos en la placa.

Para que los factores de intensidad de esfuerzos sean de utilidad, ellos deben de relacionarse con el comportamiento global del sistema; hay muchas soluciones disponibles para una gran variedad de problemas en los cuales los factores de intensidad son funciones del tamaño de la grieta así como también de los esfuerzos aplicados a distancia, incluso para los

casos en los cuales las soluciones son difíciles de encontrar de manera analítica, éstas pueden ser halladas utilizando métodos numéricos.

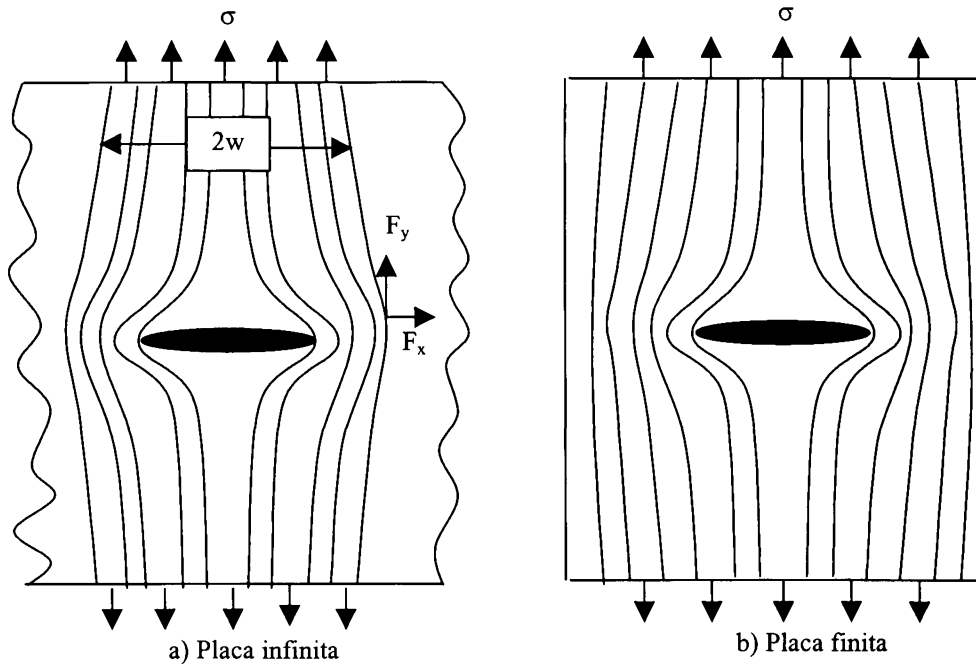


Figura 2.4. Efectos en la concentración de esfuerzos, para una placa con ancho finito y ancho infinito, debido a una grieta que atraviesa toda la placa.

En la mayoría de las concentraciones para las cuales existe una solución para K , éstas son dadas para grietas dentro de placas de tamaño infinito, o dicho de otra forma, las dimensiones de la grieta son pequeñas comparadas con las de la placa, y las condiciones de la punta de la grieta no se ven influenciadas por las fronteras externas, ver fórmula 2.11a.

$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \quad (2.11a)$$

Cuando se incrementa el tamaño de la grieta o cuando las dimensiones de la placa decrecen, las fronteras externas comienzan a influenciar las condiciones en la punta de la grieta. En dichos casos no es posible obtener una solución exacta para los factores de intensidad de esfuerzos. Considere una placa sujeta a unos esfuerzos de tensión remotos. La

figura 2.4 ilustra esquemáticamente el efecto que un ancho finito tiene sobre la distribución de esfuerzos en la punta de la grieta, la cual se muestra mediante líneas de fuerza, los esfuerzos locales son proporcionales a la separación entre líneas. Como un esfuerzo de tensión no puede ser transmitido a través de una grieta, las líneas de fuerzas se distribuyen alrededor de la misma, resultando en una concentración de los esfuerzos locales. En una placa infinita, las líneas de fuerza a una distancia W del centro de la grieta tiene componentes de fuerzas sobre los ejes x y y , si el ancho de la placa se restringe a $2w$, la fuerza en la dirección x debe ser igual cero, ya que éste es un borde libre; esta condición de frontera causa que las líneas de fuerza se compriman, lo cual resulta en una alta intensificación de los esfuerzos en la punta de la grieta.

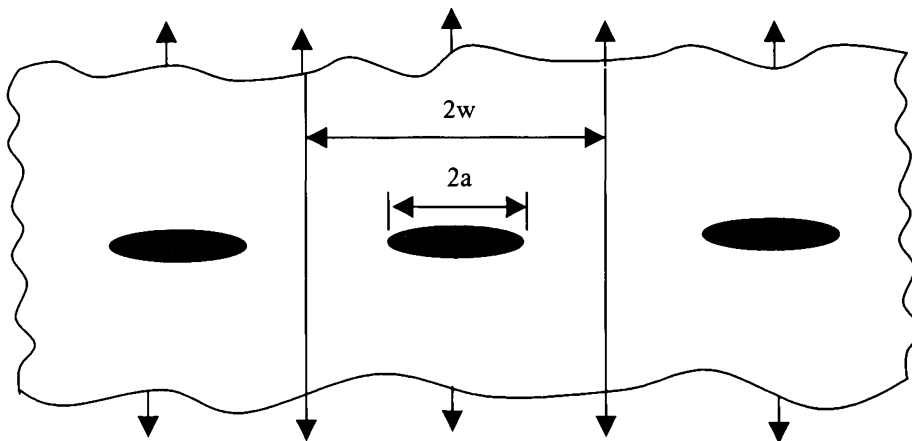


Figura 2.5. Grietas colineales en una placa infinita sujeta a tensión remota.

Una de las técnicas usadas para aproximar las soluciones para anchos de placa finitos, es suponer un arreglo periódico de grietas colineales dentro de una placa infinita, ver figura 2.5.

El factor de intensidad de esfuerzos para el Modo I para este tipo de problemas es (Anderson¹¹):

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \left[\frac{2w}{\pi a} \tan\left(\frac{\pi a}{2w}\right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.11b)$$

El valor del factor de intensidad de esfuerzos se aproxima al de una placa infinita cuando a/W se aproxima a cero; K_I es asintótico a $a/W = 1$. Se pueden obtener soluciones más exactas utilizando la técnica del elemento finito, pero dichas soluciones son del tipo polinomial.

Aunque las soluciones para los factores de intensidad de esfuerzos son dadas en una variedad de formas, K siempre está relacionado con el ancho de la grieta mediante un factor de corrección apropiado.

$$K_{(I,II,III)} = C \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.12)$$

Donde σ es el esfuerzo característico, a es la dimensión característica de la grieta y C es una constante adimensional que depende de la geometría y del modo de carga.

2.2.4. Relación entre K y G .

Aunque la tasa de energía liberada, G , describe el comportamiento global del sistema, mientras que K es un parámetro que describe el comportamiento local en el punto de una grieta, para un material elástico lineal, K y G están relacionados de manera única. Irwin realizó un análisis sobre una grieta que se cierra para encontrar una relación entre K y G .

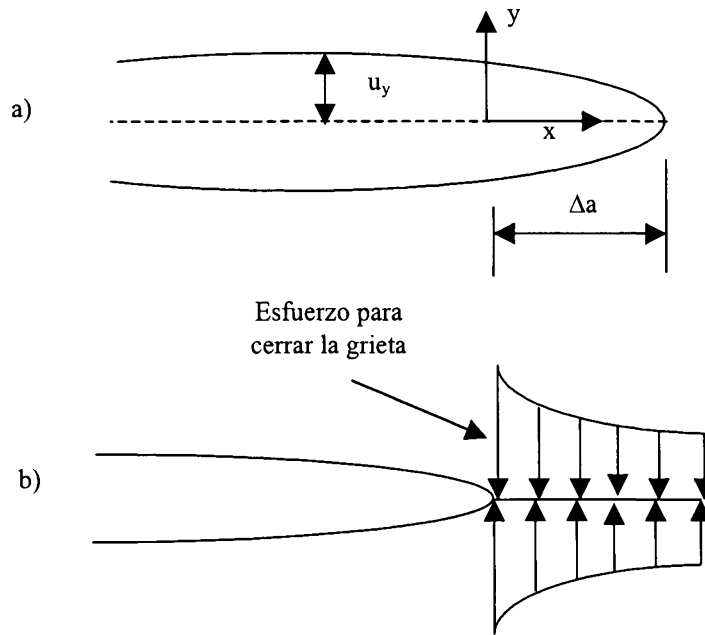


Figura 2.6. Acortamiento Δa en la grieta debido a la aplicación de un esfuerzo que tiende a cerrar la grieta.

Considere una grieta con una longitud inicial $a + \Delta a$ sujeta a un modo de carga Tipo I, como se ve en la figura 2.6a. Para este caso es conveniente colocar el origen de coordenadas a una distancia Δa detrás de la punta de la grieta, además supongamos que la placa tiene un espesor uniforme. Ahora apliquemos un campo de esfuerzos en compresión sobre las caras de la grieta entre los puntos $x = 0$ y $x = \Delta a$ con una magnitud suficiente para cerrarla en esta región. El trabajo requerido para cerrar la grieta en su punta se relaciona con la tasa de energía liberada mediante (Anderson¹¹):

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta U}{\Delta a} \right)_{\text{carga fija}} \quad (2.13)$$

en el cual ΔU es el trabajo cuando la grieta se cierra, y es igual a la suma de las contribuciones al trabajo desde $x = 0$ hasta Δa :

$$\Delta U = \int_{x=0}^{x=a} dU(x) \quad (2.14)$$

y el incremento en el trabajo en x es igual al área bajo la curva fuerza-desplazamiento (Anderson¹¹):

$$dU(x) = 2 * \frac{1}{2} F_Y(x) u_Y(x) = \sigma_{YY}(x) u_Y(x) dx \quad (2.15)$$

El factor de 2 aplicado a la ecuación anterior se debe a que hay dos caras en la grieta, las cuales se desplazan una cantidad $u_Y(x)$. El desplazamiento para la abertura de la grieta, u_Y , para el Modo I, es igual (Anderson¹¹):

$$u_Y = \frac{(k+1)K_I(a+\Delta a)}{\mu} \sqrt{\frac{\Delta a - x}{x}} \quad (2.16)$$

donde $K_I(a + \Delta a)$ denota el factor de intensidad de esfuerzos en la punta de la grieta original.

El esfuerzo normal requerido para cerrar la grieta está relacionado con K_I para la grieta acortada (Anderson¹¹):

$$\sigma_{YY} = \frac{K_I(a)}{\sqrt{2\pi x}} \quad (2.17)$$

combinando las ecuaciones 2.13 y 2.17, tenemos (Anderson¹¹):

$$G = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{(k+1)K_I(a)K_I(a+\Delta a)}{4\pi\mu\Delta a} \int_0^{\Delta a} \sqrt{\frac{\Delta a - x}{x}} dx = \frac{(k+1)K_I^2}{8\mu} = \frac{K_I^2}{E'} \quad (2.18)$$

donde E' es igual a:

$$E' = E \text{ para esfuerzos planos} \quad (2.19a)$$

y

$$E' = \frac{E}{(1-\nu^2)} \text{ para deformaciones planas} \quad (2.19b)$$

Así la ecuación 2.18 nos da la relación existente entre la tasa de liberación de energía y los factores de intensidad de esfuerzos, para un material elástico lineal. Cuando los tres modos de carga están presentes, la tasa de liberación de energía está dada por (Anderson¹¹):

$$G = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{K_{II}^2}{E'} + \frac{K_{III}^2}{2\mu} \quad (2.20)$$

Las contribuciones a G debido a los tres modos son aditivos debido a que la tasa de liberación de energía, tal como la energía, son cantidades escalares.

2.3. DEFORMACIÓN DEL EXTREMO DE LA GRIETA.

Las ecuaciones para el campo de esfuerzos, ecuación 2.1, 2.2, y 2.3, muestran que el esfuerzo elástico en la cercanía del extremo de la grieta donde $r \ll a$ puede ser muy grande.

En realidad, tales magnitudes de esfuerzo no ocurren porque el material en esta región sufre deformaciones plásticas, así se crea una zona plástica que rodea el extremo de la grieta. La figura 2.7 es una representación esquemática del cambio en la distribución de la componente y del esfuerzo causado por deformaciones plásticas localizadas en la cercanía del extremo de la grieta.

El tamaño de la zona plástica, r_y , puede ser estimado de las ecuaciones del campo de esfuerzo tratando el problema como uno de esfuerzo plano y haciendo que la componente y del esfuerzo, σ_y , sea igual al valor del esfuerzo de fluencia σ_{ys} , lo que resulta en⁸:

$$r_y = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.21)$$

Irwin⁹ sugiere que el tamaño de la zona plástica bajo condiciones de deformación plana puede ser obtenido considerando el aumento en el esfuerzo de tensión por fluencia plástica causada por una restricción de deformación plana en el rango elástico. Con estas condiciones, la resistencia a la fluencia presenta un incremento estimado por un factor de $\sqrt{3}$. Consecuentemente, el tamaño de la zona plástica en deformación plana es:

$$r_y = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2.22)$$

La zona plástica a lo largo del frente de grieta en un espécimen grueso está sujeta a condiciones de deformación plana en la parte central donde $w = 0$, y en condiciones de esfuerzo plano cerca de la superficie del mismo donde $\sigma_z = 0$.

Consecuentemente, las ecuaciones 2.21 y 2.22 indican que la zona plástica en el centro de una muestra gruesa es más pequeña que en la superficie de la misma.

Una representación esquemática de la variación del tamaño de la zona plástica a lo largo de una grieta en un espécimen grueso es mostrada en la figura 2.8.

McClintock y Hult¹⁰ investigaron los efectos de zonas plásticas pequeñas sobre el campo de distribución de esfuerzo en un material elásto-plástico perfecto que está sujeto a la deformación del Modo III. Sus resultados mostraron que la distribución de esfuerzos elásticos en la cercanía de la zona plástica era idéntica a la distribución de esfuerzos elásticos en la cercanía de una grieta de un material elástico perfecto cuya punta era situada en el centro de la

zona plástica. Irwin¹⁵ sugirió que los efectos de zonas plásticas pequeñas corresponden a un aparente aumento en la longitud de la grieta por un incremento igual a r_s . Este factor de corrección de zona plástica es válido para tamaños pequeños de zonas plásticas y no debe ser aplicado donde ocurren deformaciones plásticas grandes.

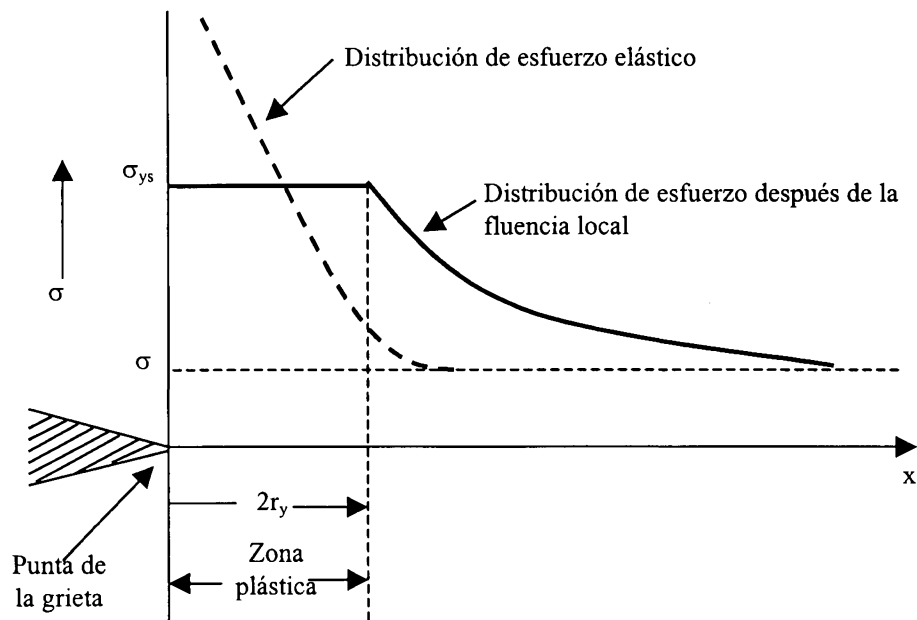


Figura 2.7. Distribución del componente de esfuerzo σ_y en la punta de la grieta.

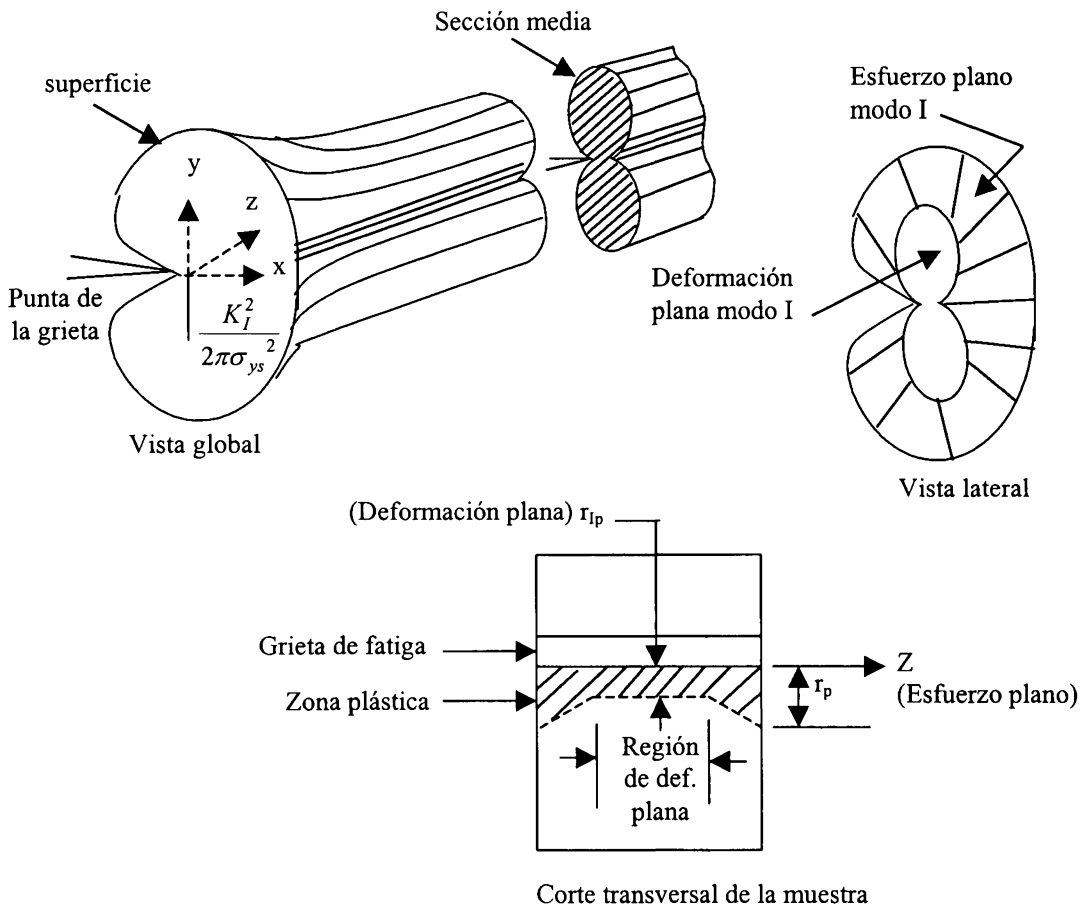


Figura 2.8. Representación esquemática de la zona plástica en la punta de la grieta.

2.4. SUPERPOSICIÓN DE LOS FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.

Los elementos que contienen grietas pueden estar sujetos a uno o más tipos diferentes de cargas que la del Modo I, como por ejemplo carga de tensión uniforme, carga de tensión concentrada o carga de flexión. Las distribuciones del campo de esfuerzo en la cercanía del extremo de la grieta que están sujetas a estas cargas son idénticas y son representadas por la

ecuación 2.1. Consecuentemente, el factor de intensidad de esfuerzo puede obtenerse por suma algebraica de los factores de intensidad de esfuerzo que corresponden a cada carga. Sin embargo, algunos elementos pueden estar sometidos a cargas que corresponden a varios modos de deformación. Debido a que la distribución del campo de esfuerzo en la cercanía de una grieta, ecuaciones 2.1, 2.2, y 2.3, son diferentes para diferentes modos de deformación los factores de intensidad de esfuerzo no pueden sumarse. Sin embargo, el rango total de energía liberada, G , a diferencia del factor de intensidad de esfuerzo, si puede calcularse por suma algebraica de la energía liberada para cada uno de los modos de deformación.

2.5. DESPLAZAMIENTO DE ABERTURA EN LA PUNTA DE LA GRIETA (COD).

Los esfuerzos a tensión aplicados a un cuerpo que contiene una grieta causa un desplazamiento de la superficie agrietada. El desplazamiento de abertura en la punta de la grieta, δ , en el extremo de la grieta está dado por¹⁶:

$$\delta = \frac{K_I}{E\sigma_{ys}} = \frac{G}{\sigma_{ys}} \quad (2.23)$$

Irwin¹⁶ observó que esta relación lineal entre el desplazamiento de abertura de la grieta, δ , en el extremo de la grieta y la relación de la tasa de energía liberada con respecto al esfuerzo de fluencia, G/σ_{ys} es aplicable incluso cuando el esfuerzo en la sección neta se aproxima al esfuerzo de fluencia del material.

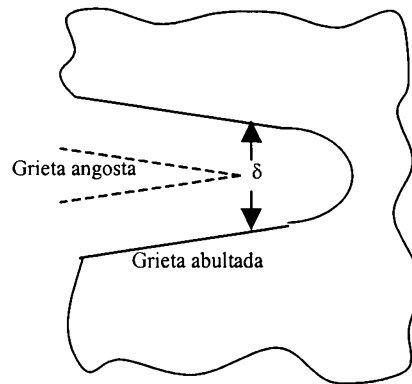


Figura 2.9. Desplazamiento de abertura en la punta de la grieta, δ .

2.6. ECUACIONES DE LOS FACTORES DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.

Las ecuaciones de los factores de intensidad de esfuerzos para las muestras geométricas básicas más comunes, que se sujetan a deformaciones de Modo I son presentadas en esta sección. Debido a que el Modo I es el más factible de presentarse en un espécimen sujeto a una condición general de carga.

Varias ecuaciones de los factores de intensidad de esfuerzo para varias configuraciones y condiciones de carga están disponibles en forma tabular ^{8, 9}.

2.6.1. Grieta a través del espesor.

La ecuación del factor de intensidad de esfuerzo para una placa infinita sujeta a tensión de esfuerzo uniforme, σ^∞ , que contiene una grieta a través del espesor, de $2a$ de longitud, ver la figura 2.4a, es :

$$K_I = \sigma^\infty \sqrt{\pi a} \quad (2.24)$$

EL factor de corrección tangente tiene la forma de:

$$\left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right)^{1/2} \quad (2.25)$$

y es empleado para placas de ancho finito, b , sujetas a la misma condición de carga.

Consecuentemente, el factor de intensidad de esfuerzo para placas de ancho finito $2b$ que está sujeta a esfuerzo de tensión uniforme, σ^∞ , y que contiene una grieta a través del espesor, de $2a$ de longitud, ver la figura 2.10, es:

$$K_I = \sigma \left[\pi a \left(\frac{2b}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2b} \right) \right]^{1/2} \quad (2.26)$$

el valor para el factor de corrección tangente para varias proporciones de longitud en grietas para placas anchas está dado por la tabla 2.1.

2.6.2. Placa doblemente agrietada.

El factor de intensidad de esfuerzo para placas doblemente agrietadas y que está sujeta a esfuerzo de tensión uniforme, ver la figura 2.11, está dado por:

$$K_I = 1.12 \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2.27)$$

Donde la constante 1.12 represente un factor de corrección por superficie libre para la grieta de borde que es perpendicular al esfuerzo de tensión aplicado.

El factor de corrección tangente, ecuación 2.25, puede emplearse para obtener una buena estimación del factor de intensidad de esfuerzo para un espécimen doblemente agrietado que tienen un ancho finito, b .

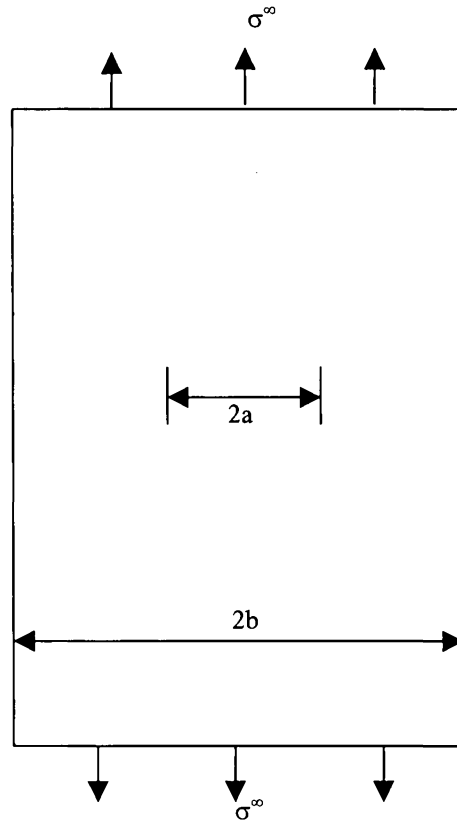


Figura 2.10. Placa de ancho finito que contiene una grieta a través del espesor.

a/b	$[2b / \pi a * \tan \pi a / 2b]^{1/2}$
0.074	1.00
0.207	1.02
0.275	1.03
0.337	1.05
0.410	1.08
0.466	1.11
0.535	1.15
0.592	1.20

Tabla 2.1. Factor de corrección para placas anchas.

Sin embargo, una solución más exacta está disponible en la literatura, la que incorpora los efectos de la longitud de la muestra con relación al ancho del mismo y el decaimiento del factor de corrección por superficie libre como una relación de la longitud de la grieta con respecto al incremento del ancho de la muestra.

2.6.3. Placa con grieta lateral.

La ecuación del factor de intensidad de esfuerzo para una placa con grieta lateral de ancho semi-infinito, ver la figura 2.12, está dada por la ecuación 2.27. Además, los factores de corrección empleados para calcular el factor de intensidad de esfuerzo para una placa doblemente agrietada de ancho finito pueden usarse para calcular el factor de intensidad de esfuerzo para placas con grieta lateral y de ancho finito. Sin embargo, un factor de corrección adicional es necesario para tomar en cuenta los esfuerzos de flexión causados por falta de simetría en la placa con grieta lateral.

La ecuación del factor de intensidad de esfuerzo que incorpora varios factores de correcciones para placas con grieta lateral está dada por:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f\left(\frac{a}{b}\right) \quad (2.28)$$

El valor de la función $f(a/b)$ está en la tabla 2.2, para varios valores de la relación longitud de grieta / espesor de la muestra.

2.6.4. Grietas en orificios.

El factor de intensidad de esfuerzo para grietas que brotan de agujeros circulares o elípticos en placas infinitas, ver la figura 2.13, está dado por¹¹:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} f(\lambda, \delta) \quad (2.29)$$

Donde $\lambda = a/a_N$ y $\delta = b_N/a_N$ y a , a_N , y b_N y el valor de $F(\lambda, \delta)$ se muestran en la figura 2.13.

2.6.5. Grieta simple en una viga en flexión.

El factor de intensidad de esfuerzo para una viga en flexión que contiene un borde agrietado, ver la figura 2.14, está dado por:

$$K_I = \frac{6M}{(W-a)^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.30)$$

Donde el valor de $f(a/W)$ está representado en la tabla 2.3 para varios valores de la relación longitud de grieta, a , espesor de viga, W , y M es la magnitud del momento.

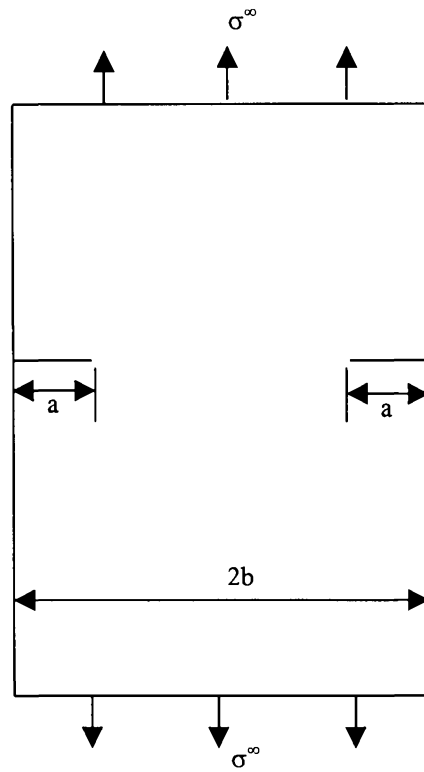


Figura 2.11. Placa doblemente agrietada.

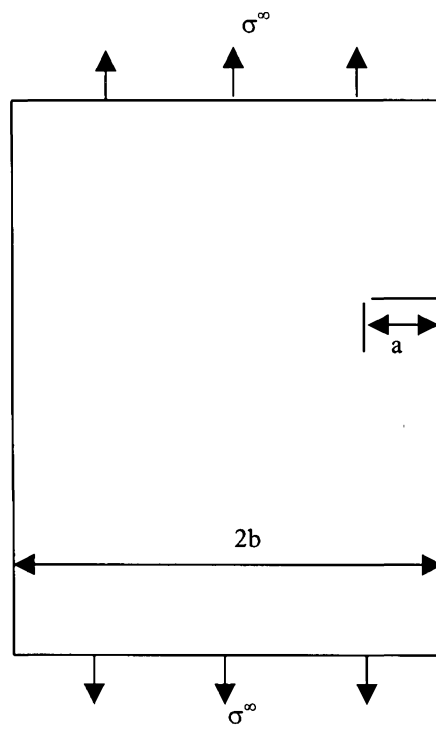


Figura 2.12. Placa con grieta lateral de ancho finito.

a/b	$f(a/b)$
0.10	1.15
0.20	1.20
0.30	1.29
0.40	1.37
0.50	1.51
0.60	1.68
0.70	1.89
0.80	2.14
0.90	2.46
1.00	2.86

Tabla 2.2. Factor de corrección para placas con grieta lateral.

a/W	0.05	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
$f(a/w)$	0.36	0.49	0.60	0.66	0.69	0.72	0.73

Tabla 2.3. Coeficientes de factor de intensidad de esfuerzos para una viga.

2.6.6. Grieta circular o elíptica en una placa infinita.

El factor de intensidad de esfuerzo en cualquier punto a lo largo del perímetro de una grieta circular o elíptica embebida en un cuerpo infinito sujeto a un esfuerzo de tensión uniforme, ver la figura 2.15 está dado por¹²:

$$K_I = \frac{\sigma \sqrt{\pi a}}{\Phi_0} \left(\sin^2 \beta + \frac{a^2}{c^2} \cos^2 \beta \right)^{1/4} \quad (2.31)$$

Donde K_I corresponde al valor del factor de intensidad de esfuerzo para un punto en el perímetro de la grieta cuya localización es definida por el ángulo β , y Φ_0 es la integral elíptica:

$$\Phi_0 = \int_0^{\pi/2} \left(1 - \left(\frac{c^2 - a^2}{c^2} \right) \sin^2 \theta \right)^{1/2} d\theta \quad (2.32)$$

para grietas circulares ($a = c$), y la ecuación 2.28 se reduce a:

$$K_I = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sigma \sqrt{a} \quad (2.33)$$

Para $c = \infty$ y $\beta = \pi/2$, la ecuación 2.31 se reduce a la ecuación 2.24 para una grieta a través del espesor.

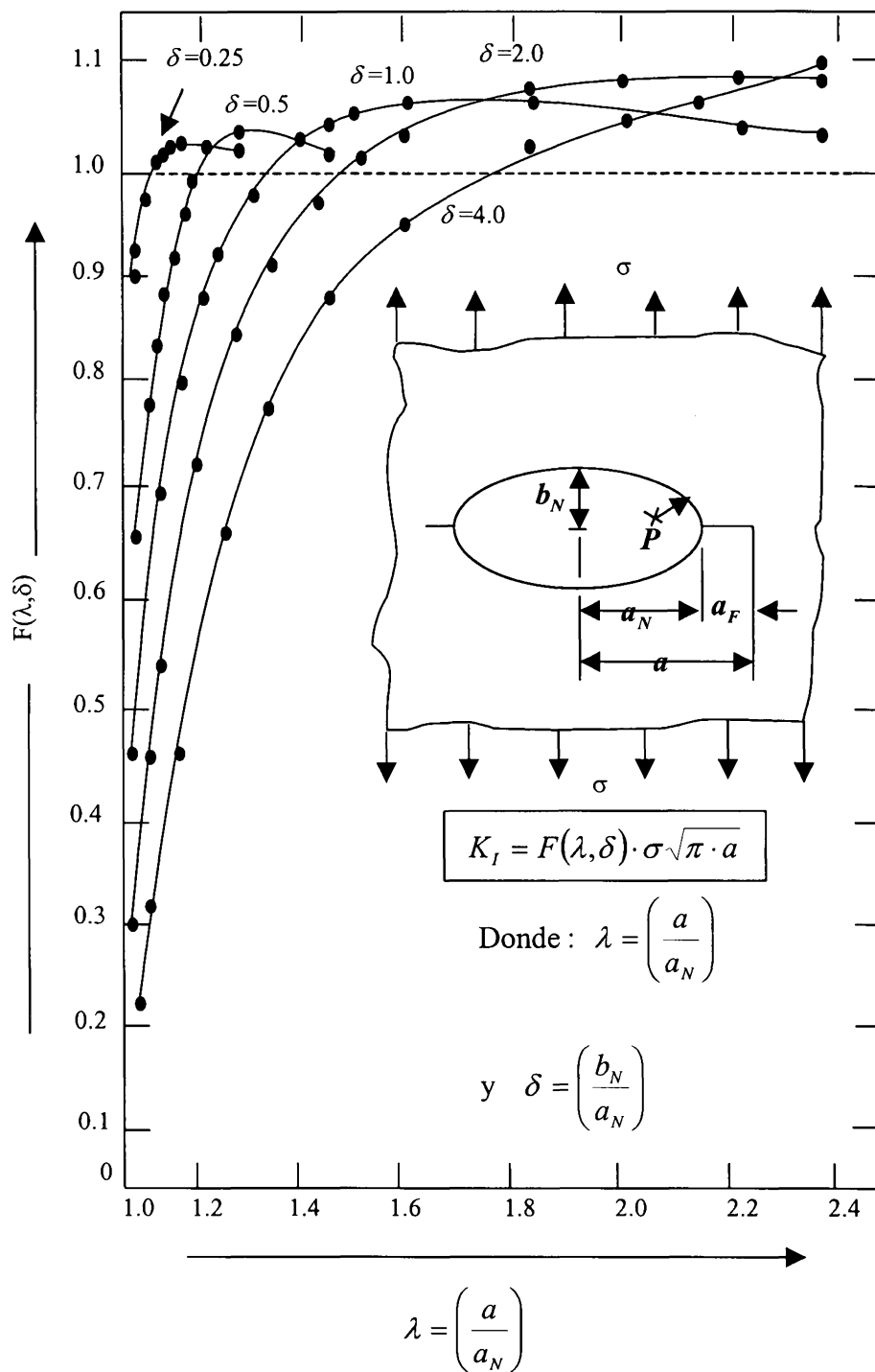


Figura 2.13. Análisis de Newman de coeficientes de factores de intensidad de esfuerzos para una grieta producida en un agujero elíptico sujeta a tensión uniaxial.

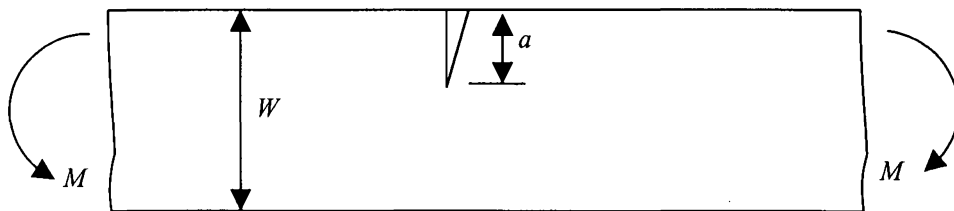


Figura 2.14. Grieta en una viga sujeta a flexión.

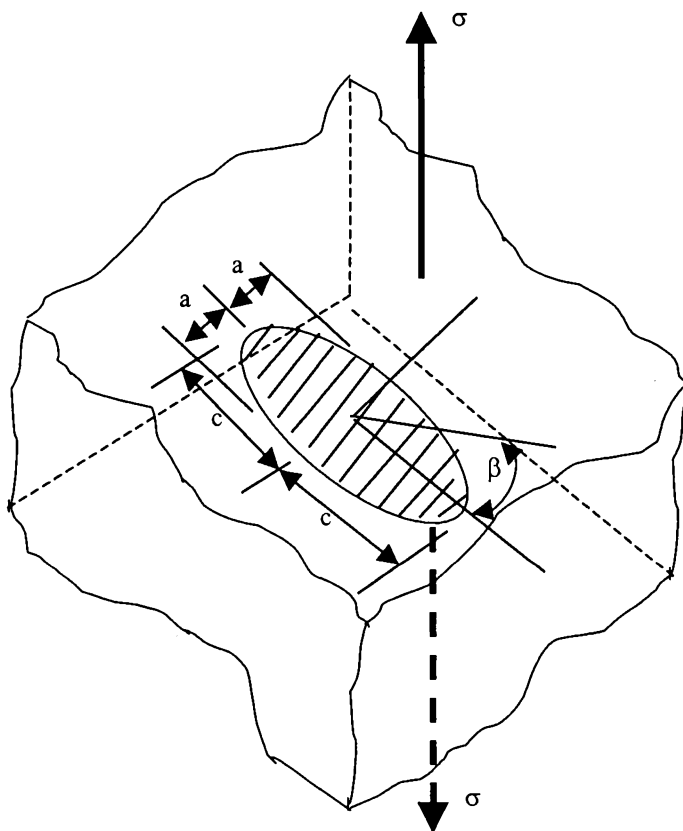


Figura 2.15. Grieta elíptica en un cuerpo infinito sujeta a tensión uniforme.

2.6.7. Superficie agrietada.

El factor de intensidad de esfuerzo para una grieta semi-elíptica en una placa sujeta a esfuerzo de tensión uniforme, ver la figura 2.16, se puede calcular usando las ecuaciones 2.31 y 2.32, y un factor de corrección de superficie libre igual a 1.12.

El factor de intensidad de esfuerzo para $\beta = \pi/2$ está dado por:

$$K_I = 1.12\sigma \sqrt{\pi \frac{a}{Q}} \quad (2.34)$$

Donde $Q = \Phi_0^2$ y Φ_0 es la integral elíptica dada por la ecuación 2.32. Q se ha designado como un factor de forma, ya que éste depende de los valores de a y c . Una representación gráfica de estas dependencias es mostrada en la figura 2.17 para varias formas de grietas y valores de la relación del esfuerzo nominal aplicado a esfuerzos producidos, σ/σ_{ys} . El uso de diferentes curvas para diferentes valores de σ/σ_{ys} se toma en cuenta para calcular los efectos de deformaciones plásticas en la cercanía del extremo de la grieta en el valor de factor de intensidad de esfuerzo.

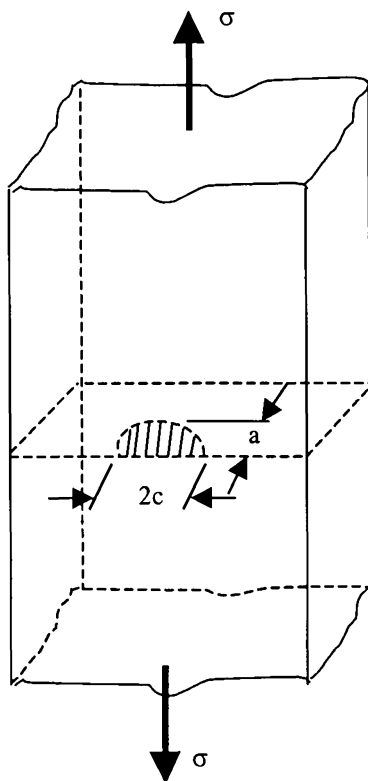


Figura 2.16. Grieta semi-elíptica.

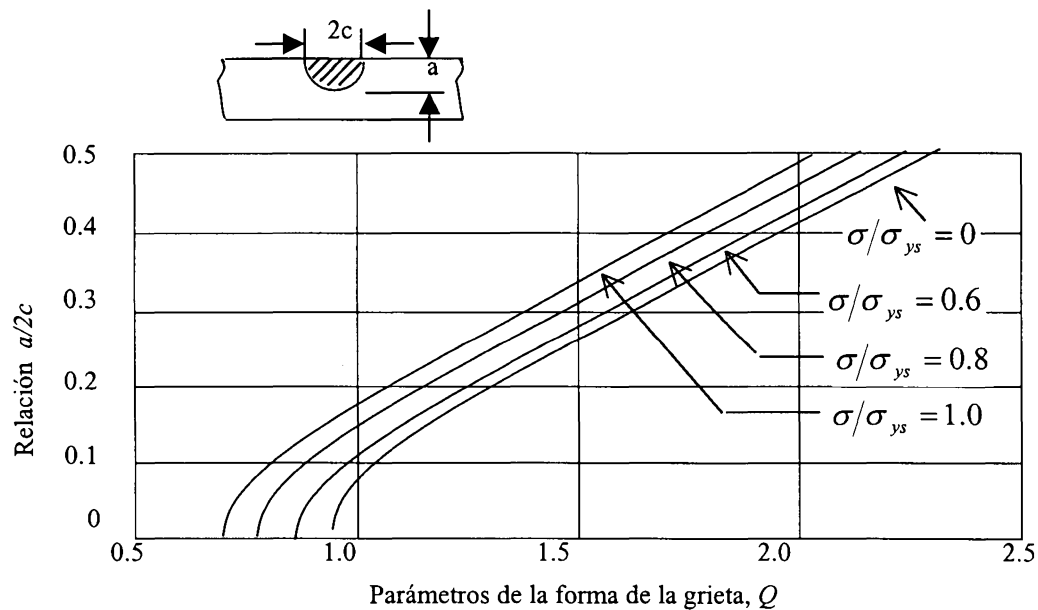


Figura 2.17. Dependencia de los parámetros de la forma de la grieta y la relación de la profundidad / la longitud de la superficie agrietada.

2.6.8. Grieta en muestras tipo Wol.

La ecuación del factor de intensidad de esfuerzo para muestras tipo Wol (*wedge-opening-loading*), ver la figura 2.18, puede presentarse en la forma¹³:

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{a}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (2.35)$$

Donde P es la carga aplicada, B es el espesor de la muestra, y $f(a/W)$ es una función que depende de la muestra. Para un valor constante de la altura de la muestra, H , para muestras anchas, W , la función $f(a/W)$ puede expresarse en forma polinomial como una función de la longitud de grieta de dimensiones a/W .

El $f(a/W)$ para muestras WOL tipo-T puede representarse como^{12, 14}:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left[30.96\left(\frac{a}{W}\right) - 195.8\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 730.6\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 1186.3\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 754.6\left(\frac{a}{W}\right)^5 \right] \quad (2.33)$$

en el rango $0.25 < a/W < 0.75$, el polinomio es exacto dentro de 0.5% conforme a lo experimental.

El $f(a/W)$ para muestras de tensión compactas puede representarse como^{12, 15}:

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \left[0.2960\left(\frac{a}{W}\right) - 1.855\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 6.557\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 10.17\left(\frac{a}{W}\right)^4 + 6.389\left(\frac{a}{W}\right)^5 \right] \quad (2.34)$$

el polinomio es exacto dentro del 0.25% para a/W entre 0.3 y 0.7.

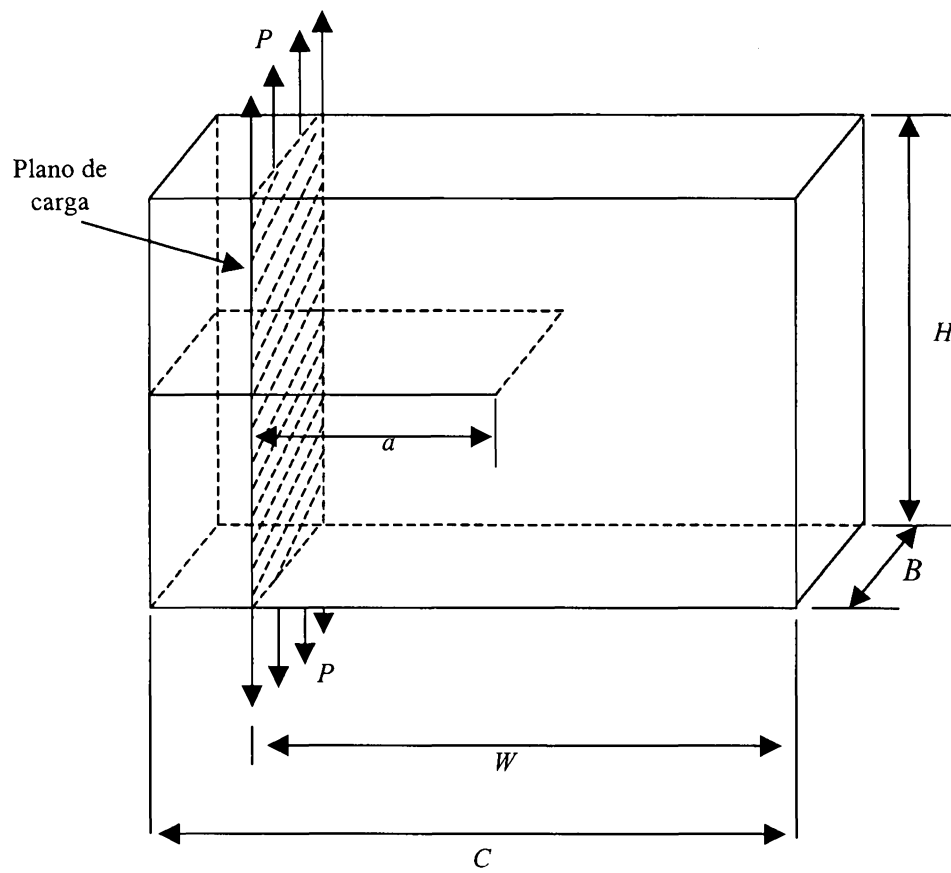


Figura 2.18. Idealización del modelo de tipo WOL.

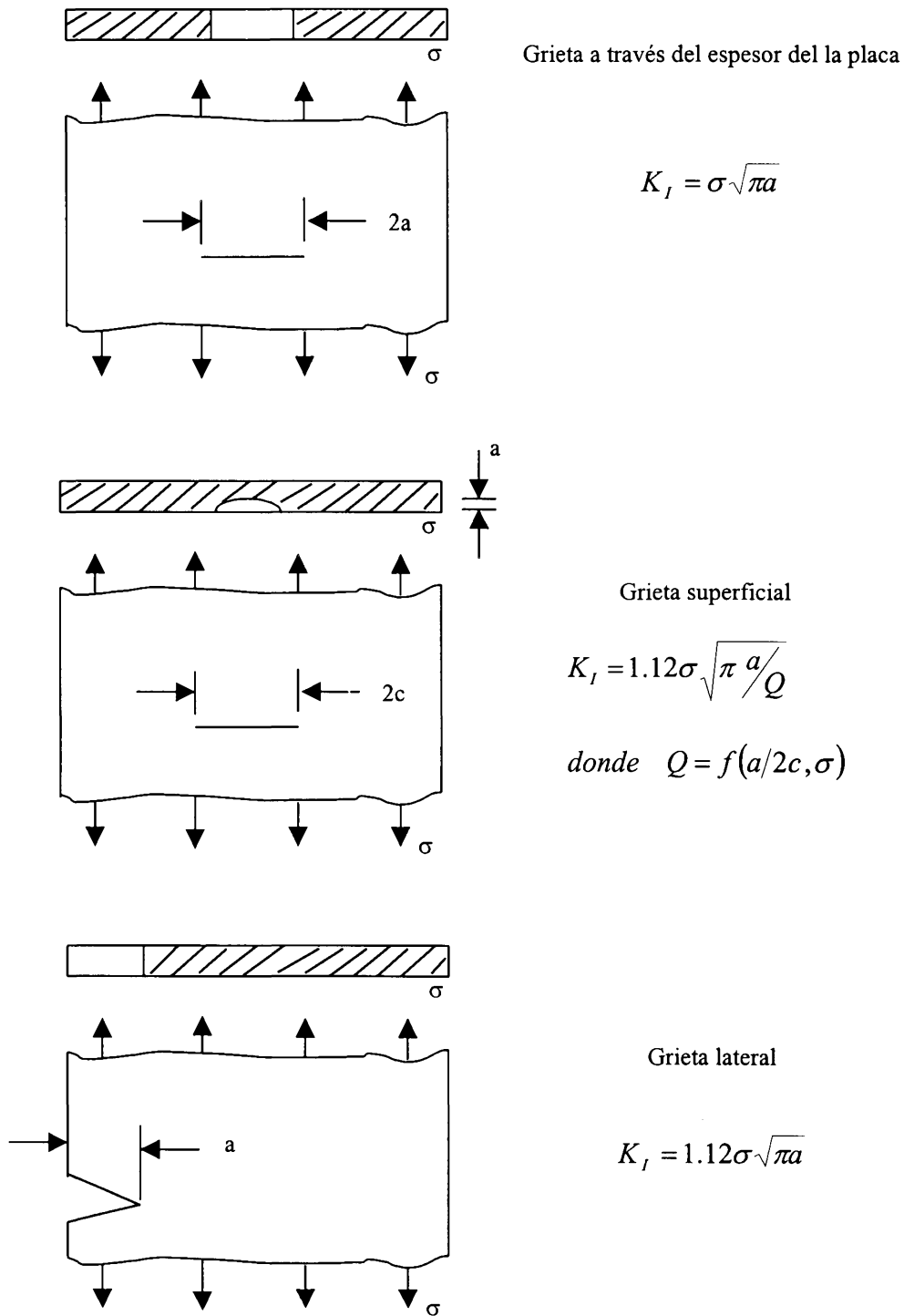


Figura 2.19. Valores de K_I para varias geometrías agrietadas.

3. DISEÑO DE FRACTURA MECANICA.

3.1. INTRODUCCIÓN.

En el capítulo anterior se describió brevemente algunos accidentes que han ocurrido por problemas de fractura, según Anderson¹⁶ las principales causas por las que puede fallar una estructura se dividen en dos tipos:

1. Negligencia durante el diseño, construcción u operación de la estructura.
2. Aplicación de nuevos materiales o diseños los cuales producen resultados no esperados.

También podemos generalizar a los tipos de fractura como:

- a) Fractura frágil.
- b) Fractura dúctil.

Bajo este contexto, el comportamiento se relaciona con las deformaciones a las cuales se presenta la fractura. Con el tipo de fractura frágil, si hay deformación permanente, ésta es pequeña de tal manera que el cambio de forma de la pieza es mínima; materiales como el vidrio y el hierro fundido presentan este tipo de fractura. Por otro lado la fractura dúctil es precedida por una apreciable deformación plástica antes de que la separación de la pieza ocurra. En la mayoría de las fracturas reales se ven involucrados ambos modos pero usualmente es dominada por uno de ellos. También por la apariencia de la superficie de la fractura, la palabra “fibroso” a menudo se usa para describir el comportamiento dúctil del material, mientras que la palabra “granular” describe el comportamiento frágil.

La palabra diseño es un término empleado de diferentes maneras por ingenieros. Para los ingenieros estructuristas, usualmente este término se usa para simplificar varias disciplinas necesarias (estática, mecánica de materiales, análisis estructural, álgebra matricial, etc.) para crear una estructura que satisfaga un fin determinado.

Cuando la palabra diseño se usa en este sentido, diseñar para prevenir fractura frágil usualmente se refiere a utilizar un esfuerzo apropiado así como eliminar (tanto como sea posible) esos detalles estructurales que actúan como incrementadores de esfuerzos y que pueden ser sitios potenciales donde se inicie la fractura, por ejemplo: juntas soldadas, orificios, intersección de placas, etc. Desafortunadamente, las estructuras (soldadas o remachadas) no pueden ser diseñadas sin estas discontinuidades, aunque un control de calidad en la fabricación puede minimizar el tamaño y número de éstas.

Por otro lado, el ingeniero en materiales o metalúrgico emplea la palabra diseño en un diferente contexto, éste es el de selección del material y de un apropiado nivel de esfuerzo de diseño a la temperatura de servicio particular y nivel de carga a la que la estructura será sometida. Así desde el punto de vista de diseño, prevenir fractura frágil se refiere a la selección apropiada de materiales así como la selección de un esfuerzo permisible apropiado.

Estos dos puntos de vista son válidos para diseñar, pero ellos no deben ser confundidos. La primera definición (y tradicional) asume que el diseño empieza con un material dado y un nivel de esfuerzo de diseño (a menudo especificado por códigos) e involucra el proceso de detalle de los miembros para soportar las cargas dadas sin exceder el esfuerzo permisible. El esfuerzo permisible es usualmente un cierto porcentaje de la resistencia a la fluencia para miembros a tensión y un cierto porcentaje del esfuerzo de pandeo para miembros a compresión. Se comprende que la concentración de esfuerzo o discontinuidades están presentes, pero el diseñador asume que sus materiales estructurales fluirán localmente y redistribuye la carga en la cercanía de estas zonas de concentración de esfuerzos o discontinuidades.

El segundo punto de vista se refiere a la selección de materiales y niveles de esfuerzos permisibles basados en la posibilidad de que las discontinuidades en estructuras complejas se pueden presentar o iniciarse ante cargas cíclicas o presentar fractura por esfuerzo de corrosión y es deseable algún nivel de dureza del material. Este aspecto de diseño se ha hecho más cuantitativo recientemente por el desarrollo de la mecánica de la fractura como una ciencia de la ingeniería.

Para proporcionar una estructura segura y resistente a la fractura, se deben de seguir las dos aproximaciones de diseño mencionadas anteriormente. El diseñador debe proporcionar su estructura para prevenir fallas por cada carga excesiva de tensión o compresión inestable y por crecimiento de la grieta por fractura frágil. La mayoría de los criterios de diseño han sido establecido para prevenir fluencia (ya sea en tensión o compresión) y para prevenir pandeo. El complemento de falla inestable por pandeo es fractura frágil. El análisis de pandeo de Euler y la teoría de esfuerzo cortante máximo de fallas son los principios de diseños analíticos entre los mas ampliamente utilizados para prevenir fallas por fluencia o pandeo.

El resto de este capítulo trata con la descripción de cómo la mecánica de la fractura puede ayudar al ingeniero en la selección inicial de:

1. materiales,
2. niveles de esfuerzos de diseños y
3. tamaño de grieta tolerable para control de calidad o inspección.

para el diseño por resistencia de fractura de cualquier estructura compleja, ejemplo, puentes, barcos, tanques de presión, aeronaves, etc.

Sin tener en cuenta el tipo de estructura a ser considerada, el diseño mediante la mecánica de la fractura asume que el ingeniero ha establecido la siguiente información general:

1. Tipo de dimensiones globales de la estructura (puentes, tanques de presión, etc.).
2. Tamaño general de miembros a tensión (longitud, diámetro, etc.).
3. Criterio de desempeño adicional (peso mínimo, menor costo, resistencia máxima a la fractura, temperatura de operación, etc.).
4. Esfuerzos y rango de esfuerzo, donde el crecimiento de la grieta pueda ocurrir.

Con esta información básica, el diseñador puede incorporar los valores de K_c para la temperatura de servicio y nivel de carga en el proceso de diseño para obtener una estructura resistente a la fractura.

3.2. FACTORES RELEVANTES EN LA MECÁNICA DE LA FRACTURA.

Una gran cantidad de estudios sobre fractura frágil en estructuras de todos los tipos ha mostrados que numerosos factores (temperatura de servicio, dureza del material, diseño, soldadura, esfuerzos residuales, fatiga, etc.) puedan contribuir a la fractura frágil en estructuras soldadas. Sin embargo, el desarrollo reciente de la mecánica de la fractura ha mostrado que hay tres factores primarios que controlan la susceptibilidad de una estructura a la fractura frágil estos son: dureza del material, tamaño de la grieta y el nivel de esfuerzos.

- Dureza del material (K_c)

La dureza del material puede definirse como la capacidad para soportar carga o deformaciones plásticas en la presencia de una muesca (o grieta) y puede describirse en función del factor de intensidad de esfuerzo crítico bajo condiciones de esfuerzo plano, o deformación plana para carga lenta y comportamiento elástico lineal. Además de los factores metalúrgicos como composición y tratamiento de calor, la dureza del material depende de la temperatura, proporción de la carga, y restricciones (estado de esfuerzo) frente a la grieta.

- Tamaño de la grieta (a)

Las fracturas frágiles se inician por las discontinuidades de varios tipos. Estas discontinuidades pueden variar desde grietas sumamente pequeñas dentro de un punto de soldadura de arco (como era el caso en la fractura frágil de un tanque T-2 durante la II guerra mundial) hasta grandes grietas en el cordón de soldadura o grietas por fatiga. Incluso las estructuras grandes y complejas soldadas no son fabricadas sin discontinuidades (porosidad, falta de fusión, desigualdad, etc.), aunque un buen proceso de fabricación y de inspección puede minimizar el tamaño original y número de grietas. Así, estas discontinuidades estarán presentes en muchas estructuras soldadas aún después de todas las inspecciones y reparaciones de la soldadura. Además, aunque sólo estén presentes “pequeñas”, estas discontinuidades pueden crecer por fatiga o esfuerzo de corrosión, posiblemente hasta alcanzar un tamaño crítico.

- Nivel de esfuerzo (σ)

Para que se presente la fractura frágil en una estructura deben de actuar esfuerzos a tensión (nominal, residual o ambos). Estos esfuerzos son determinados por técnicas convencionales de análisis para estructuras particulares, mediante la mecánica del continuo.

Estos tres factores son los que principalmente controlan la susceptibilidad de una estructura a la fractura frágil. Todos los otros factores tal como temperatura, proporción de carga, concentración de esfuerzo, esfuerzos residuales, etc., sólo afectan a los tres factores anteriores.

Los ingenieros siempre han conocido estos hechos por muchos años y reducen la susceptibilidad de estructuras a fracturas frágiles controlando cualitativamente los factores anteriores en sus estructuras. Es decir, empleando buenos diseños (secciones adecuadas, concentración de esfuerzos mínimos) y buenas prácticas de fabricación (tamaño de discontinuidades reducida debido al control de la soldadura apropiada e inspección), así como el empleo de materiales de niveles altos de dureza, reducen la probabilidad de fractura frágil en estructuras. Sin embargo, el ingeniero no ha tenido unas normas para evaluar y diseñar una estructura que sea económica y segura, es decir, carecía de un método que agrupara la economía, diseño, fabricación y resistencia de material.

3.3. CONSIDERACIONES DE DISEÑO DE FRACTURA FRÁGIL.

Se han presentado numerosas fallas menores de estructuras durante la construcción o etapa de servicios, las cuales han resultado en retrasos, reparación e inconveniencias, inclusive algunos muy caros. Sin embargo, comparado con el número total de estructuras diseñadas a lo largo del mundo, el número de catástrofes de fractura frágil es muy pequeño, pero es la más peligrosa debido a que se presenta sin avisar. Los diseñadores rara vez tienen interés en la dureza del material estructural porque la falla debida a ésta en proporción a la mayoría de las estructuras es demasiado baja. Sin embargo, existen algunos casos en los que debemos poner mas atención para evitar que se presente la fractura:

1. Cuando el diseño se vuelve más complejo.
2. Cuando el uso de placas gruesas de alta resistencia soldadas se vuelve más común comparado con el empleo de placas delgadas remachadas de baja resistencia.
3. Cuando el método de construcción depende del costo mínimo.

4. Cuando la magnitud de cargas aumenta.
5. Cuando los factores de seguridad reales disminuyen debido a los diseños por computadora que son más precisos.
6. Cuando la falla puede provocar daños enormes, grandes pérdidas, daños ecológicos o accidentes fatales.

El diseñador debe considerar la posibilidad de que se presente la fractura frágil en estructuras complejas y conocer métodos de análisis para prevenirla. El concepto innovador de la mecánica de fractura puede usarse en el diseño de estructuras para prevenir fracturas frágiles.

Los códigos de diseño a menudo incluyen este hecho y, en el año de 1970, varias especificaciones de diseños y de materiales basados en los conceptos de la mecánica de fractura fueron adoptados por diferentes ramas de la ingeniería. Estos incluyen:

1. ASME Calderas y Tanques de Presión.
2. Asociación Americana de Carreteras y de Transportes Oficiales.
3. Diseño de aviones de la fuerza aérea por criterio de la mecánica de la fractura, además, de los límites de carga estáticos usuales.

El método tradicional de diseño para la mayoría de las estructuras está generalmente basado en el uso de factores de seguridad por niveles límite para esfuerzos máximos calculados para algunos porcentajes de fluencia, esfuerzos últimos o para esfuerzos admisibles (generalmente elásticos).

La aproximación del factor de seguridad, por sí mismo, no siempre da la confianza apropiada para prevenir la fractura frágil, debido a que no se fabrican estructuras complejas sin algún tipo de discontinuidad, así lo muestran las numerosas investigaciones e inspecciones que se han hecho.

Las investigaciones por Fisher y Yen¹⁷ han mostrado esta discontinuidad existente prácticamente en todos los miembros estructurales desde la manufactura o desde los procesos de fabricación, maquinado, perforado o soldado. La dimensión de estas discontinuidades varía desde micro-discontinuidades muy pequeñas (< 0.01 in.) hasta algunas de varias pulgadas de largo.

Bravenec¹⁸ ha revisado varias fracturas durante la fabricación y ha mostrado que la grieta se origina en los bordes del corte de la soldadura, en soldaduras reparadas, en severas concentraciones de esfuerzos, etc. Dolan¹⁹ dice que cada estructura contiene pequeñas grietas cuyo tamaño y distribución dependen del material y su proceso de fabricación. Estas pueden variar desde inclusiones no metálicas y micro-espacios por efectos de las soldaduras, hasta grietas reparadas, superficies sobrepuestas, etc. El punto sobresaliente es que las discontinuidades o grietas están presentes en todas las estructuras, incluso ya después de haber sido inspeccionadas.

3.4. SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL DISEÑO.

Los métodos actuales de diseño y fabricación de estructuras complejas son tales que los ingenieros esperan que estas estructuras sean capaces de tolerar esfuerzos de fluencia por cargas de tensión sin presentar fallas, por lo menos en las regiones localizadas alrededor de los puntos de concentración de esfuerzo. Ya que es generalmente aceptado que el esfuerzo de fluencia ocurra en la cercanía de las discontinuidades estructurales, el tamaño crítico de la grieta, a , es proporcional a $(K_c / \sigma_{ys})^2$.

De esa manera esta relación K_c / σ_{ys} llega a ser un índice para medir la dureza relativa de los materiales estructurales. Porque para la mayoría de las aplicaciones estructurales es deseable que la estructura tolere grandes grietas sin fracturarse. Es una condición deseable el uso de materiales con valores de K_c / σ_{ys} tan altos como sea posible, dependiendo de las consideraciones económicas.

Ahora la pregunta es, ¿qué tan alta debe ser la relación K_c/σ_{ys} para asegurar el desempeño satisfactorio en estructuras complejas?, donde la inspección inicial completa de la grieta y la continua supervisión del crecimiento de la grieta a lo largo de la vida de una estructura no siempre es posible, práctico o económico.

Evidentemente no existe una sola respuesta porque ésta depende del tipo de estructura, frecuencia de inspección, acceso para inspección, calidad de fabricación, vida útil de la estructura, probabilidad de carga excesiva, costo de fabricación y materiales, etc. Sin embargo, la mecánica de la fractura proporciona al ingeniero métodos para evaluar esta pregunta racionalmente. Bajo estas condiciones, la relación K_c/σ_{ys} para los materiales usados en una estructura en particular, es uno de los parámetros de control de diseño que puede ser usado para definir la seguridad relativa de una estructura contra de la fractura frágil.

Como un ejemplo del empleo de la relación K_c/σ_{ys} como un parámetro de selección del material, se analiza el comportamiento de una placa ancha con una grieta al centro de longitud $2a$ (figura 2.19) para materiales con niveles resistencia y dureza dados. La tabla 3.1 presenta valores supuestos de K_c para varios aceros con una resistencia a la fluencia con un rango de 40 a 260 ksi. Para cada uno de estos aceros, el tamaño crítico de grieta, $2a$, se calcula para cuatro niveles de esfuerzos de diseños, ejemplo, 100% σ_{ys} , 75% σ_{ys} , 50% σ_{ys} y 25% σ_{ys} . Debe darse énfasis que no hay un sólo factor de intensidad de esfuerzo para un acero a una temperatura de prueba y nivel de carga dado, debido a que K_c depende de la historia termomecánica.

Los resultados presentados en la tabla 3.1 demuestran la influencia del nivel de resistencia, dureza del material y el nivel de esfuerzo de diseño sobre el tamaño crítico de la grieta para una placa ancha. Por ejemplo, el tamaño crítico de la grieta, para la resistencia de fluencia del acero de 260 ksi cargado al 50% de la resistencia de fluencia (esfuerzo de diseño de 130 ksi) es 0.24 in. Si un esfuerzo de diseño de 130 ksi es requerido para una estructura en particular, seria preferible usar una menor resistencia, una mayor dureza del material (ejemplo, resistencia a la fluencia del material de 180 ksi) para un esfuerzo de diseño al 75% σ_{ys} (135 ksi). Para cualquiera de los dos aceros con resistencia de fluencia de 180 ksi analizados en la

tabla 3.1, los tamaños críticos de la grieta son mucho mayores que 0.24 in. ejemplo, 0.68 in. para el material con un K_c de $140 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ o 1.69 in; para el material con un K_c de $220 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$.

Obviamente el más duro de estos dos materiales sería el más resistente a la fractura del material estructural, pero probablemente sería también el material más caro. Este punto ilustra una de las diferencias básicas en el diseño de la resistencia de la fractura, comparado con otros métodos tradicionales de diseño en que la economía siempre está presente. Así, hay materiales estructurales disponibles que son sumamente resistentes a las temperaturas de servicio y rango de carga. Sin embargo, debido al costo que estos materiales generalmente tienen por su habilidad de comportarse satisfactoriamente bajo las más severas condiciones de operación, el ingeniero normalmente no quiere especificar la resistencia del material que se requiere para la aplicación particular. Así el problema de diseño de resistencia de fractura para el desempeño estructural recae en consideraciones económicas.

La tabla 3.1 indica que el método tradicional para seleccionar un esfuerzo de diseño como un porcentaje de la resistencia de fluencia no siempre da igual seguridad y confiabilidad contra la fractura como se supone para la fluencia. Por ejemplo, asumiendo que el esfuerzo de diseño para dos aceros tienen una resistencia a la fluencia de 220 ksi y 110 ksi es 50% σ_{ys} o 110 ksi y 55 ksi, respectivamente. Para el acero de 220 ksi, el tamaño crítico de la grieta es de 0.64 in., mientras que para la resistencia de fluencia del acero de 100 ksi, el tamaño crítico de la grieta es de 6.08 in. Si el esfuerzo de diseño para la menor resistencia de fluencia del acero se aumenta a 100% σ_{ys} (110 ksi), el tamaño crítico de la grieta debe ser de 1.52 in. Esto todavía es significativamente mayor que el tamaño 0.64 in. para la resistencia de fluencia del acero de 220 ksi con un esfuerzo de diseño de 50% σ_{ys} .

En resumen, puede haber situaciones donde el diseñador debería especificar un material con una resistencia a la fluencia *menor* para un nivel de esfuerzo de diseño *más alto* (como un porcentaje de la resistencia de fluencia) para realmente *mejorar* la seguridad global y fiabilidad de una estructura desde el punto de vista del diseño de resistencia a la fractura.

Tamaño crítico de grieta, 2_a (in)
(nivel real de esfuerzos de diseño, ksi, mostrado entre paréntesis)

σ_{ys} (ksi)	Valores supuestos de $K_c(ksi\sqrt{in})$	$\sigma = 100\% \sigma_{ys}$	$\sigma = 75\% \sigma_{ys}$	$\sigma = 50\% \sigma_{ys}$	$\sigma = 25\% \sigma_{ys}$
260	80	0.06(260)	0.11(195)	0.24(130)	0.96(65)
220	100	0.16(220)	0.28(165)	0.64(110)	2.55(55)
180	140	0.39(180)	0.68(135)	1.54(90)	6.16(45)
180	220	0.95(180)	1.69(135)	3.80(90)	15.22(45)
140	260	2.20(140)	3.90(105)	8.78(70)	35.13(35)
110	170	1.52(110)	2.70(82.5)	6.08(55)	24.33(27.5)
80	200	3.98(80)	7.07(60)	15.92(40)	63.66(20)
40	100	3.98(40)	7.07(30)	15.92(20)	63.66(10)

Grieta a través del espesor en una placa ancha (Figura 5.1)

$$K_c = \sqrt{\pi} \sigma_{diseño} \sqrt{a}$$

$$\frac{1}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_{diseño}} \right)^2$$

$$2a = \frac{2}{\pi} \left(\frac{K_c}{\sigma_{diseño}} \right)^2$$

Tabla 3.1. Valores de tamaño crítico de grieta como función de la resistencia a la fluencia y dureza de la muesca.

3.5. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO EN MECÁNICA DE LA FRACTURA POR FALLA TERMINAL.

Conociendo el valor crítico de K_I a la falla (K_c) para un material dado, de un espesor particular, una temperatura específica y nivel de carga, el diseñador puede determinar el tamaño de la grieta que puede tolerar un miembro estructural para un nivel de esfuerzo de diseño dado. Así también, el diseñador puede determinar el nivel de esfuerzo de diseño que puede ser seguro para una grieta que pueda estar presente en una estructura.

Esta relación general entre la dureza del material (K_c), esfuerzo nominal (σ) y el tamaño de la grieta (a) es mostrada esquemáticamente en la figura 3.1. La fractura puede ocurrir si una combinación particular de esfuerzo y tamaño de la grieta en una estructura (K_I) alcanza los niveles de K_c .

El factor de intensidad de esfuerzo crítico para un material particular a una temperatura dada y nivel de carga está relacionado al esfuerzo nominal y al tamaño de la grieta como sigue:

$$K_c = C\sigma\sqrt{a} \quad (3.1)$$

donde:

K_c = dureza que presenta el material para evitar el crecimiento de una grieta,

$[ksi\sqrt{in}]$, probado a una temperatura particular y nivel de carga,

C = constante, función que depende de la geometría de la grieta,

σ = esfuerzo nominal aplicado, [ksi].

a = tamaño de la grieta, que es un factor crítico para una geometría particular de la grieta, [in].

Así que, el tamaño máximo de la grieta que un miembro estructural puede tolerar para un nivel de esfuerzo particular es:

$$a = \left[\frac{K_c}{C \cdot \sigma} \right] \quad (3.2)$$

Por lo tanto, el ingeniero puede analizar la seguridad de una estructura en contra de la falla por fractura frágil de la siguiente manera:

- Determinar los valores críticos de K_c y σ_{ys} para la temperatura de servicio y para un nivel de carga de los materiales considerados. Note que para un análisis completo de estructura soldadas, los valores para la soldadura deben ser usados también.
- Seleccionar el tipo más probable de grieta que existirá en un miembro siendo analizado por la ecuación correspondiente a K_I . Las figuras del capítulo dos muestran algunos modelos utilizados por la mecánica de la fractura. Las grietas de forma complejas pueden algunas veces ser aproximadas con unos de esos modelos.
- Determinar la relación de esfuerzo y tamaño de la grieta para varios niveles de esfuerzos de diseños posibles usando la expresión apropiada para K_I y el valor apropiado K_{Ic} o K_{Ia} .

Como un primer ejemplo numérico de la aplicación de mecánica de la fractura en el diseño, considere la ecuación que relaciona K_I el esfuerzo aplicado y tamaño de la grieta; para una grieta a través del espesor en una placa ancha, esto es, $K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$.

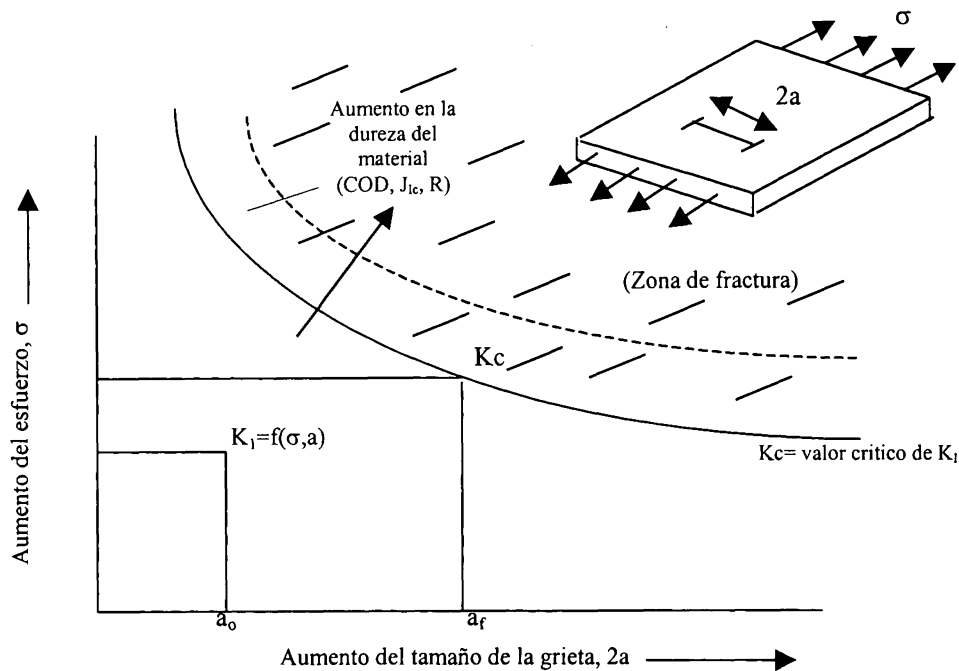


Figura 3.1 Relación esquemática entre esfuerzos, tamaño de grieta, y dureza del material

Suponiendo que las pruebas del laboratorio mostraron los resultados siguientes para una estructura de acero en particular, sujeta a una fuerza de 80 ksi (552 MN/m^2): el K_c es 60 ksi $\sqrt{\text{in}}$ ($66 \text{ MN/m}^{3/2}$) para la temperatura de servicio, nivel de carga, y espesor de placa empleada en servicio. Suponga que el esfuerzo de diseño es 20 ksi (138 MN/m^2). ¿Encuentre el tamaño máximo que puede tener la grieta?

Sustituyendo $K_I = K_c = 60 \text{ ksi } \sqrt{\text{in}}$ ($66 \text{ MN/m}^{3/2}$) en la figura 3.2 tenemos que $2a = 5.7 \text{ in.}$ (145 mm). Así para estas condiciones el tamaño de la grieta tolerable sería aproximadamente 5.7 in. (145 mm). Para un esfuerzo de diseño de 45 ksi (310 MN/m^2), el mismo material podría tolerar un tamaño de grieta, $2a$, alrededor de 1.1 in. (27.9 mm). Si los esfuerzos residuales debido a la soldadura están presentes y juntos, hacen que el total de los esfuerzos en la cercanía de la grieta sea 80 ksi (552 MN/m^2), el tamaño de la grieta es reducida considerablemente. Note que en la figura 1.12 se emplea un acero más resistente, por ejemplo, uno con un K_c de 120 ksi $\sqrt{\text{in}}$ ($132 \text{ MN/m}^{3/2}$), el tamaño de la grieta tolerable

aumenta todos los niveles de esfuerzos significativamente. Si la resistencia de un acero es suficientemente alta, la fractura frágil no ocurre, pero puede ocurrir falla bajo carga de tensión por lo general fluencia plástica, similar a la falla de la prueba de tensión. Afortunadamente, la mayoría de los aceros estructurales tienen un alto nivel de resistencia a la temperatura de servicio y nivel de carga.

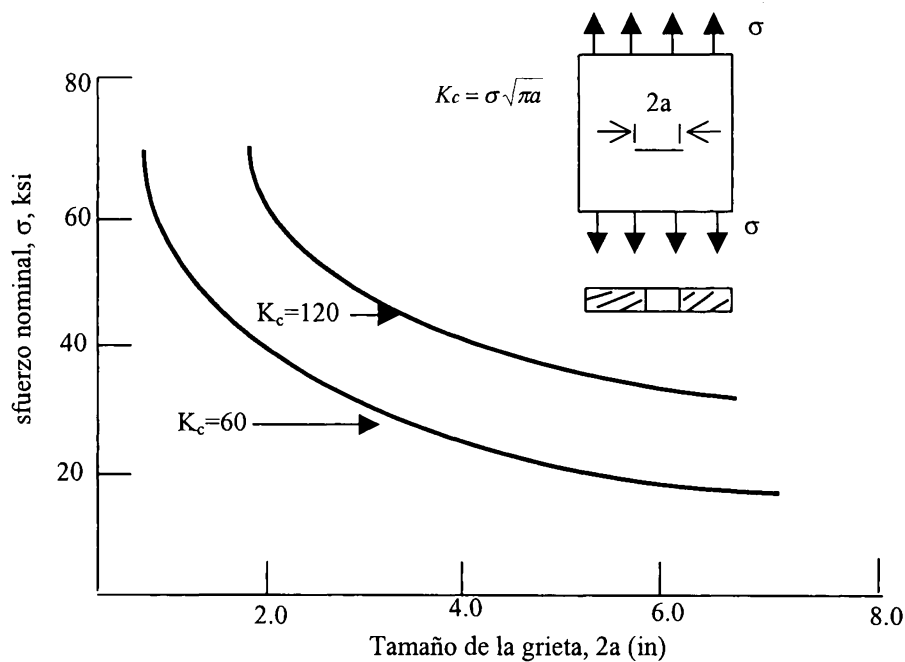


Figura 3.2. Relación tamaño de grieta-esfuerzo para la fractura a través del espesor.

Como otro ejemplo, consideremos a la relación entre esfuerzos, tamaño de grieta, factor de intensidad de esfuerzo, K_I , para una grieta a través del espesor mostrados en la figura 2.19 es:

$$K_I = \sqrt{\pi \sigma} \sqrt{a} \quad (3.3)$$

Suponiendo que el material analizado tiene un valor K_c de $50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ ($\text{MPa} / \sqrt{\text{m}}$), para la temperatura de servicio y una resistencia a la fluencia de 100 ksi (MN/m^2). Sustituyendo $K_I = K_c$ las posibles combinaciones de esfuerzos y tamaño crítico de la grieta a la falla son descritas por:

$$K_c = 50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}} = \sqrt{\pi\sigma} \sqrt{a} \quad (3.3)$$

Usando esta ecuación, los valores del tamaño crítico de la grieta para varios niveles de esfuerzos son calculados como sigue:

σ (ksi)	a (in)
10	7.96
20	1.49
30	0.88
40	0.50
50	0.32
60	0.22
70	0.16
80	0.12
90	0.10
100	0.08

Estos resultados son graficados en la figura 3.3. La curva K_c es el sitio de puntos en el cual el crecimiento inestable de la grieta ocurrirá. Así, si el nivel de esfuerzo nominal de diseño es de 30 ksi, entonces el tamaño de grieta máxima tolerable, o tamaño crítico de la grieta, es 0.88 in.

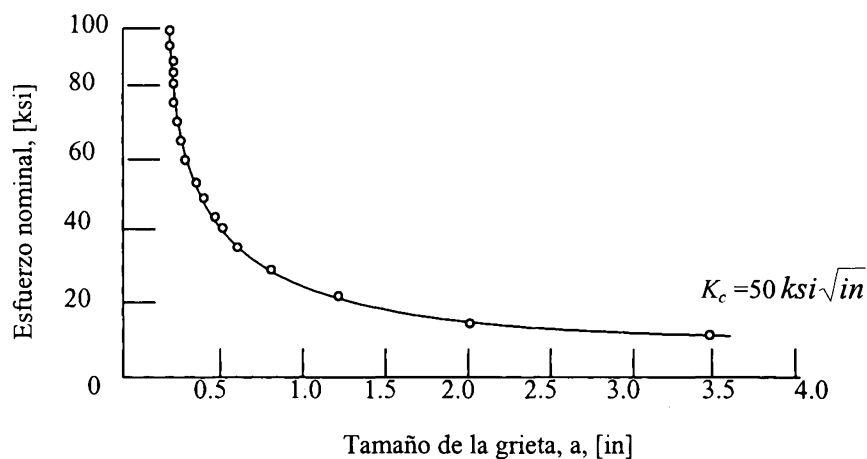


Figura 3.3. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que tiene un $K_c = 50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$.

Recíprocamente, si el nivel de esfuerzo nominal de diseño es de 60 ksi, entonces el tamaño de la grieta es de 0.22 in. Puede verse que no hay un sólo tamaño de la grieta crítica para un material estructural particular (a una temperatura dada y nivel de carga) sino un número semi-infinito de tamaños de grietas críticas, dependiendo del nivel de esfuerzo nominal de diseño.

La figura 3.4 muestra la localización de los valores de esfuerzo y tamaño de grieta para un “ K_I de diseño” de $K_c/2$, es decir, un factor de seguridad de 2 contra la fractura que está basado en el factor de intensidad de esfuerzo crítico. En este caso una estructura que tiene un tamaño de grieta de 0.22 pulgadas cargada a un esfuerzo de diseño de 30 ksi tiene un factor de seguridad de 2 contra la fractura. De igual manera la curva $K_I = 25 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$ es el sitio de todos los niveles de esfuerzos y tamaño de grieta correspondiente con un factor de seguridad de 2 contra la fractura. El factor de seguridad también puede ser basado en un sólo esfuerzo o en un sólo tamaño de grieta en lugar del factor de intensidad de esfuerzo crítico.

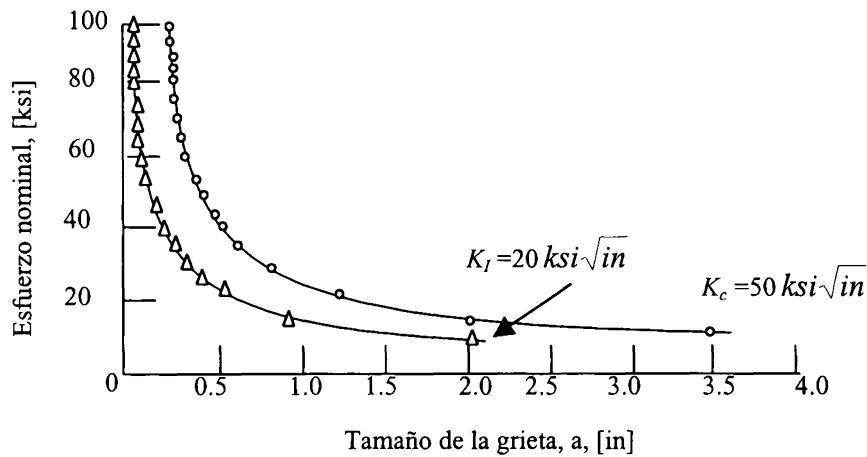


Figura 3.4. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que tiene un $K_I = 25 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$.

Evidentemente, para los materiales de alta resistencia (comparado con materiales con una baja resistencia), el número de combinaciones posibles de esfuerzo de diseño y tamaño de grieta permisible que no conducirán a la falla es mucho mayor. En la figura 3.5 se muestran los sitios de puntos de falla para un material duro con un K_c de $100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$, junto con el sitio de puntos de falla del material con un K_c de $50 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$. Para los materiales con un K_c de $100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$, el tamaño de grieta tolerable en todos los niveles de esfuerzos son considerablemente grandes comparados con aquellos materiales de dureza baja y la posibilidad de fractura se reduce considerablemente.

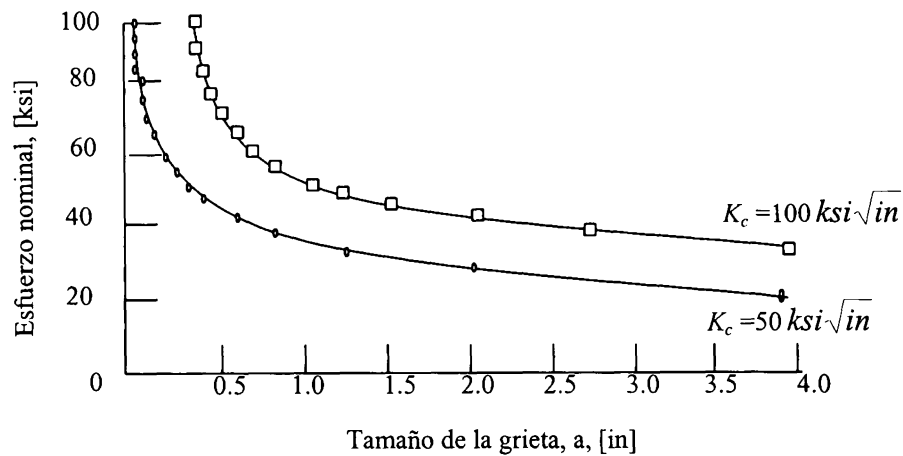


Figura 3.5. Relación entre esfuerzo y tamaño de la grieta en un material que muestra el valor mas alto de K_c ($100 \text{ ksi}\sqrt{\text{in}}$).

Así se puede ver que para minimizar la posibilidad de fractura frágil en una estructura dada, el diseñador tiene tres factores primarios que puede controlar:

1. Dureza del material a la temperatura de servicio particular y nivel de carga (K_c), $\text{ksi}\sqrt{\text{in}}$.
2. Nivel de esfuerzo nominal (σ), ksi .
3. Tamaño de grieta presente en la estructura (a), in .

Estos tres factores afectan la posibilidad de que ocurra una fractura frágil en una estructura. Los demás factores tales como temperatura, rango de carga, esfuerzos residuales, etc., sólo afectan los tres factores principales mencionados anteriormente. El empleo de un buen diseño, es decir, el uso apropiado de niveles de esfuerzos y minimizar discontinuidades, conduce a la reducción de fractura frágil en cualquier estructura. Además el empleo de una buena mano de obra, es decir, disminución del tamaño de la grieta con un control e inspección apropiados de soldadura, así como el uso de materiales con buenos niveles de resistencia, ha minimizado la probabilidad de fractura frágil en estructuras.

En resumen, la relación general entre la dureza del material (K_c), el esfuerzo nominal (σ) y el tamaño de la grieta (a) es mostrada en la figura 3.6. Si las combinaciones particulares de esfuerzo y tamaño de la grieta en una estructura (K_I) alcanzan el nivel K_c , la fractura puede ocurrir. Así, hay muchas combinaciones de esfuerzo y tamaño de grieta, σ_f y a_f , que puede causar fractura en una estructura que es fabricada de un material estructural que tiene un valor particular de K_c para una temperatura de servicio en particular y nivel de carga. Recíprocamente, hay muchas combinaciones de esfuerzos y tamaños de grietas, ejemplo σ_0 y a_0 , que no causarían la falla de un material en particular.

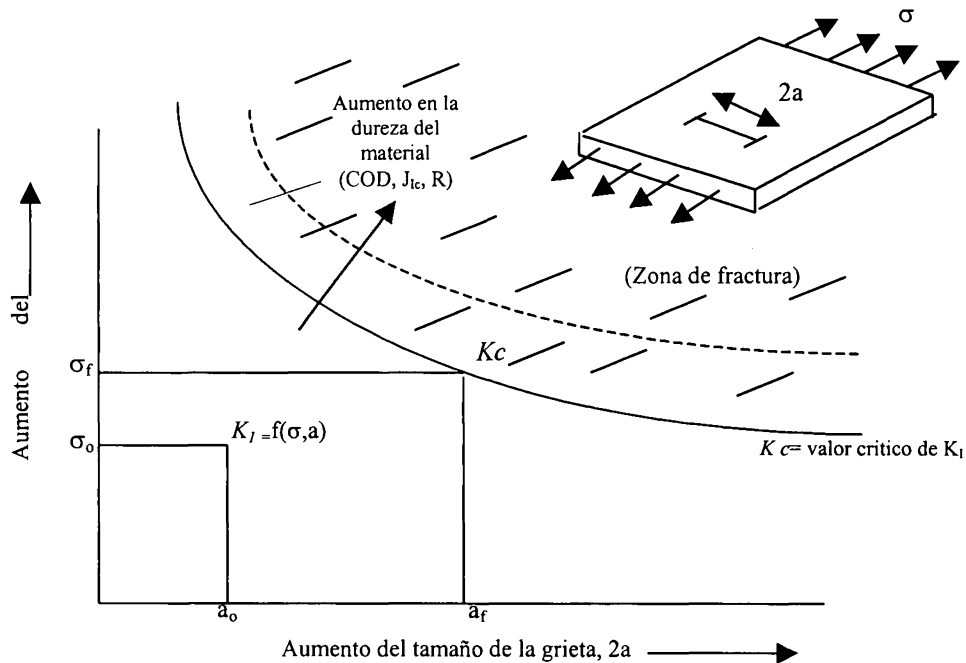
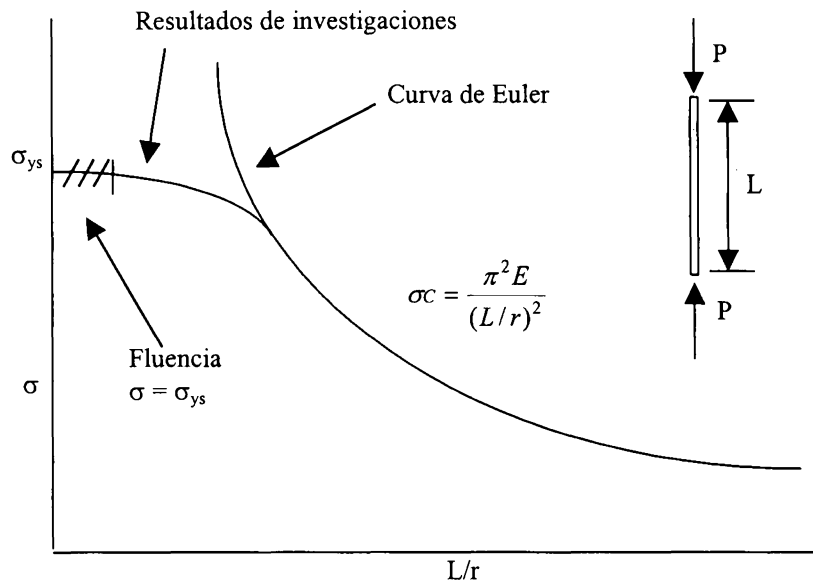


Figura 3.6. Relación esquemática entre esfuerzos. Tamaño de grieta, y dureza del material

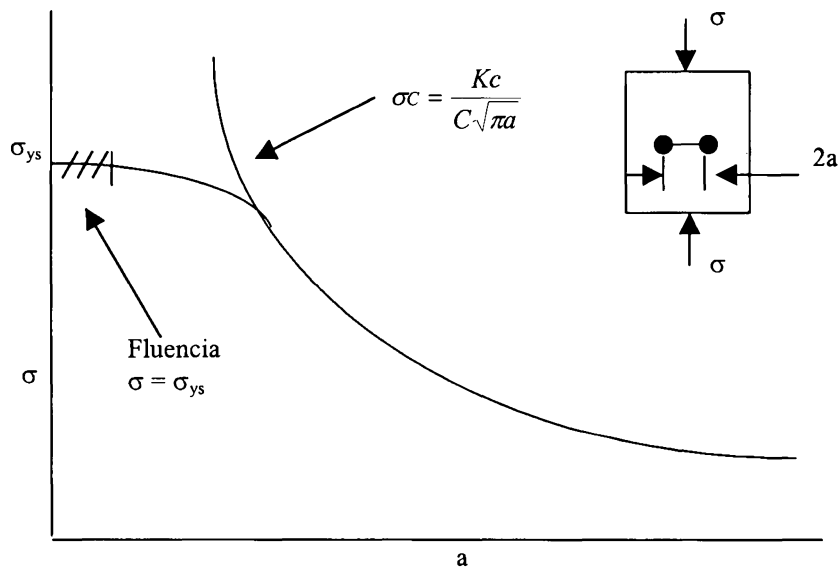
Una analogía útil para el diseñador es la relación entre la carga aplicada (P), el esfuerzo nominal (σ), y el esfuerzo de fluencia (σ_{ys}), en un miembro estructural no agrietado y la relación entre la carga aplicada (P), intensidad de esfuerzo (K_I), y la intensidad de esfuerzo crítico por fractura (K_C), en un miembro estructural con una grieta. En un miembro estructural no agrietado, al incrementarse la carga, el esfuerzo nominal se incrementa hasta que ocurra una inestabilidad (fluencia en σ_{ys}). Conforme la carga se incrementa en un miembro estructural agrietado (o cuando el tamaño de la grieta crece por fatiga o esfuerzo de corrosión), el factor de intensidad de esfuerzo, K_I , se incrementa hasta que ocurra una inestabilidad (fractura en K_C). Así el nivel K_I en una estructura debe siempre mantenerse debajo de los valores críticos apropiados (K_C) de la misma manera que en el diseño por fluencia el esfuerzo nominal (σ) debe mantenerse debajo de la resistencia de fluencia (σ_{ys}).

Otra analogía que puede ser útil para comprender los aspectos fundamentales de la mecánica de la fractura es la comparación con la inestabilidad de la columna de Euler (figura 3.7). El nivel de esfuerzo requerido para causar inestabilidad en una columna (pandeo) disminuye cuando la relación L/r disminuye. De igual manera, el nivel de esfuerzo requerido para causar inestabilidad (fractura) en un miembro a tensión agrietado disminuye cuando el tamaño de la grieta (a) aumenta. Cuando el nivel de esfuerzo en cualquiera de los casos se acerca a la resistencia de fluencia del material, tanto el análisis de Euler y el análisis de K_C son invalidados debido a la fluencia. Para prevenir pandeo, el esfuerzo actuante y los valores de L/r deben estar debajo de la curva de Euler. Para prevenir fractura, el esfuerzo actuante y el tamaño de la grieta, a , deben estar debajo de la línea de K_C mostrada en la figura 3.7. Obviamente, usar un material con un alto nivel de resistencia (ejemplo, un nivel de K_C de 100 $ksi\sqrt{in}$ comparado con 50 $ksi\sqrt{in}$ se muestra en la figura 3.4) aumenta las posibles combinaciones de esfuerzos de diseño y tamaño de la grieta que una estructura pueda tolerar sin fracturarse.

En este punto, es necesario hacer énfasis que el nivel de K_C para cualquier material estructural empleado en varios tipos de estructuras son tan altos que este valor no puede medirse directamente usando los métodos de pruebas existentes.



(a) Inestabilidad de la columna



(b) Inestabilidad de la grieta

Figura 3.7. Inestabilidad de la columna e inestabilidad de la grieta.

3.6. CRITERIO DE FRACTURA.

El criterio de selección, es decir la determinación de cuanta resistencia es necesaria, así como de cuanto el diseñador está dispuesto a pagar para obtener materiales con una alta resistencia, es la parte más importante para el desarrollo de un diseño adecuado para el control de fractura y debe estar basado en un estudio muy cuidadoso de los requerimientos particulares de una estructura. Algunos de los factores envueltos en el desarrollo de un criterio son:

1. Un conocimiento de las condiciones de servicio (temperatura, carga, nivel de carga, etc.) a que la estructura se sujetará.
2. El nivel de desempeño en la estructura (deformación plana, elasto-plástico, o plástico)
3. Las consecuencias de falla estructural.

Varios criterios que se han desarrollado para las aplicaciones estructurales son: el AASHTO, las recomendaciones PVRC para materiales férreos, para los recipientes a presión nucleares, el estándar 1530 para aviones.

3.7. PLANES DE CONTROL DE FRACTURA.

La mayoría de las estructuras de hoy en día están diseñadas para ser seguras y confiables. Comparativamente, pocas fallas de servicio en las estructuras indican que las propiedades de los materiales, diseño y procedimiento de fabricación son generalmente satisfactorias. Sin embargo, la ocurrencia de fallas pocos frecuentes, hace que se requiera un entendimiento más extenso y que se propongan posibles modificaciones en las prácticas actuales de diseño. La necesidad de modificaciones específicas requiere un estudio completo de las propiedades de los materiales, diseño, fabricación, inspección, instalación, y condiciones de servicio.

Las estructuras son fabricadas en varios tamaños y son sujetas a numerosas condiciones de servicios. De esa manera, es muy difícil desarrollar un conjunto de reglas que habría de mejorar la seguridad y confiabilidad de todas las estructuras cuando cada estructura involucra un grupo único de condiciones de operación. El uso de los datos obtenidos por pruebas de las muestras de laboratorio para predecir el comportamiento de los componentes estructurales complejos, pueden resultar en estimaciones aproximadas o excesivamente conservadoras de la vida útil de tales componentes que no garantiza una correcta predicción del comportamiento de la fractura o fatiga. La seguridad y confiabilidad de estructuras y la correcta predicción de su resistencia global a la falla por fractura o fatiga se puede aproximar usando un plan para el control de fractura. Un plan para el control de fractura es un procedimiento detallado empleado para:

1. Identificar todos los factores que pueden contribuir a la fractura de un detalle estructural o a la falla de la estructura completa.
2. Evaluar la contribución de cada factor y la contribución en grupo de estos factores al proceso de fractura.
3. Determinar la eficiencia relativa y disponibilidad de varios métodos para minimizar la probabilidad de fractura.
4. Asignar responsabilidad por cada tarea que debe emprenderse para asegurar la seguridad y confiabilidad de las estructuras.

El desarrollo de un plan de control de fractura para estructuras complejas es muy difícil. A pesar de la dificultad, se han hecho esfuerzos por formular un diseño y dar aplicaciones para el control de fractura, esto debe resultar en un mejor entendimiento de las características de la fractura de la estructura bajo consideración.

Un plan para el control de fractura es un procedimiento hecho para una aplicación dada y no debe extenderse indiscriminadamente a otras aplicaciones. Sin embargo, guías generales que pertenecen a ciertas estructuras (tales como puentes, barcos, recipientes a presión, etc.) pueden ser formuladas por la consideración en el desarrollo de un plan de control de fractura para una estructura específica dentro de cualquier clase particular de estructura.

Un plan de control de fractura basado en iniciación de la grieta, propagación de la grieta y dureza del material a la fractura puede demostrarse por el empleo de los conceptos de la mecánica de la fractura. El hecho de que la iniciación de la grieta, propagación de la misma y dureza a la fractura son funciones de la variación de la intensidad de esfuerzo, ΔK_I , y del factor de intensidad de esfuerzo crítico, K_c (que se relaciona a su vez con el esfuerzo nominal aplicado o esfuerzo de fractura) demuestra que el diseño de control de fractura para varias aplicaciones estructurales depende de:

1. La dureza, K_c , del material a la temperatura y proporción de carga representativa de la aplicación propuesta.
2. El esfuerzo aplicado, porcentaje de esfuerzo, concentración de esfuerzo y variación de esfuerzo, puede alterarse por cambios de diseño y por la fabricación.
3. El tamaño inicial de las discontinuidades, el tamaño y forma crítica de la grieta, puede controlarse con cambios de diseños, fabricación e inspección.

La vida útil de los componentes estructurales se determina por el tiempo necesario para iniciarse una grieta y para propagarse la grieta desde dimensiones sub-críticas a tamaños críticos. La vida de los componentes puede prolongarse retardando la iniciación de la grieta y el tiempo de propagación de la grieta sub-crítica. Por consiguiente, la iniciación de la grieta, la propagación de la grieta sub-crítica y la característica de la fractura de materiales estructurales son consideraciones primordiales en la formulación de normas de control de fracturas para estructuras.

4. NORMATIVIDAD Y CÁLCULO DE ESFUERZOS.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Una forma en la cual se hace posible que los avances en la ciencia, ya sea en ingeniería civil, mecánica, ambiental, etc. se hagan llegar a las personas encargadas de diseñar y analizar estructuras es por medio de las normas y códigos. Aquí cabe hacer la diferenciación entre reglamento, y norma o código: el principal objetivo del reglamento es el de aplicar las leyes vigentes, en una entidad o estado, para regular un proceso, y una norma es el método común que se utiliza para el análisis y diseño, y está fundamentada en bases científicas o empíricas; por lo general en los reglamentos se mencionan las normas o códigos a seguir.

Una de las principales intenciones de los códigos es el de indicar los requerimientos necesarios para el diseño y la construcción de líneas seguras, los cuales emplean para ello

aproximaciones simplificadas. Un diseñador capaz de aplicar un análisis más riguroso, deberá tener la capacidad de demostrar la validez de cada aproximación. Los elementos de las líneas deberán ajustarse a las especificaciones y estándares listados en los Códigos.

A continuación hablaremos de los códigos mas utilizados para el diseño y análisis de tuberías, para ello será necesario describir brevemente algunos conceptos manejados por la literatura técnica sobre plantas de proceso.

Planta Química: una planta industrial para la fabricación o procesamiento de químicos, o de materias primas o intermedios para la elaboración de tales químicos. Una planta química incluirá apoyo y facilidades de servicios, tales como almacenamiento, servicios auxiliares y unidades de tratamiento de desechos.

Refinería de Petróleo: una planta para el procesamiento o manejo de petróleo y productos derivados directamente del petróleo. Semejante a una planta puede ser una planta de recuperación de gasolina individual, una planta de tratamiento, una planta de procesamiento de gas (incluyendo licuefacción), o una refinería integrada teniendo varias unidades de proceso acompañadas de servicios.

Unidad de Proceso: un área cuyos limites son designados por el ingeniero de diseño dentro de los cuales son llevadas a cabo reacciones, separaciones y otros procesos. Ejemplos de instalaciones las cuales no son clasificadas como unidades de proceso son áreas de carga o terminales, plantas de carga a granel, plantas de mezclado, patio de tanque y patios de almacenamiento.

Diseño de Planta: este término incluye todos los aspectos de ingeniería involucrados en el desarrollo de cualquiera de los siguientes aspectos, una planta industrial nueva o modificada.

Diseño de Proceso: se refiere al diseño real del equipo y servicios necesarios para llevar a cabo el proceso.

Tubería o Ducto: es una viga tridimensional con sección transversal circular hueca y sujeta a cargas por presión, temperatura, asentimientos, etc.

Los códigos que usualmente se emplean para el diseño de tuberías enterradas son ASME (American Society of Mechanical Engineers) y ANSI (American National Standards Institute):

➤ ASME/ANSI B31.3

Tuberías para plantas químicas y refinerías de petróleo.

➤ ASME/ANSI B31.4

Sistemas de transporte de líquidos para hidrocarburos, gas de petróleo, amoníaco anhidro y alcoholes.

➤ ASME/ANSI B31.8

Sistemas de tuberías para transporte y distribución de gas.

4.2. ALCANCES DE LOS CÓDIGOS.

A continuación se presentan los alcances de cada uno de los códigos B31.3, B31.4 y B31.8.

ASME B31.3.

Este código describe los requisitos mínimos para material, diseño, fabricación, ensamble, erección, examinación, inspección y prueba de los sistemas de tuberías sujetos a presión y vacío. Este código aplica a sistemas de tuberías que manejan todo tipo de productos químicos y del petróleo o productos relacionados incluyendo sólidos fluidizados, a una presión mayor de 15 psi, para fluidos no tóxicos, ni dañinos, ejemplo: plantas químicas, refinerías de petróleo, terminal de carga y patio de tanques dentro de límites de batería.

El código no aplica a los sistemas de tuberías diseñadas para presión manométrica interna de acero arriba de cero pero menor de 15 psi, a condición que el fluido manejado no sea flamable, tóxico o dañino al cuerpo humano, a las calderas de acuerdo al código BPV sección I y tuberías externas de calderas requeridas para cumplir con el B31.1.

También a las tuberías, cabezales, cruce en arco y distribuidores de calentadores a fuego directo, los cuales son internos al recinto del calentador; así como a las tuberías sanitarias y pluviales y a las líneas localizadas dentro de las compañías que se regulan con el código B34.4 o B31.8 donde aplica normas gubernamentales.

ASME B31.4.

Este código prescribe requisitos mínimos para el diseño, materiales, construcción, ensamble, inspección y pruebas de tuberías que transportan líquidos tales como aceite crudo, condensados, gasolina natural y productos químicos del petróleo con presiones por encima de 15 psi y con temperaturas entre -20°F (-28.8 °C) y 250°F (121.11°C). La tubería consiste en tubo, bridas, tornillos, empaques, válvulas, piezas de alivio, accesorios y otros componentes de tuberías. También incluyen suspensores y soportes y otros equipos necesarios para prevenir el sobre esfuerzo de partes contenedoras de presión. No incluye estructuras de soporte como marcos de edificios, cementaciones. También se incluyen dentro del alcance de este código tuberías primarias y auxiliares de amoniaco anhidro y petróleo líquido en terminales, patios de tanque, estaciones de bombeo, estaciones reductores de presión, estaciones medidoras, incluyendo trampas, filtros y curvas de expansión. También aquellos aspectos de operación y mantenimiento de los sistemas de tuberías de transporte de amoniaco anhidro y petróleo líquido relacionados con la seguridad y protección del público en general y personal de las compañías de operación, medio ambiente, propiedades y sistemas de tuberías.

Este código no aplica a las líneas auxiliares como tuberías de agua, aire, vapor, aceite lubricante, gas y combustibles. Así como también a los recipientes de presión, cambiadores de calor, bombas, medidores y equipos semejantes incluyendo tuberías internas y conexiones; a las tuberías usadas en los pozos de aceites, cabezales de pozos separadores de gas y de aceite,

tanques de producción de aceite crudo, otras instalaciones de producción y tuberías interconectando estas instalaciones.

También no aplica a las Refinerías de petróleo, gasolina naturales, plantas de proceso de gas y amoniaco y a las tuberías de transporte y distribución de gas.

ASME B31.8.

Este código cubre el diseño, fabricación, instalación, inspección, prueba y aspectos de seguridad, de operación y mantenimiento de sistemas de distribución y transmisión de gas con temperatura de 230°F (110°C) hasta 450°F (232.22°C) en caso de temperaturas mayores usar el código B31.3. Se incluyen en el alcance de este código, equipos de almacenamiento de gas de tipo de tubería cerrada, fabricada o forjada del tubo o del tubo y accesorios y líneas de almacenamiento de gas.

Este código no aplica al diseño y manufactura de recipientes a presión cubiertos por el código ASME, calderas y recipientes a presión; a las tuberías de temperaturas del metal arriba de 450 °F (232.22°C) o debajo de -20 °F (-6.66°C), y tuberías después del medidor del consumidor.

Así como también a las tuberías de refinerías de petróleo o plantas de extracción de gasolina natural, tuberías en plantas de tratamiento de gas diferentes a la tubería troncal de gas y otros tipos de plantas procesadoras instaladas como parte del sistema de transporte de gas, plantas manufacturas de gas, plantas industriales o minas, a las tuberías de venteo para operar a presión atmosférica para gases de desecho de cualquier tipo.

También no aplica al diseño y manufactura de cambiadores de calor y sistemas de tuberías para el transporte líquido.

4.3. CÁLCULO DE ESFUERZOS ACTUANTES Y PERMISIBLES.

En este capítulo se presentan las ecuaciones utilizadas para el cálculo de los esfuerzos actuantes, así como también los esfuerzos permisibles establecidos por los códigos ASME B31.3, ASME B31.4 y ASME B31.8.

4.3.1. ASME B31.3.

- **Cálculo de esfuerzos circunferenciales (σ_H).**

Los esfuerzos circunferenciales debidos a presión interna, serán calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad (4.1)$$

donde:

P = Presión interna de diseño.

D = Diámetro nominal de la tubería.

t = Espesor de tubo

- **Cálculo de esfuerzos longitudinales (σ_L).**

Los esfuerzos longitudinales serán calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_L = \sigma_{axial} \pm \sigma_b \quad (4.2)$$

donde:

σ_L = Esfuerzo longitudinal actuante en un punto de la tubería.

σ_{axial} = Esfuerzo axial en el punto.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

$$= \frac{\sqrt{(i_i M_i)^2 + (i_o M_o)^2}}{Z} \quad (4.3)$$

i_i = Factor de intensificación de esfuerzos en el plano.

i_o = Factor de intensificación de esfuerzos fuera del plano.

M_i = Momento flexionante en el plano.

M_o = Momento flexionante fuera del plano.

Z = Módulo de sección.

- **Cálculo de esfuerzos por efectos de temperatura (σ_E).**

El rango de esfuerzos combinados por efectos de temperatura, será calculado con la siguiente expresión:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4\sigma_t^2} \quad (4.4)$$

donde:

σ_E = Esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

$\sigma_t = Mt / 2Z$ = Esfuerzo torsionante.

Mt = Momento torsional.

- **Esfuerzos permisibles circunferenciales.**

Los esfuerzos permisibles circunferenciales por presión interna no excederán el valor de lo siguiente:

$$\sigma_H \leq \sigma * E + 0.4P$$

donde:

σ = Esfuerzo básico permisible

E = Factor de calidad de junta

P = Presión interna de diseño

- **Esfuerzos permisibles longitudinales (σ_L).**

La suma de los esfuerzos longitudinales debidos a presión, peso propio y otras cargas sostenidas, no excederá el valor del esfuerzo permisibles para el material a la temperatura máxima esperada durante la operación (σ_h).

$$\sigma_L \leq \sigma_h$$

- **Esfuerzos permisibles para efectos de temperatura (σ_A).**

El rango de esfuerzos permisibles que representa la suma de los esfuerzos para las temperaturas máximas y mínimas que se puedan presentar en cualquier punto de la tubería durante un ciclo cualquiera de operación, está definido por la siguiente ecuación:

$$\sigma_A = f(1.25\sigma_c + 0.25\sigma_h) \quad (4.5)$$

donde:

σ_A = Rango de esfuerzos permisibles por efectos de temperatura.

σ_c = Esfuerzo permisible a la temperatura mínima.

σ_h = Esfuerzo permisible a la temperatura máxima de operación.

f = Factor de reducción del rango de esfuerzos por condiciones cíclicas de operación.

Cuando $\sigma_h > \sigma_L$, la diferencia entre ellos puede ser adicionada al término $0.25\sigma_h$ de la ecuación anterior, quedando de la siguiente manera:

$$\sigma_A = f(1.25)[(\sigma_c + \sigma_h) - \sigma_L] \quad (4.6)$$

Por lo que el esfuerzo actuante por temperatura (σ_E) no excederá del valor permisible (σ_A).

- **Otros límites de esfuerzos.**

La suma de esfuerzos longitudinales debidos a presión, peso propio y otras cargas sostenidas (σ_L) y los esfuerzos producidos por cargas ocasionales tales como viento y sismo,

no será mayor que 1.33 veces que el esfuerzo básico admisible indicado en apéndice “A” del código ANSI B31.3.

4.3.2. ASME B31.4.

- **Cálculo de esfuerzos circunferenciales (σ_H).**

Los esfuerzos circunferenciales debidos a presión interna serán calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad (4.7)$$

donde:

P = Presión interna de diseño.

D = Diámetro nominal de la tubería.

t = Espesor de tubo.

- **Cálculo de esfuerzos longitudinales (σ_L).**

Los esfuerzos longitudinales son calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_L = \sigma_{axial} \pm \sigma_b \quad (4.8)$$

donde:

σ_L = Esfuerzo longitudinal actuante en un punto de la tubería.

σ_{axial} = Esfuerzo axial en el punto.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

- **Cálculo de esfuerzos por efectos de temperatura (σ_E).**

El esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura se calculará con la siguiente expresión:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \sigma_t^2} \quad (4.9)$$

donde:

σ_E = Esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

$\sigma_t = Mt / 2Z$ = Esfuerzo torsionante.

Mt = Momento torsional.

- **Esfuerzos permisibles circunferenciales.**

Los esfuerzos permisibles circunferenciales por presión interna no excederán el valor de lo siguiente:

$$\sigma_H \leq 0.72 \cdot E \cdot S$$

donde:

E = Factor de calidad de junta.

S = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

- **Esfuerzos permisibles longitudinales (σ_L).**

La suma de los esfuerzos longitudinales debidos a presión, peso y otras cargas externas sostenidas, no excederán de $0.75\sigma_A$.

$$\sigma_L \leq 0.75\sigma_A$$

donde:

$\sigma_A = 0.72$ esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

- **Esfuerzos permisibles por efectos de temperatura (σ_E).**

El máximo rango de esfuerzos calculados (σ_E) no excederá el valor del permisible σ_A .

$$\sigma_E \leq \sigma_A$$

donde:

$\sigma_A = 0.72$ del esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

- **Otros límites de esfuerzos.**

La suma de los esfuerzos longitudinales debidos a presión, cargas vivas, cargas muertas y cargas accidentales tales como viento y sismo, no excederán del 80% del esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

4.3.3. ASME B31.8.

- **Cálculo de esfuerzos circunferenciales (σ_H).**

Los esfuerzos circunferenciales debidos a presión interna, serán calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_H = \frac{PD}{2t} \quad (4.10)$$

donde:

σ_H = Esfuerzo circunferencial.

P = Presión interna de diseño.

D = Diámetro nominal de tubería.

t = Espesor de tubo.

- **Cálculo de esfuerzos longitudinales (σ_L).**

Los esfuerzos longitudinales serán calculados con la siguiente expresión:

$$\sigma_L = \sigma_{axial} \pm \sigma_b \quad (4.11)$$

donde:

σ_L = Esfuerzo longitudinal actuante en un punto de la tubería.

σ_{axial} = Esfuerzo axial en el punto.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

- **Cálculo de esfuerzos por efectos de temperatura (σ_E).**

El esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura, se calculará con la siguiente expresión:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \sigma_t^2} \quad (4.12)$$

donde:

σ_E = Esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura.

σ_b = Resultante de esfuerzos flexionantes.

$\sigma_t = Mt / 2Z$ = Esfuerzo torsionante.

Mt = Momento torsional.

- **Esfuerzos permisibles circunferenciales.**

Los esfuerzos permisibles circunferenciales por presión interna no excederán el valor de lo siguiente:

$$\sigma_H \leq F \cdot E \cdot T \cdot S$$

donde:

E = Factor de calidad de junta.

T = Factor que depende de la temperatura de operación.

S = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

F = Factor de diseño por tipo de construcción.

- **Esfuerzos permisibles longitudinales (σ_L).**

La suma de los esfuerzos longitudinales debidos a presión, peso propio y cargas externas como viento, etc., no excederá del 75% del esfuerzo permisible a la temperatura de operación máxima.

$$\sigma_L \leq (S \cdot F \cdot T) 0.75$$

donde:

σ_L = Esfuerzos longitudinales, debido a cargas sostenidas.

σ = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

F = Factor de diseño por tipo de construcción.

T = Factor que varía dependiendo de la temperatura.

- **Esfuerzos permisibles por efectos de temperatura (σ_A).**

El máximo valor del esfuerzo debido a efectos de temperatura no será mayor de 0.725

$$\sigma_E \leq 0.725$$

donde:

σ_E = Esfuerzo actuante debido a efectos de temperatura.

σ = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

- **Otros límites de esfuerzos.**

El total de los esfuerzos siguientes, no será mayor que el valor del esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

- Esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura (σ_E).
- El esfuerzo longitudinal debido a presión (σ_L).
- El esfuerzo longitudinal flexionante debido a cargas externas (σ_L).

$$\sigma_L + \sigma_E \leq \sigma$$

4.4. REVISIÓN DE ESPESORES.

4.4.1. ASME B31.3.

El espesor requerido para tuberías de secciones rectas, deberá determinarse de acuerdo a la ecuación:

$$t_m = t + c \tag{4.13}$$

El espesor mínimo para la tubería seleccionada, considerando el espesor del fabricante menos la tolerancia, no debe ser menor de t_m .

El espesor de diseño de la tubería por presión interna, no deberá ser menor del calculado por la siguiente ecuación, cuando t sea menor de $D/6$.

$$t = \frac{P \cdot D}{2(\sigma \cdot E + P \cdot Y)} \tag{4.14}$$

Se puede utilizar alguna de las siguientes tres ecuaciones en el cálculo del espesor en lugar de la expresión anterior:

$$t = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma} \quad (4.15)$$

$$t = \frac{D}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma \cdot E - P}{\sigma \cdot E + P}} \right) \quad (4.16)$$

$$t = \frac{P(d + 2c)}{2(\sigma \cdot E - P(1 - Y))} \quad (4.17)$$

Las tuberías con espesor t igual o mayor que $D/6$, o con relación $P/\sigma E$ mayor que 0.385, requieren de una consideración especial en la que se contemplen aspectos como teorías de falla, de fatiga y esfuerzos térmicos.

La siguiente nomenclatura aplica a las ecuaciones anteriores:

t_m = Espesor mínimo requerido, incluyendo tolerancias mecánicas, por corrosión y erosión.

t = Espesor de diseño por presión.

c = Suma de tolerancias mecánicas (profundidad de las ranuras o filetes) más las tolerancias por corrosión y erosión. Cuando no es especificada se tomará el valor de 0.02 pulg.

d = Diámetro interior de la tubería.

P = Presión interna de diseño.

D = Diámetro exterior de la tubería.

E = Factor de calidad de junta.

σ = Esfuerzo básico permisible para una tubería.

Y = Coeficiente por tipo de material y temperatura.

Para $t < D/6$

$$\text{Para } t \geq D/6 \quad Y = \frac{d + 2c}{D + d + 2c}$$

4.4.2. ASME B31.4.

El espesor nominal de pared de tuberías de acero de secciones rectas deberá ser igual o mayor que t_n determinado con la siguiente ecuación:

$$t_n = t + A \quad (4.18)$$

El diseño del espesor de pared t por presión interna de una tubería de acero deberá calcularse con la siguiente ecuación:

$$t = \frac{P_i D}{2 \cdot \sigma} \quad (4.19)$$

La nomenclatura descrita a continuación, se utiliza en las ecuaciones anteriores:

t_n = Espesor de pared nominal que satisface los requerimientos por presión.

t = Espesor de pared de diseño por presión interna.

A = Suma de tolerancias por ranuras y filetes, así como por corrosión y erosión.

P_i = Presión interna de diseño.

σ = Valor del esfuerzo permisible aplicable y que para una tubería nueva de especificación conocida se calcula con la siguiente expresión:

$$\sigma = 0.72 * E * \sigma_s \quad (4.20)$$

donde:

0.72 = Factor de diseño basado en el espesor nominal de pared.

E = Factor de calidad de junta.

σ_s = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

4.4.3. ASME B31.8.

La presión de diseño para tuberías de acero que transportan gas o el espesor de pared nominal para una presión de diseño dada, deberá determinarse con la siguiente fórmula:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma_s \cdot t}{D} * F * E * T \quad (4.21)$$

$$t = \frac{PD}{2 \cdot \sigma_s * F * E * T} \quad (4.22)$$

donde:

P = Presión de diseño.

σ_s = Esfuerzo de cedencia mínimo especificado.

D = Diámetro exterior nominal de la tubería.

t = Espesor de pared nominal.

F = Factor de diseño por tipo de construcción.

E = factor de calidad de junta.

T = factor de reducción por temperatura.

Se deberá usar construcción tipo C en el diseño de tuberías en plataformas, así como en ductos ascendentes y se extenderá una distancia de por lo menos cinco diámetros de tubería después del codo, curva o accesorio inferior.

Las piezas de transición al final de esta tubería, no se consideran accesorios para efectos de este código.

4.5. FUERZAS Y MOMENTOS PERMISIBLES EN EQUIPOS.

En este capítulo se presenta algunas fórmulas para calcular fuerzas y momentos permisibles en algunos equipos.

4.5.1. Fuerzas y momentos permisibles en turbinas de vapor.

Las fuerzas y momentos actuantes sobre las boquillas de succión y descarga de las turbinas de vapor operadas con vapor, están limitadas por la siguiente expresión:

La fuerza total resultante y momento total resultante en las boquillas de la turbina no debe exceder de:

$$F = \frac{500 D - M_R}{3}$$

donde:

F = Fuerza permisible, lbs.

M_R = Momento resultante, lbs-pie

D = Diámetro nominal del tubo, pulg.

Cuando $D > 8$ pulgadas, se toma el valor de:

$$D = \frac{16 + D}{3}$$

El límite de la ecuación será cuando el momento resultante sea igual a 500 veces el diámetro del tubo, ya que la fuerza resultante sería cero.

- **Resultantes combinadas y sus componentes.**

Las resultantes combinadas de las fuerzas y momentos en las boquillas de succión y descarga de la turbina, actuando en los centros de líneas de la conexión de descarga, no deben exceder las siguientes condiciones:

$$a) \quad F_C = \frac{250 D_C - M_C}{2}$$

donde:

F_C = Resultante combinada de las fuerzas de la boquilla de succión y descarga, lbs.

M_C = Resultante combinada de momentos de las boquillas de succión y descarga, lbs-pie

D_C = Diámetro equivalente, in.

Cuando $D_C > 9$ pulgadas, se emplea el valor de:

$$D_C = \frac{18 + D_{\text{equivalente}}}{3}$$

donde:

$$D_{\text{equivalente}} = \sqrt{D_{\text{succión}}^2 + D_{\text{descarga}}^2}$$

b) No debe exceder de:

$$F_X = 50 D_C$$

$$F_Y = 125 D_C$$

$$F_Z = 100 D_C$$

$$M_X = 250 D_C$$

$$M_Y = 125 D_C$$

$$M_Z = 125 D_C$$

donde:

F_X = Componente horizontal de F_C paralela a la flecha de la turbina, lbs.

F_Y = Componente vertical de F_C , lbs.

F_X = Componente horizontal de F_C en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs.

M_X = Componente de M_C en un plano vertical en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs-pie.

M_Y = Componente de M_C en el plano horizontal, lbs-pie.

M_Z = Componente de M_C en un plano vertical paralelo a la flecha de la turbina, lbs-pie.

- **Componentes de las resultantes reales.**

Las ecuaciones siguientes son usadas para obtener las componentes de las fuerzas y momentos actuantes a lo largo del eje especificado en la boquilla de succión:

$$\sum F_X = F_{XS} + F_{Xd}$$

$$\sum F_Y = F_{YS} + F_{Yd}$$

$$\sum F_Z = F_{ZS} + F_{Zd}$$

$$\sum M_X = M_{XS} + M_{Xd} - F_{Yd} Z_1 + F_{Zd} Y_1$$

$$\sum M_Y = M_{YS} + M_{Yd} + F_{Xd} Z_1 - F_{Zd} X_1$$

$$\sum M_Z = M_{ZS} + M_{Zd} - F_{Xd} Y_1 + F_{Yd} X_1$$

donde:

S = Succión

d = Descarga

X₁, Y₁ y Z₁ = Distancia entre las boquillas de la turbina, pies.

4.5.2. Fuerzas y momentos permisibles en compresores.

El método de determinar las fuerzas y momentos permisibles, es semejante al empleado en turbinas de vapor.

Las fórmulas son:

$$F_r = 1.85 \left(167 D - \frac{M_r}{3} \right)$$

donde:

F_r = Fuerzas resultantes permisibles, pulg.

D = Diámetro nominal, pulg.

M_r = Momento resultante, lbs-pie.

- **Resultantes combinadas y sus componentes.**

No debe exceder las siguientes condiciones:

a) $F_c = 1.85 \left(\frac{250 D_c - M_c}{2} \right)$

donde:

F_c = Fuerza resultante combinada, lbs

D_c = Diámetro equivalente, pulg.

M_c = Momento resultante, lbs-pie.

Cuando $D > 9$ pulgadas, se emplea:

$$D_c = \frac{18 + D_{\text{equivalente}}}{3}$$

$$D_{\text{equivalente}} = \sqrt{d_{\text{succión}}^2 + D_{\text{descarga}}^2}$$

b)

$$F_x = 1.85 \cdot 50 D_c$$

$$F_y = 1.85 \cdot 125 D_c$$

$$F_z = 1.85 \cdot 100 D_c$$

$$M_x = 1.85 \cdot 250 D_c$$

$$M_y = 1.85 \cdot 250 D_c$$

$$M_z = 1.85 \cdot 125 D_c$$

donde:

F_x = Componente horizontal de F_c paralela a la flecha de la turbina, lbs.

F_y = Componente vertical de F_c , lbs.

F_z = Componente horizontal de F_c en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs.

M_x = Componente de M_c en el plano vertical en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs-pie

M_y = Componente de M_c en un plano horizontal, lbs-pie.

M_z = Componente de M_c en un plano vertical paralelo a la flecha de la turbina, lbs-pie.

- **Componentes de las resultantes reales.**

$$\sum F_X = F_{XS} + F_{Xd}$$

$$\sum F_Y = F_{YS} + F_{Yd}$$

$$\sum F_Z = F_{ZS} + F_{Zd}$$

$$\sum M_X = M_{XS} + M_{Xd} - F_{Yd} Z_1 + F_{Zd} Y_1$$

$$\sum M_Y = M_{YS} + M_{Yd} + F_{Xd} Z_1 - F_{Zd} X_1$$

$$\sum M_Z = M_{ZS} + M_{Zd} - F_{Xd} Y_1 + F_{Yd} X_1$$

donde:

S = Succión.

d = Descarga.

X_1, Y_1 y Z_1 = Distancia entre las boquillas de la turbina, pies.

4.5.3. Fuerzas y momentos permisibles en bombas.

Las fuerzas y momentos permisibles que se dan en la tabla son aplicables a bombas con boquillas de succión de 12 in. y menores, para diámetros mayores deberán ser proporcionadas por el fabricante.

Fuerzas y Momentos	Diámetro nominal (in.)						
	2	3	4	6	8	10	12
Boquilla Superior							
Fx	300	480	640	1020	1700	2400	3000
Fy (compresión)	400	600	800	1400	2200	3000	3600
Fy (Tensión)	200	300	400	700	1060	1500	1840
Fz	260	400	520	920	1400	2000	2400
Boquilla Lateral							
Fx	320	480	540	1120	1700	2400	3000
Fy	260	400	520	920	1400	2000	2400
Fz	400	500	800	1400	2200	3000	3600
Boquilla Frontal							
Fx	400	600	800	1400	2200	3000	3600
Fy	260	400	520	920	1400	2000	2400
Fz	320	480	640	1120	1700	2400	3000
Boquilla en cualquier posición							
Mx	680	1400	1960	3400	5200	7400	9000
My	520	1060	1480	2600	3800	5600	6800
Mz	340	700	1000	1740	2600	3600	4400

Tabla 4.1. Fuerzas y Momentos permisibles.

En la tabla se proporcionan las fuerzas resultantes y momentos resultantes permisibles, sin embargo, en ningún caso las fuerzas y momentos en cualquier dirección deberán ser mayores a las indicadas en la tabla.

Fuerzas y Momentos	Diámetro nominal (in.)						
	2	3	4	6	8	10	12
Fr	430	640	860	1500	2300	2700	2900
Mr	640	1400	2000	3500	5200	6600	8200

Tabla 4.2. Fuerzas y Momentos resultantes permisibles

Podrán obtenerse valores diferentes a los de la tabla si son cumplidas las dos condiciones siguientes:

Debido a que las boquillas de la bomba no siempre estarán sujetas simultáneamente a las fuerzas y momentos resultantes máximas permisibles, pueden incrementarse tomando en cuenta las siguientes limitaciones:

$$\frac{F_a}{F_r} + \frac{M_a}{M_r} \leq 2.0$$

$$\frac{M_a}{M_r} \leq C$$

$$C = 2 \quad \text{Para tuberías de 6 pulg y menores}$$

$$C = \frac{D + 6}{D} \quad \text{Para tuberías de 8 a 12 in}$$

donde:

F_x, y, z = Fuerzas actuantes. lbs

M_x, y, z = Momentos actuantes, lbs-pie

M_a = Momento resultante en la boquilla, lbs-pie

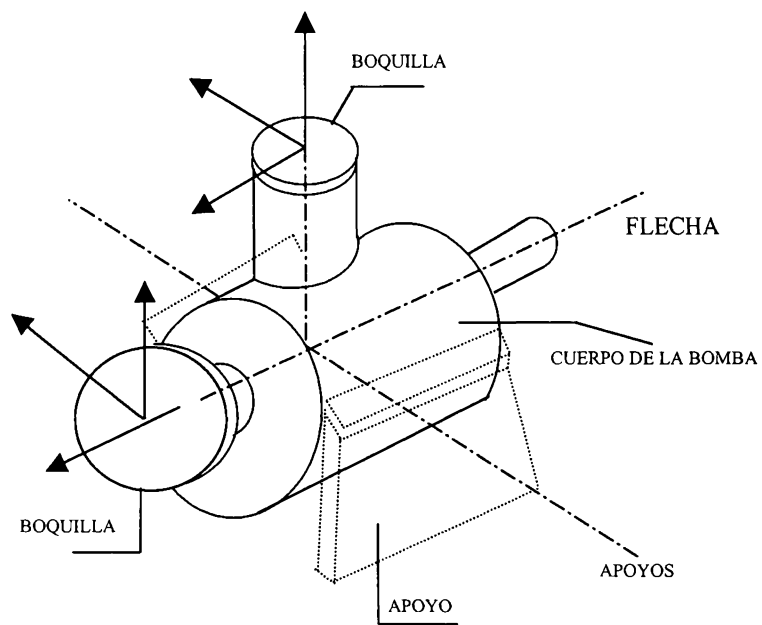
M_r = Momento resultante permisible, lbs-pie

F_a = Fuerza resultante en la boquilla, lbs-pie

F_r = Fuerza resultante permisible, lbs-pie

D = Diámetro nominal, in.

Las fuerzas y momentos resultantes pueden incrementarse hasta el doble del valor indicado en la tabla 4.2, si el límite combinado máximo aplicado sobre el equipo instalado, no es excedido. El límite es determinado por la suma de fuerzas y momentos de la tabla 4.1 sobre ambas boquillas simultáneamente, tomando a partir del punto definido por la intersección de los ejes de la flecha y el centro de la línea de los apoyos de la bomba.



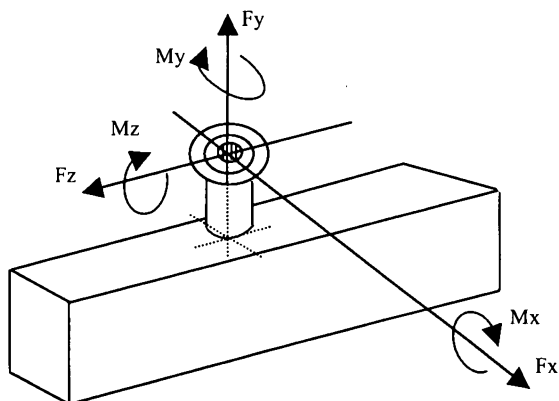
4.5.4. Fuerzas y momentos permisibles en enfriadores por aire.

Fuerzas y Momentos	Diámetro nominal (in.)						
	2	3	4	6	8	10	12
Fx	150	300	500	600	850	1000	1250
Fy	200	250	400	750	2000	2000	2000
Fz	150	300	500	750	1500	1500	2000
Mx	70	200	400	1050	1500	2000	2500
My	120	300	600	1500	3000	3000	3000
Mz	70	200	400	800	1100	1250	1500

Tabla 4.3. Fuerzas y momentos permisibles en enfriadores por aire.

$F_x, F_y, F_z = \text{lbs.}$

$M_x, M_y, M_z = \text{lbs-pie.}$



4.5.5. Fuerzas y momentos permisibles en hornos.

Fuerzas y Momentos	Diámetro nominal (in.)						
	2	3	4	6	8	10	12
F_x	100	150	200	230	300	350	400
F_y	200	300	400	500	600	650	700
F_z	200	300	400	500	600	650	700
M_x	350	450	600	730	860	930	1000
M_y	250	350	450	550	650	700	750
M_z	250	350	450	550	650	700	750

Tabla 4.4. Fuerzas y momentos permisibles en hornos.

$F_x, F_y, F_z = \text{lbs.}$

$M_x, M_y, M_z = \text{lbs-pie.}$

4.6. CÁLCULOS DE ESFUERZO CON EL PROGRAMA AUTOPIPE.

A continuación se presenta formulas que emplea el programa AutoPipe para el cálculo de los esfuerzos, con los diferentes códigos mas utilizados en el análisis de tuberías.

4.6.1. ASME B31.3.

Tuberías para plantas químicas y refinerías de petróleo.

- **Esfuerzo circunferencial.**

El esfuerzo circunferencial (*Shoop*) es calculado por la ecuación 3a del código, como se muestra en la ecuación siguiente:

$$Shoop = \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot t_{red} \cdot z_L} - \frac{P \cdot Y}{z_L} \quad (4.23)$$

donde:

P = Presión interna de diseño.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

Y = Coeficiente de esfuerzo circunferencial.

t_{red} = Reducción (residual) del espesor de pared de la tubería.

z_L = Factor de soldadura para tuberías soldadas y montajes que tienen soldaduras longitudinales o espirales.

- **Esfuerzos debido a cargas sostenidas.**

a) Caso sin análisis de presión.

El esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L) es calculada en la forma siguiente:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 + (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} \quad (4.24)$$

donde:

M_{is} = Momentos de flexión en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos de flexión fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

b) Caso con análisis de presión.

El esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L), se calcula en la forma siguiente:

- M_{is} y M_{os} incluye ambos momentos el de gravedad y el de presión.
- σ_L es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 + (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} + \frac{4 \cdot F_{ax}}{\pi \cdot (D_o^2 - d_{cor}^2)} \quad (4.25)$$

La tensión es positiva en la fuerza axial (F_{ax})

donde:

M_{is} = Momentos de flexión en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos de flexión fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

F_{ax} = Fuerza axial en la tubería.

d_{cor} = diámetro interior de la tubería corroída.

- **Esfuerzos debido a cargas ocasionales.**

El esfuerzo debido a cargas combinadas y ocasionales (σ_{Lo}) es calculada por la ecuación 18 del código y es mostrado como sigue:

$$\sigma_{Lo} = \sigma_L + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{io})^2 + (i_o \cdot M_{oo})^2}}{z_{cor}} \quad (4.26)$$

donde:

M_{is} = Momentos de flexión en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos de flexión fuera del plano debido a carga sostenida.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

- **Rango de esfuerzo de expansión termal.**

El esfuerzo debido a la expansión termal (σ_E) es calculado en la forma siguiente:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \sigma_t^2} \quad (4.27)$$

donde:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{it})^2 + (i_o \cdot M_{ot})^2}}{Z_{nom}} \quad (4.28)$$

y

$$\sigma_t = \frac{M_{tt}}{2 \cdot Z_{nom}} \quad (4.29)$$

donde:

M_{it} = Momentos flexionante en el plano debido a la expansión termal.

M_{ot} = Momentos flexionante fuera del plano debido a la expansión termal

M_{tt} = Momentos flexionante por torsión debido a la expansión termal

Z_{nom} = Módulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

M_c = Momento resultante debido a la expansión termal.

4.6.2. ASME B31.4.

Sistemas de transporte de líquidos para hidrocarburos, gas de petróleo, amoniaco anhidro y alcoholes.

- **Esfuerzo circunferencial.**

El esfuerzo circunferencial (Shoop) es calculado de la forma siguiente:

$$Shoop = \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot t_{cor} \cdot z_L} - \frac{P \cdot Y}{z_L} \quad (4.30)$$

donde:

P = Presión interna de diseño.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

Y = Coeficiente de esfuerzo circunferencial.

t_{cor} = Corrosión del espesor de pared de la tubería.

z_L = Factor de soldadura para tuberías soldadas y montajes que tienen soldaduras longitudinales o espirales.

- **Esfuerzos debido a cargas sostenidas.**

a) Caso sin análisis de presión.

El esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L) es calculado por la ecuación mostrada:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 + (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} \quad (4.31)$$

donde:

M_{is} = Momentos de flexión en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos de flexión fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

b) Caso con análisis de presión.

El esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L), se calcula de la forma siguiente:

- M_{is} y M_{os} incluye ambos momentos el de gravedad y el de presión.
- σ_L es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} - \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 + (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} + \frac{4 \cdot F_{ax}}{\pi \cdot (D_o^2 - d_{cor}^2)} \quad (4.32)$$

La tensión es positiva en la fuerza axial (F_{ax})

donde:

M_{is} = Momentos de flexión en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos de flexión fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

F_{ax} = Fuerza axial en la tubería.

d_{cor} = diámetro interior de la tubería corroída.

- **Esfuerzos debido a cargas ocasionales.**

El esfuerzo debido a cargas combinadas y ocasionales (σ_{Lo}) es calculado por:

$$\sigma_{Lo} = \sigma_L + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{io})^2 + (i_o \cdot M_{oo})^2}}{z_{cor}} \quad (4.33)$$

donde:

M_{io} = Momentos de curvatura de torsión debido a carga ocasional.

M_{oo} = Momentos de curvatura de torsión debido a carga ocasional.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

- **Rango de esfuerzo de expansión termal.**

El esfuerzo debido a la expansión termal (σ_E) se calcula por la ecuación listada en el párrafo siguiente:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \sigma_t^2} \quad (4.34)$$

donde:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{it})^2 + (i_o \cdot M_{ot})^2}}{Z_{cor}} \quad (4.35)$$

y

$$\sigma_t = \frac{M_{tt}}{2 \cdot Z_{cor}} \quad (4.36)$$

donde:

M_{it} = Momentos flexionante en el plano debido a la expansión termal.

M_{ot} = Momentos flexionante fuera del plano debido a la expansión termal.

M_{tt} = Momentos flexionante por torsión debido a la expansión termal.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

M_c = Momento resultante debido a la expansión termal.

4.6.3. ASME B31.8.

Sistemas de tuberías para transporte y distribución de gas.

- **Esfuerzo circunferencial.**

El esfuerzo circunferencial (Shoop) es calculado por la ecuación siguiente:

$$Shoop = \frac{P \cdot D_o}{2 \cdot t_{nom} \cdot z_L} - \frac{P \cdot Y}{z_L} \quad (4.37)$$

donde:

P = Presión interna de diseño.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

Y = Coeficiente de esfuerzo circunferencial.

t_{nom} = Espesor nominal de la pared de la tubería.

z_L = Factor de soldadura para tuberías soldadas y montajes que tienen soldaduras longitudinales o espirales.

- **Esfuerzos debido a cargas sostenidas.**

a) Caso sin análisis de presión.

El esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L) es calculado por la ecuación mostrada:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 + (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} \quad (4.38)$$

donde:

M_{is} = Momentos flexionante en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos flexionante fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

b) Caso con análisis de presión.

Para esfuerzo debido a cargas sostenidas (σ_L), se deben de realizar dos cambios al procedimiento mostrado anteriormente:

- M_{is} y M_{os} incluye ambos momentos el de gravedad y el de presión.
- σ_L es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_L = \frac{P \cdot D_o}{4 \cdot t_{cor} \cdot z_C} - \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{is})^2 \cdot (i_o \cdot M_{os})^2}}{z_{cor}} + \frac{4 \cdot F_{ax}}{\pi \cdot (D_o^2 - d_{cor}^2)} \quad (4.39)$$

La tensión es positiva en la fuerza axial (F_{ax})

donde:

M_{is} = Momentos flexionante en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos flexionante fuera del plano debido a carga sostenida.

P = Presión de diseño interno.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

F_{ax} = Fuerza axial en la tubería.

d_{cor} = diámetro interior de la tubería corroído.

- **Esfuerzos debido a cargas ocasionales.**

El esfuerzo debido a cargas combinadas y ocasionales (σ_{Lo}) es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_{Lo} = \sigma_L + \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{io})^2 + (i_o \cdot M_{oo})^2}}{z_{cor}} \quad (4.40)$$

donde:

M_{io} = Momentos flexionante en el plano debido a carga ocasional.

M_{oo} = Momentos flexionante fuera del plano debido a carga ocasional.

z_{cor} = Modulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

- **Rango de esfuerzo de expansión termal.**

El esfuerzo debido a la expansión termal (σ_E) es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_E = \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \cdot \sigma_t^2} \quad (4.41)$$

donde:

$$\sigma_b = \frac{\sqrt{(i_i \cdot M_{it})^2 + (i_o \cdot M_{ot})^2}}{Z_{cor}} \quad (4.42)$$

y

$$\sigma_t = \frac{M_{tt}}{2 \cdot Z_{cor}} \quad (4.43)$$

donde:

M_{it} = Momentos flexionantes en el plano debido a la expansión termal.

M_{ot} = Momentos flexionantes fuera del plano debido a la expansión termal.

M_{tt} = Momentos flexionantes por torsión debido a la expansión termal.

Z_{cor} = Módulo de sección de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

M_c = Momento resultante debido a la expansión termal.

- **Combinación de esfuerzos.**

El esfuerzo total (σ_T) producido por la combinación de expansión, presión longitudinal y curvatura longitudinal (debido a carga sostenida y cargas ocasionales) es calculado por la ecuación siguiente:

$$\sigma_T = (\sigma_E)_{max} + (\sigma_{LO})_{max}$$

Donde los términos σ_E y el σ_{LO} representan la condición de operación de carga y combinación de cargas sostenidas y ocasionales que producen máximos esfuerzos.

4.7. OBSERVACIONES.

El código B31.3 maneja todos los sistemas de tuberías dentro de los límites de propiedad de las instalaciones que procesan o manejan petróleo, y ya que una batería de separación maneja petróleo además de utilizar sistemas auxiliares (servicios) para funcionamiento, el código B31.3 es el adecuado para el diseño de una batería de separación.

El código B31.4 marca en su alcance el transporte de fluidos líquidos entre las instalaciones y los puntos de recibo y/o entrega y hace la observación de que se puede diseñar tuberías que transporten líquidos dentro de las refinerías sólo en lugares reservados para estas líneas, es decir, se refiere a tuberías que cruzan los límites de propiedad de una instalación o que parten de la instalación hacia un punto de entrega.

El código B31.8 se emplea únicamente para líneas de distribución y transporte de gas, así como para el diseño de estaciones de compresión.

Del análisis de esfuerzos permisibles se desprende que el código B31.8, es mas exigente cuando se refiere a estaciones de compresión y a zonas densamente pobladas, dando

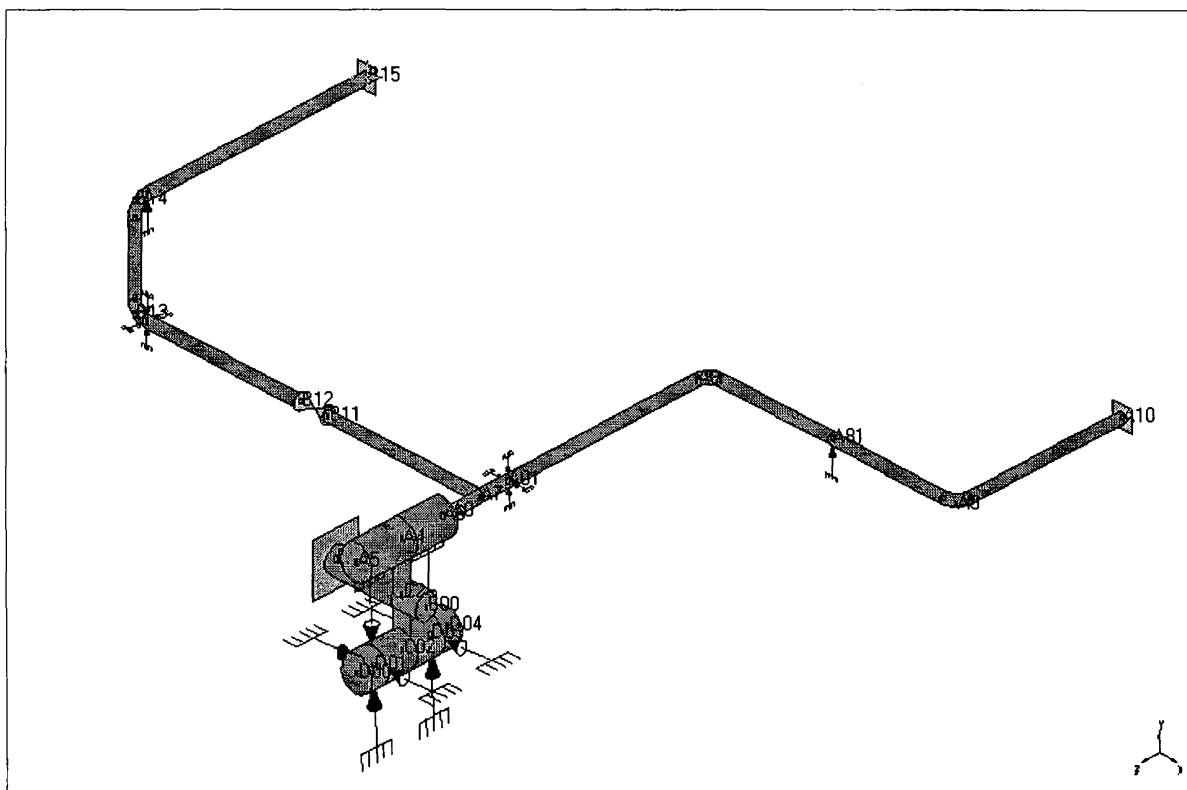
límites de esfuerzos similares a los B31.3. Asimismo, tratándose de zonas despobladas, los códigos B31.8 y B31.4 arrojan el mismo esfuerzo permisible.

Los códigos son específicos en sus planteamientos y sus posibles desviaciones en su aplicación deben ser analizados como problemas particulares y se recomienda que sean avalados por las diferentes entidades involucradas tales como: proyectos, construcción, operación, seguridad, etc.

5. APLICACIÓN DE FÓRMULAS DE FRACTURAS EN CILINDROS CON GRIETAS PARA EL CÁLCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE ESFUERZO.

5.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Empleando como modelo el sistema siguiente que consta de una tubería de acero de 6 pulgadas que está conectado a un compresor, la cual transporta gas natural con una temperatura de 70°F (21.11°C) y una presión interna de 440 psi (lb/in²). Para encontrar los esfuerzos y momentos a los cuales está sometido el sistema se utilizó el programa AutoPipe, con el cual se encontró que el esfuerzo máximo se presentó en el nodo A07. Como dicho nodo fue el más esforzado se eligió a éste para realizar el estudio paramétrico que se detalla a continuación.

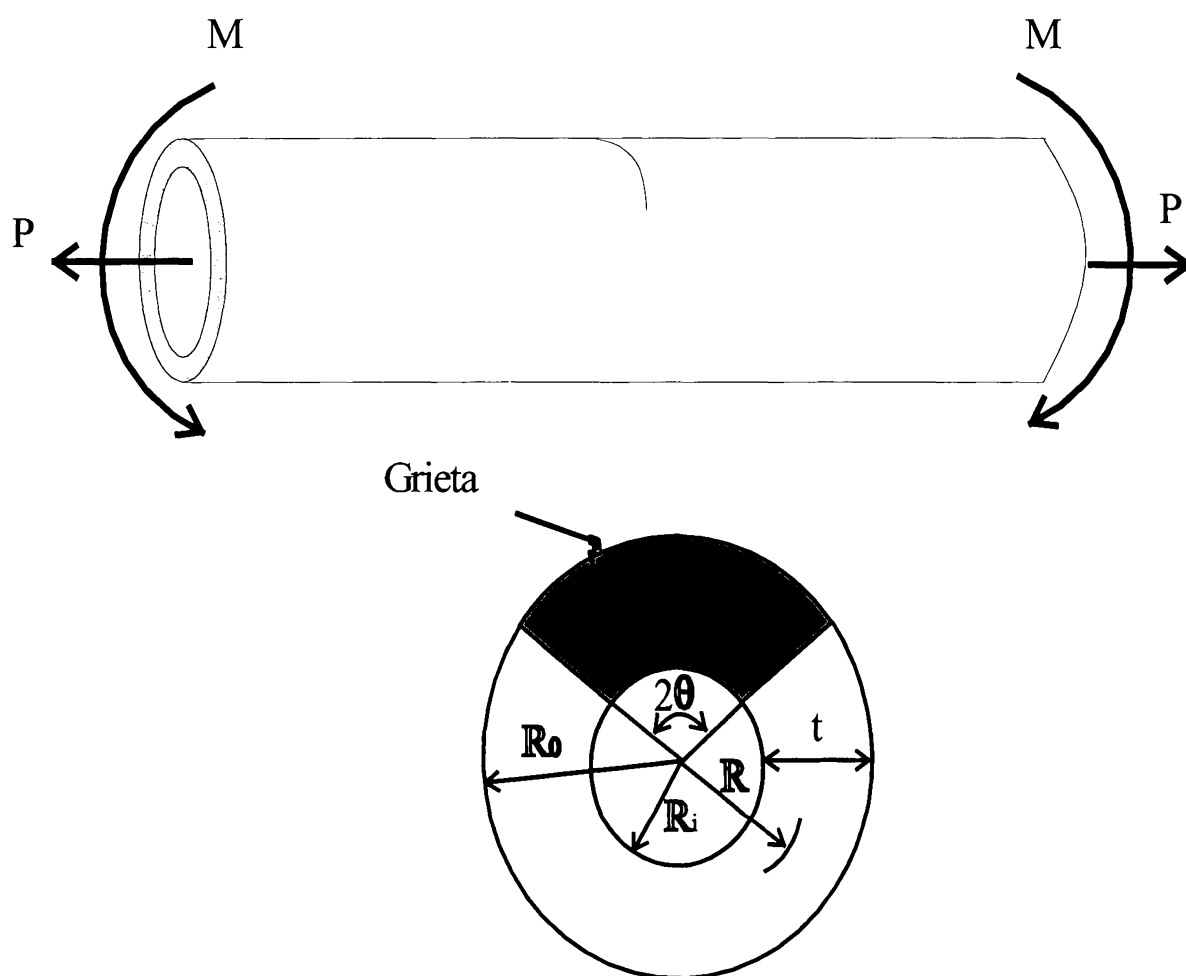


5.2. ESTUDIO PARAMÉTRICO.

Para poder realizar el estudio paramétrico de las ecuaciones de la mecánica de la fractura, se consideraron las configuraciones agrietadas más comunes que se presentan en las tuberías, las cuales se describen en las figuras siguientes. Los valores correspondientes a los diámetros, espesores, temperaturas y presiones son datos obtenidos de las normas y especificaciones ASME, por lo tanto corresponden a tuberías que son de uso común en las líneas de conducción de hidrocarburos.

Debido a que los valores de los espesores y diámetros de las tuberías cambian a lo largo de su vida útil, es muy importante conocer el comportamiento de éstas al variar ambos parámetros. Además las presiones de trabajo en las tuberías no siempre tienen los mismos valores, es decir, dependen de las condiciones necesarias para transportar determinado producto, por lo tanto este es un parámetro que merece la pena analizar.

5.3. CILINDRO SOMETIDO A FLEXIÓN Y TENSION COMBINADOS.



5.3.1. Tensión axial.

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\pi R \theta} F_t \quad (5.1)$$

donde:

$$\sigma_t = \frac{P}{2\pi R t}$$

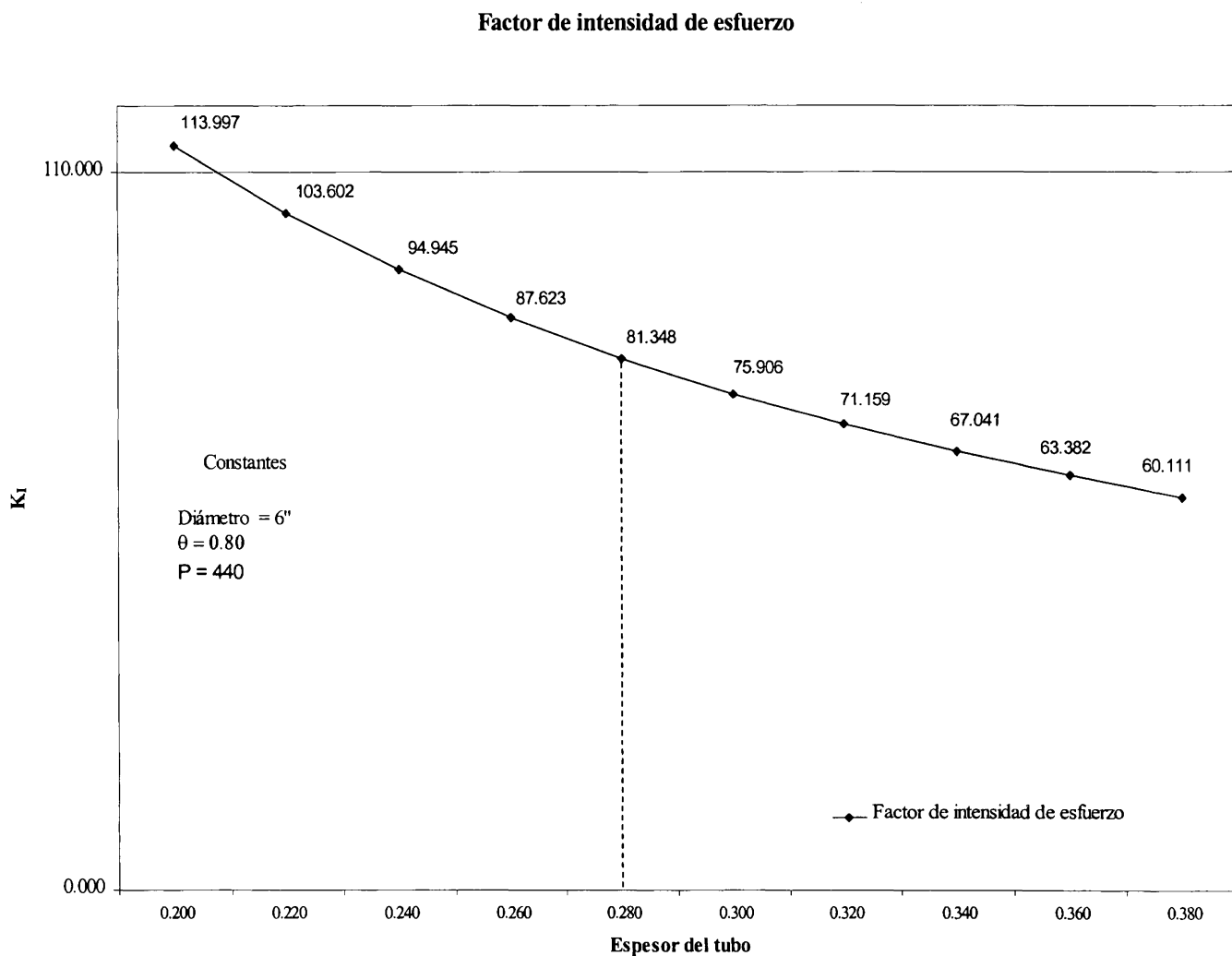
$$F_t = 1 + A \left[5.3303 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{1.5} + 18.733 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{4.24} \right]$$

$$A = \left(0.125 \frac{R}{t} - 0.25 \right)^{0.25} \quad \text{para } 5 \leq \frac{R}{t} \leq 10$$

$$A = \left(0.4 \frac{R}{t} - 3.0 \right)^{0.25} \quad \text{para } 10 \leq \frac{R}{t} \leq 20$$

- **Variación del espesor.**

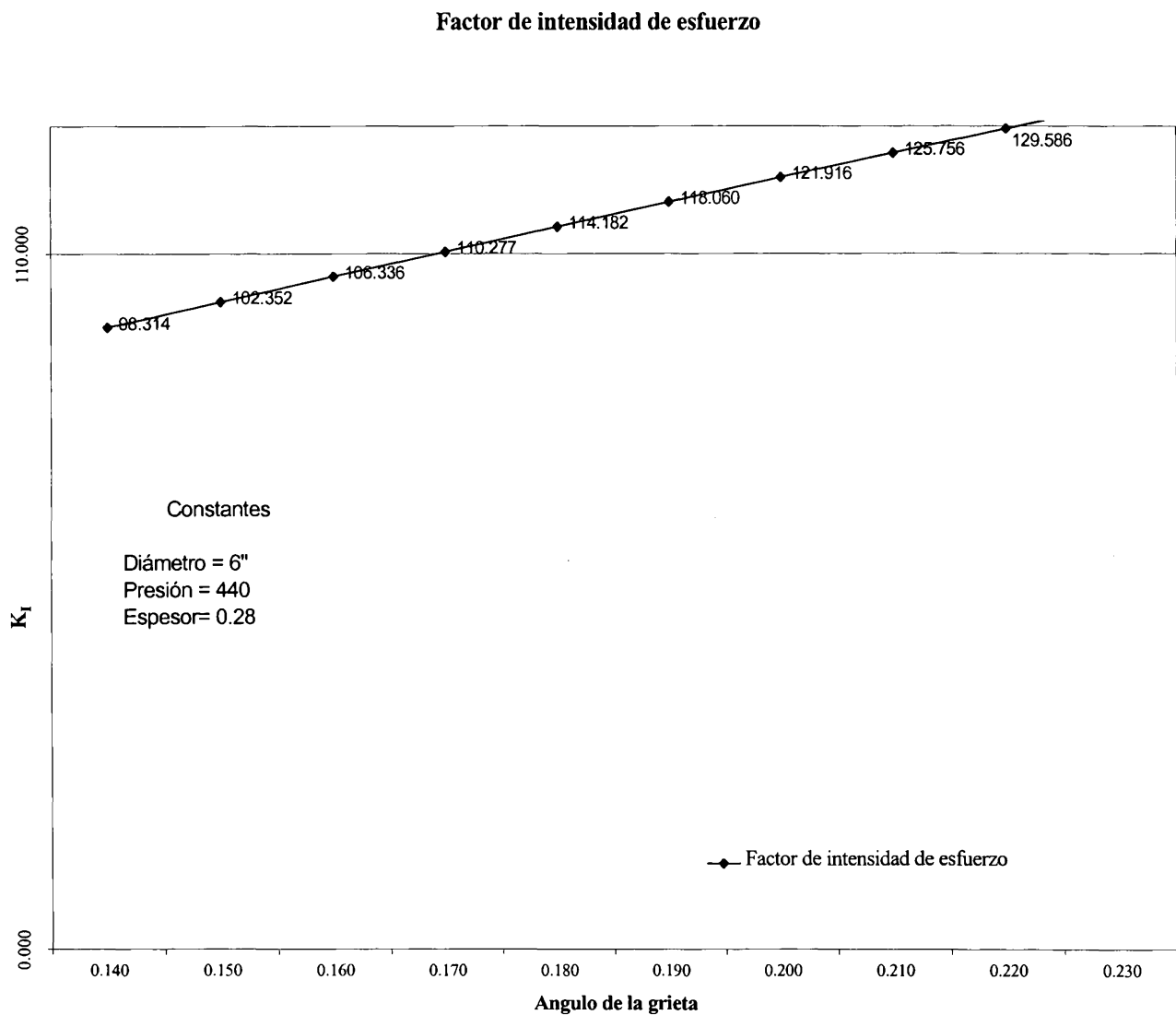
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.1, cuando el espesor varía de 0.2 - 0.38 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.1. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación del ángulo de la grieta.**

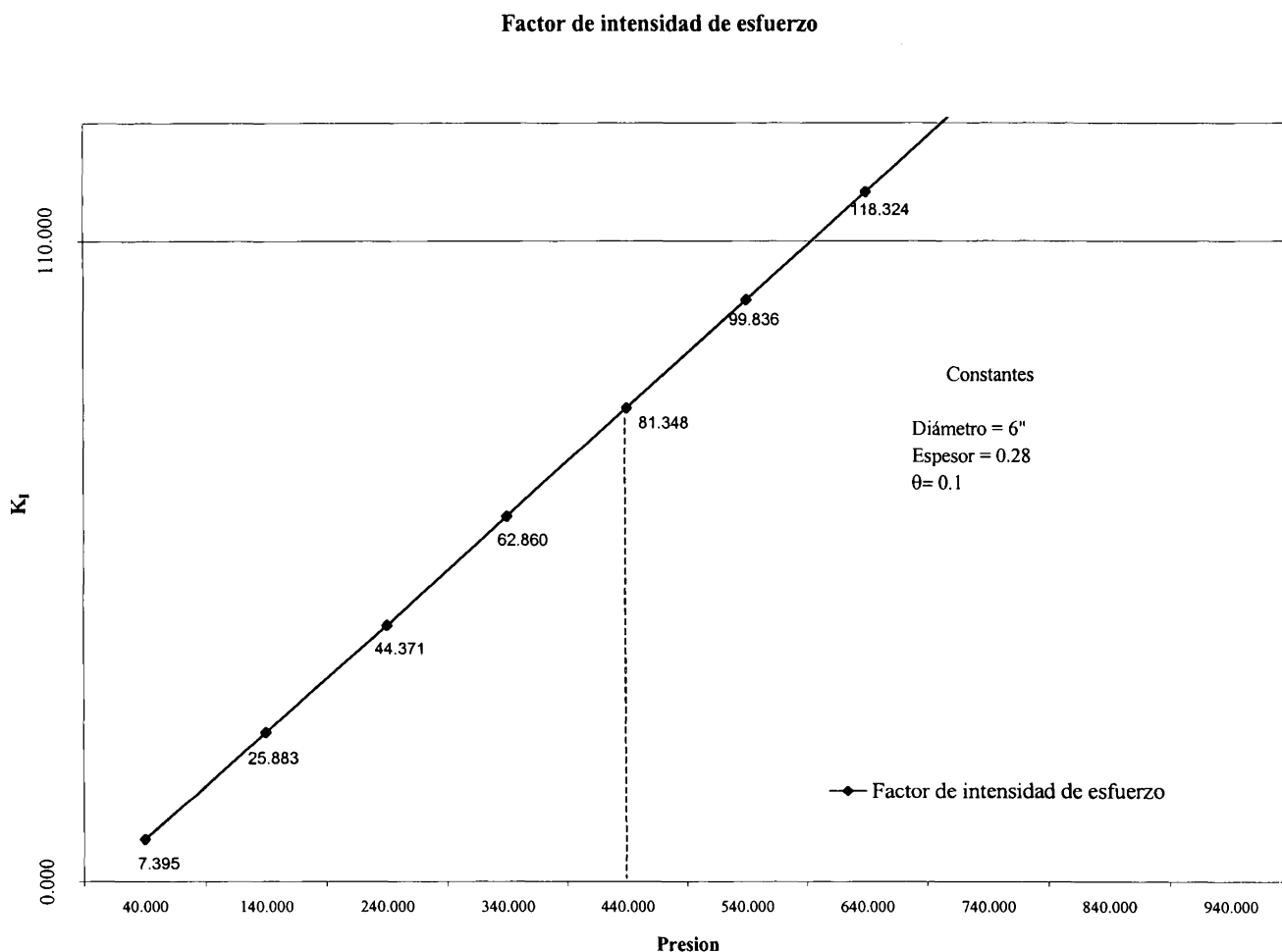
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.1, cuando el ángulo de la grieta varía de 0.140 – 0.230 radianes manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.2. Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación de la presión.**

Aquí podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.1, cuando presión varía de 40.0 – 940.0 °F manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.3. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.3.2. Momento flexionante.

$$K_f = \sigma_f \sqrt{\pi R \theta} F_f \quad (5.2)$$

donde:

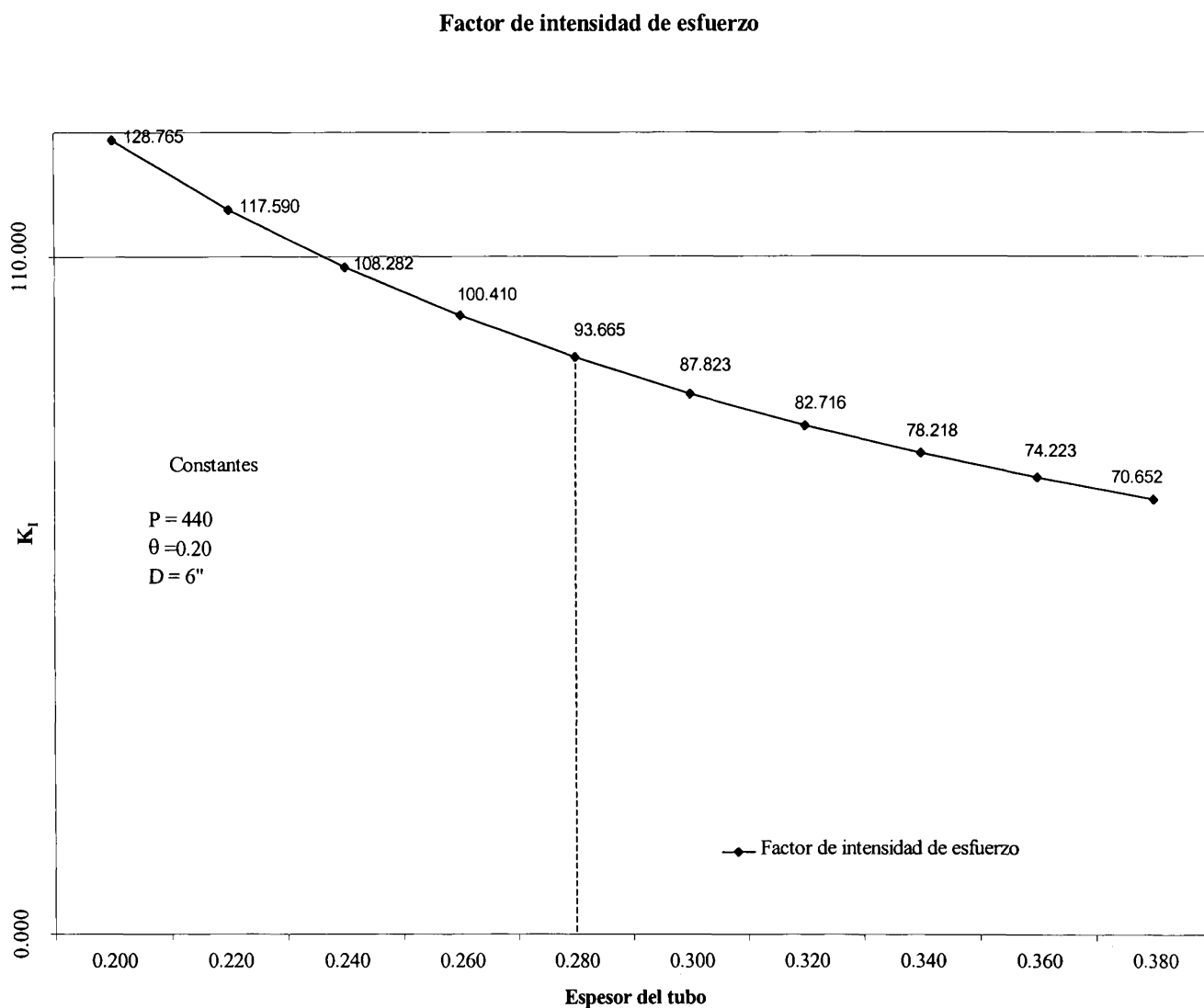
$$\sigma_f = \frac{M}{\pi R^2 t}$$

$$F_f = 1 + A \left[4.5967 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{1.5} + 2.6422 \left(\frac{\theta}{\pi} \right)^{4.24} \right]$$

donde A se definió arriba para el caso de tensión pura.

- **Variación del espesor.**

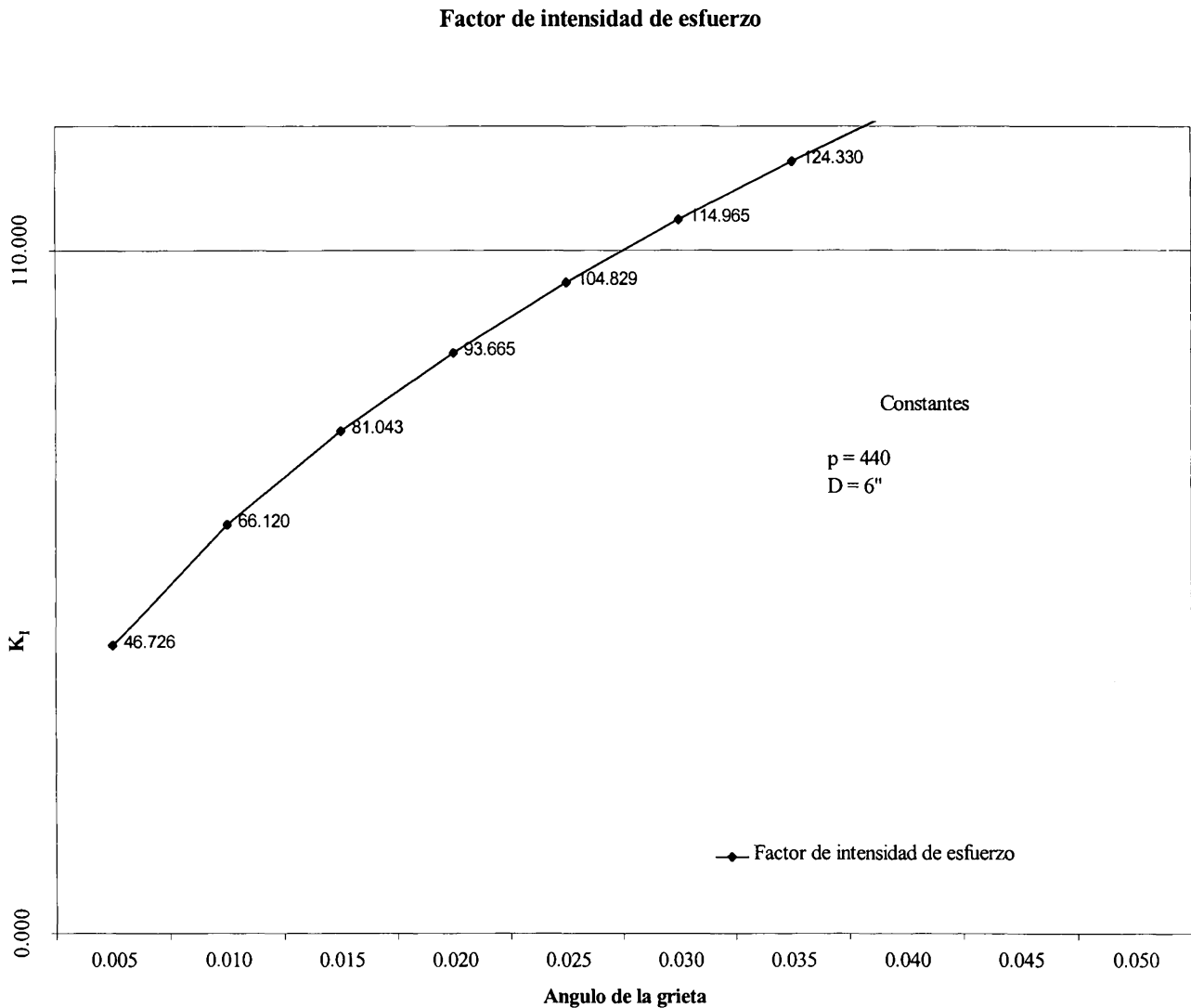
En la siguiente gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.2, cuando el espesor varía de 0.200 - 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, etc.).



Gráfica 5.4. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación del ángulo de la grieta.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.2, cuando el ángulo de la grieta varía de 0.005 - 0.050 radianes manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.5. Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.3.3. Presión interna.

$$K_I = \sigma_m \sqrt{\pi R \theta} F_m \quad (5.3)$$

donde:

$$\sigma_m = \frac{pR}{2t}$$

$$F_m = 1 + 0.1501\gamma^{1.5} \quad \text{para } \gamma < 2$$

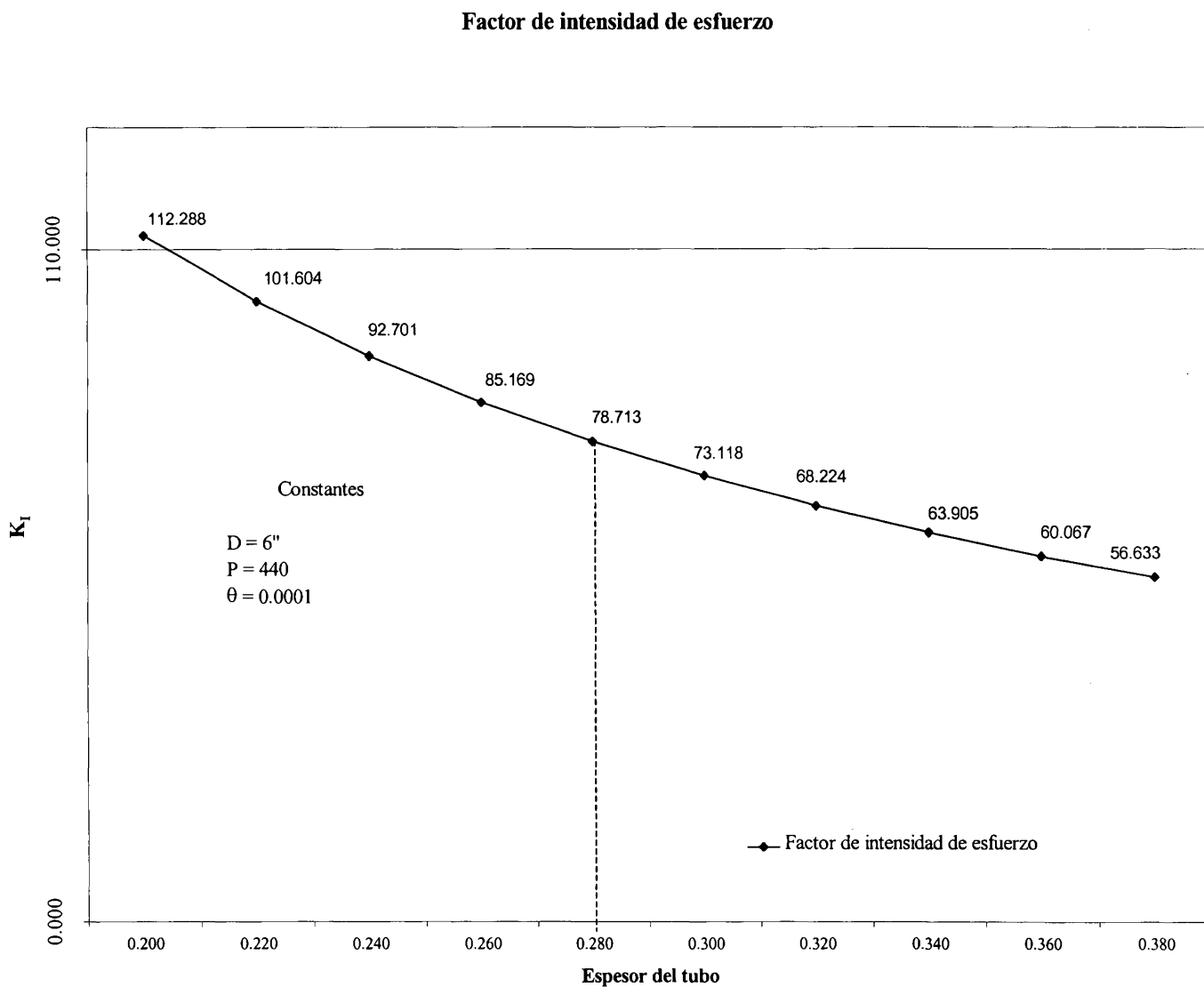
$$F_m = 0.8875 + 0.2625\gamma \quad \text{para } 2 \leq \gamma \leq 5$$

$$\gamma = \theta \sqrt{\frac{R}{t}}, \quad R = \frac{R_o + R_i}{2}$$

para estos casos R es igual al radio medio y θ es la mitad del ángulo de la grieta en radianes.

- **Variación del espesor.**

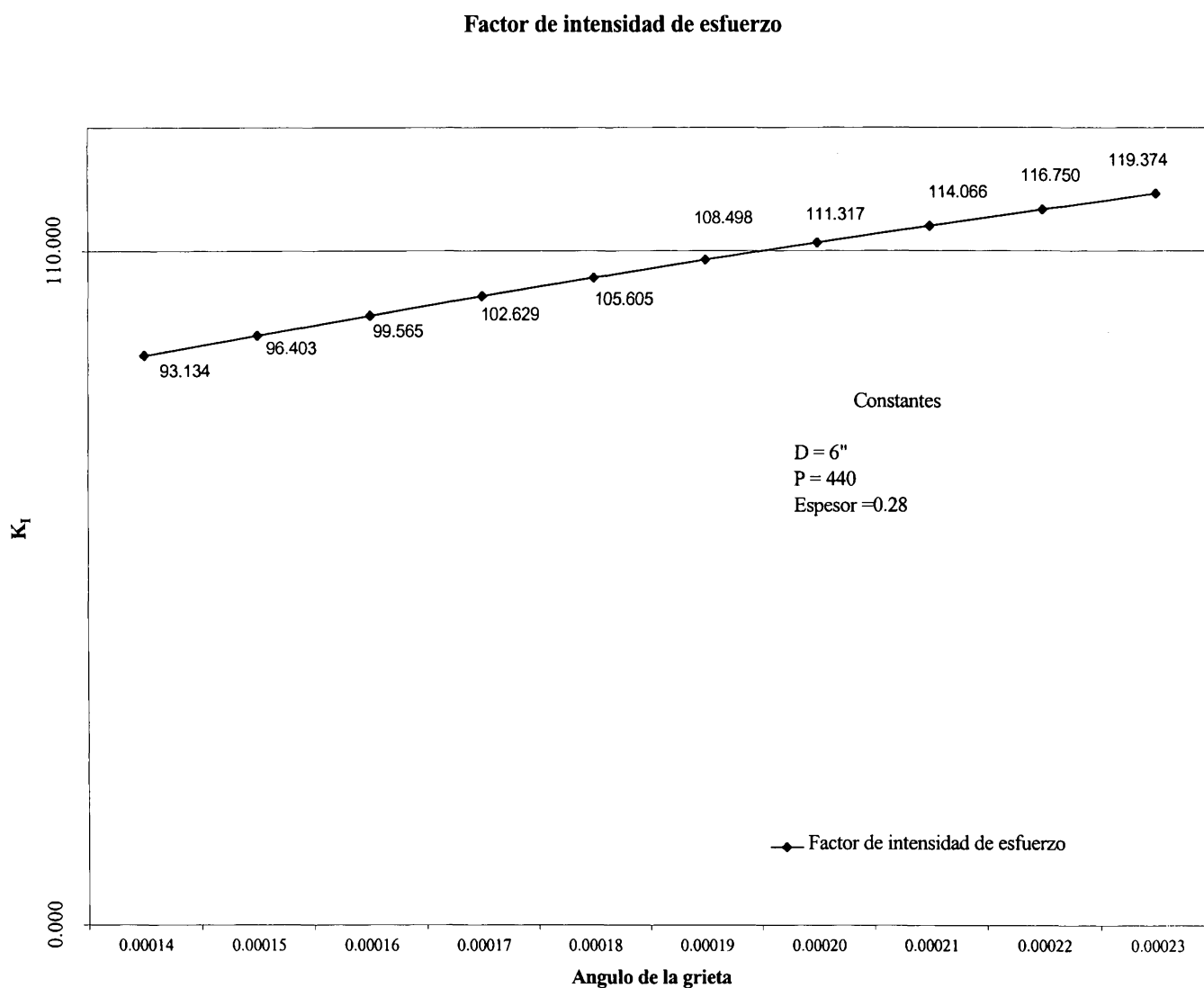
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.3, cuando el espesor varía de 0.200 - 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, etc.).



Gráfica 5.6. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación del ángulo de la grieta.**

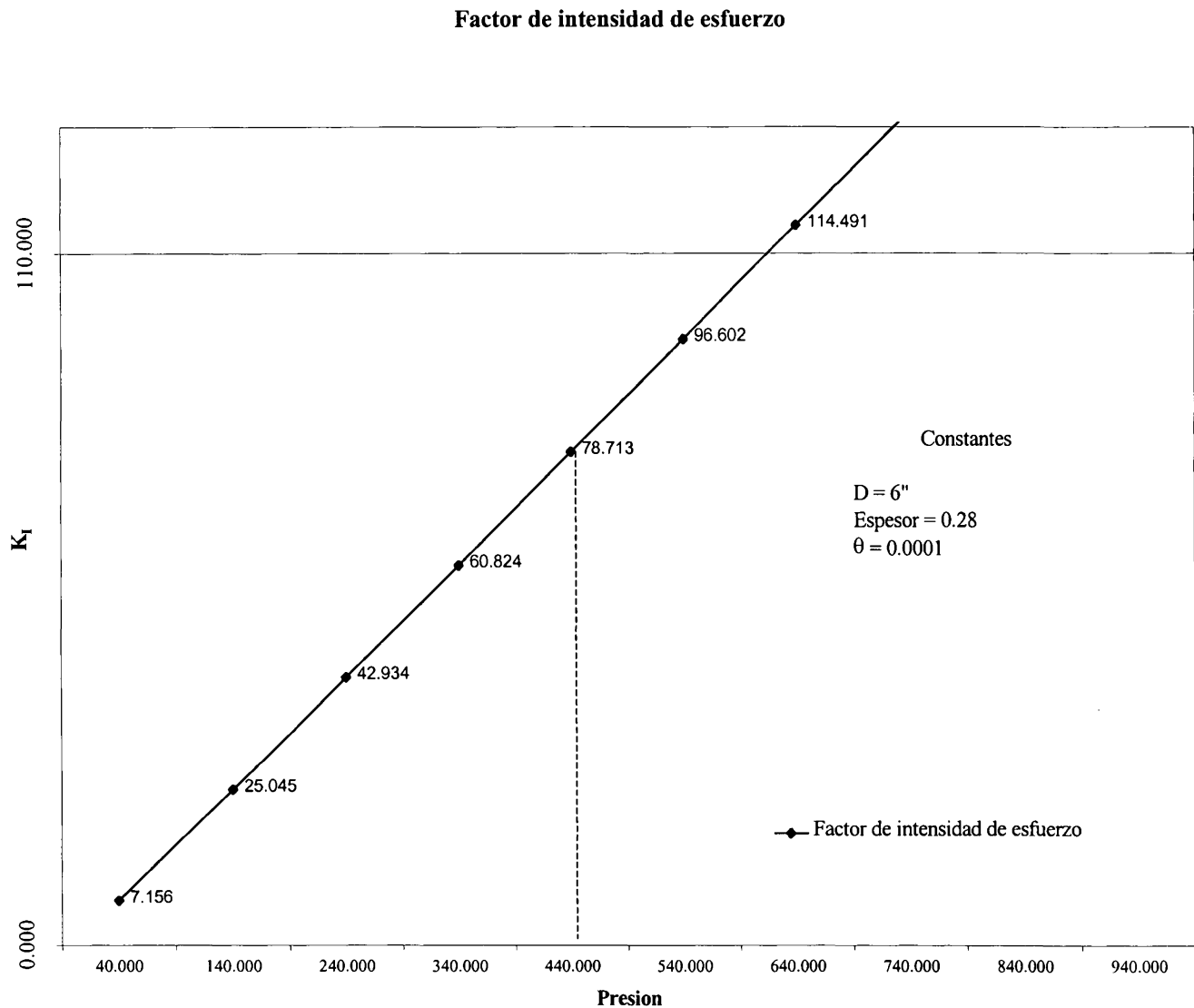
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.3, cuando el ángulo de la grieta varía de 0.00014 - 0.00023 radianes manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.7. Valores de K_I al variar el ángulo de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

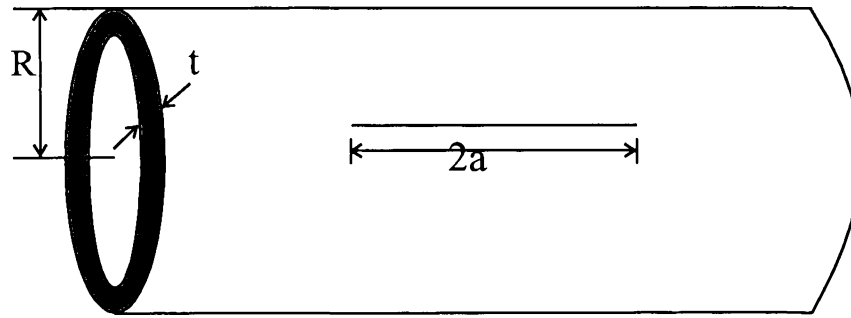
- **Variación de la presión.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.3, cuando la presión varía de 40.0 – 940.0 ksi (MPa) manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.8. Valores de K_I al variar la presión. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.4. CILINDRO SUJETO A PRESIÓN INTERNA, GRIETA DE LONGITUD FINITA A TRAVÉS DEL ESPESOR DEL CILINDRO.



Válida para $R \gg t$.

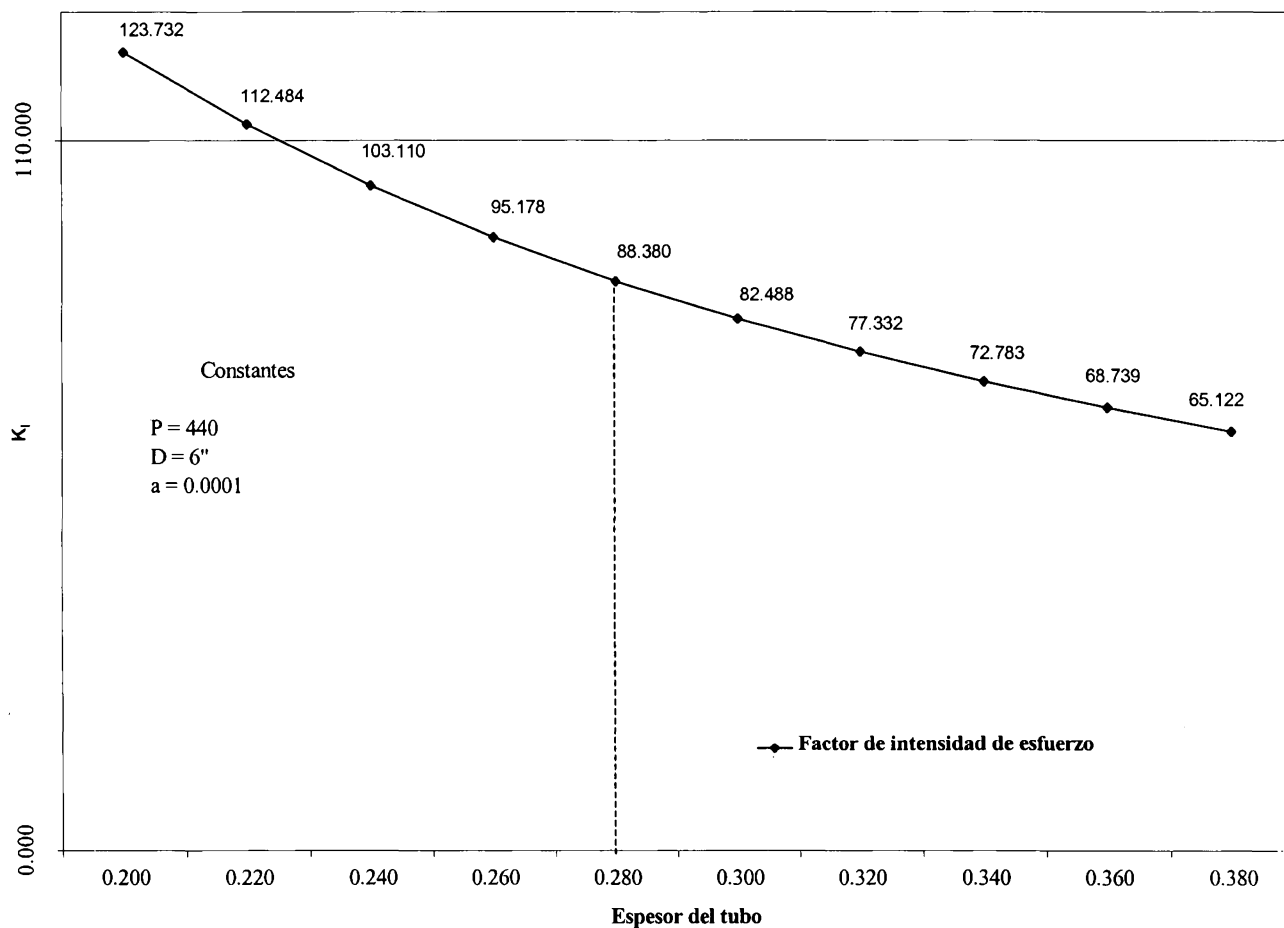
$$K_I = \sigma_b \sqrt{\pi a} \sqrt{1 + 0.52\chi + 1.29\chi^2 - 0.074\chi^3} \quad (5.4)$$

$$\sigma_b = \frac{pR}{t} \chi = \frac{a}{\sqrt{Rt}}$$

- **Variación del espesor.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.4, cuando el espesor varía de 0.200 – 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, etc.).

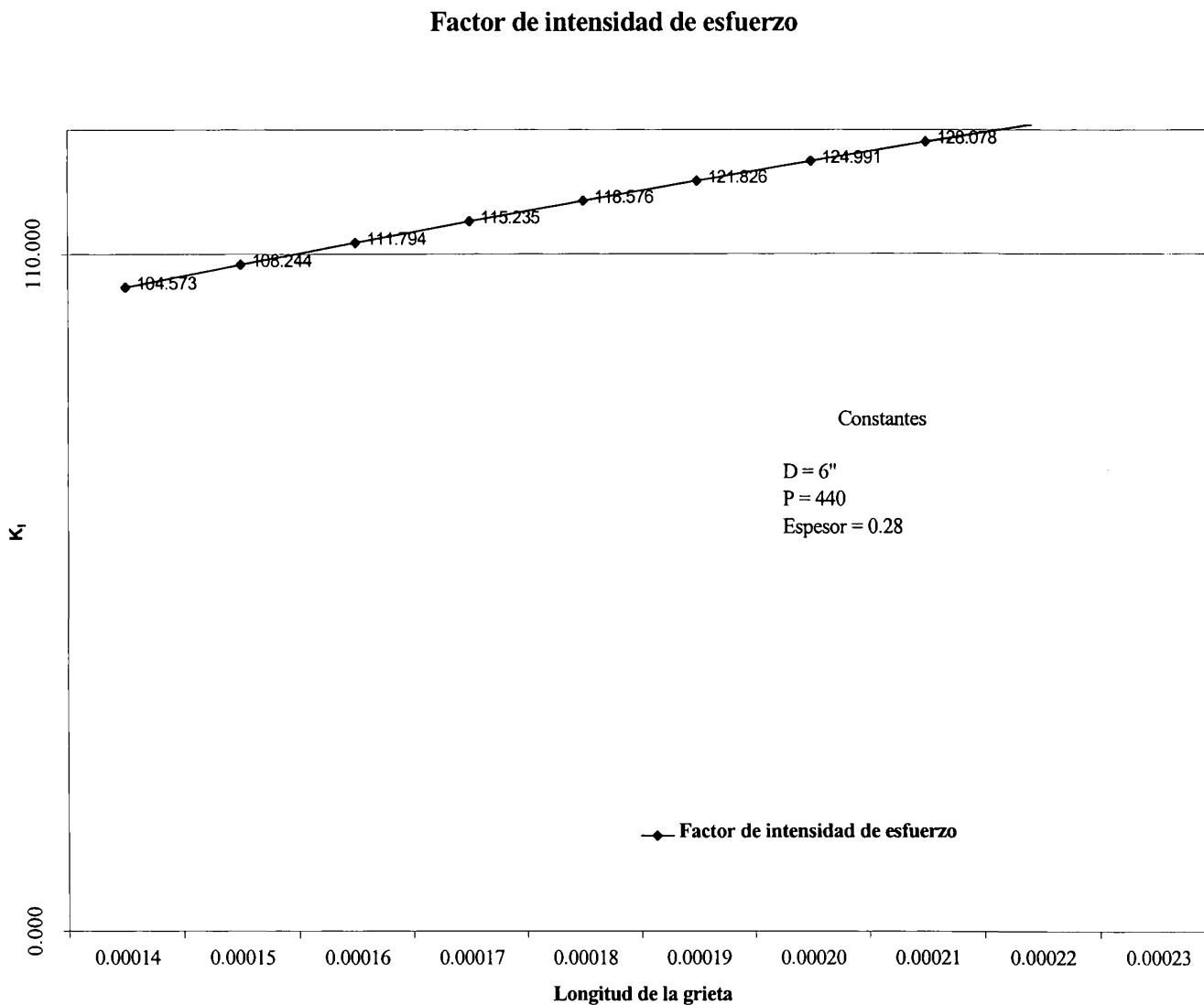
Factor de intensidad de esfuerzo



Gráfica 5.9. Valores de K_t al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación de la longitud de la grieta.**

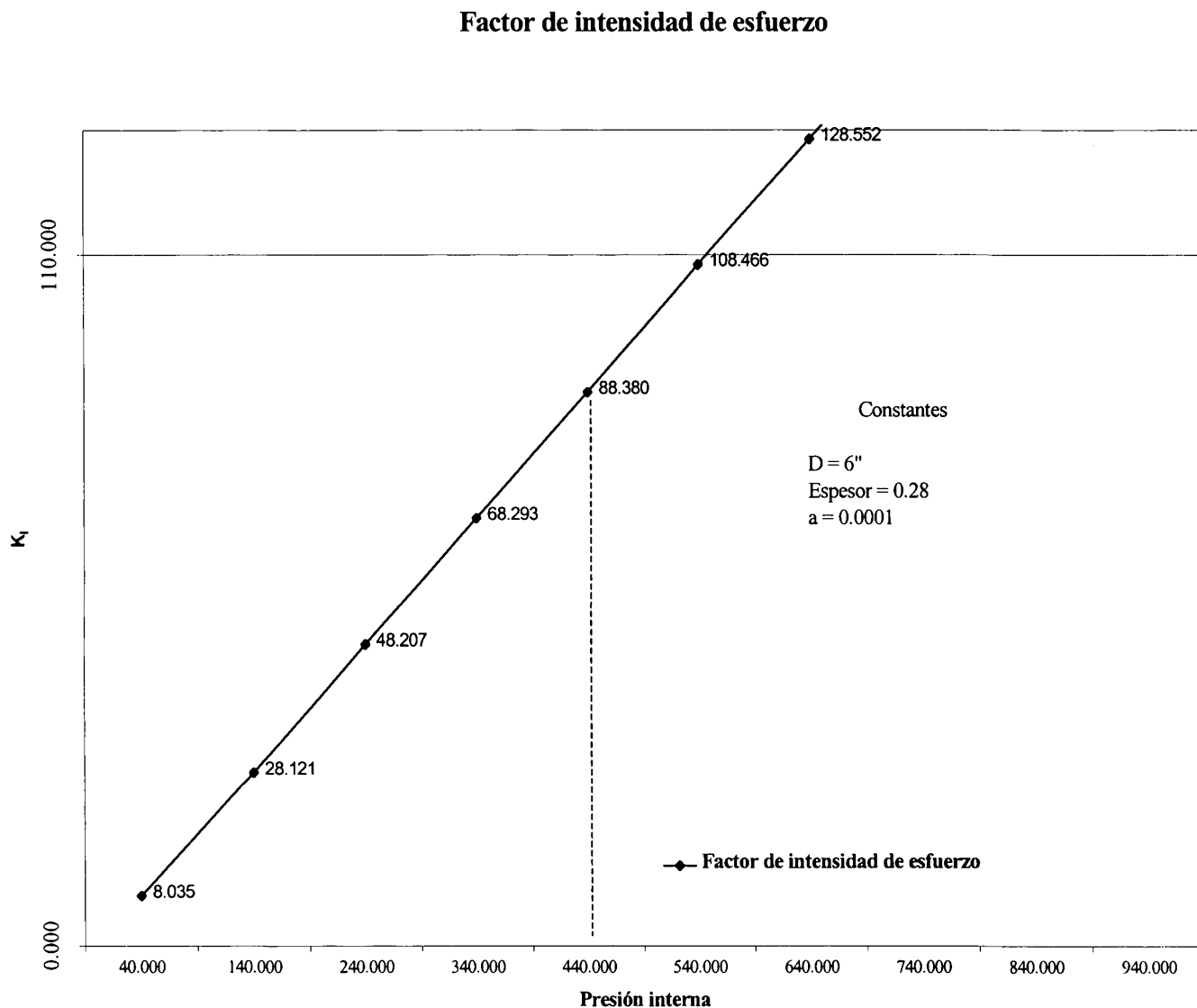
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.4, cuando la longitud varía de 0.0014 – 0.00023 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.10. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

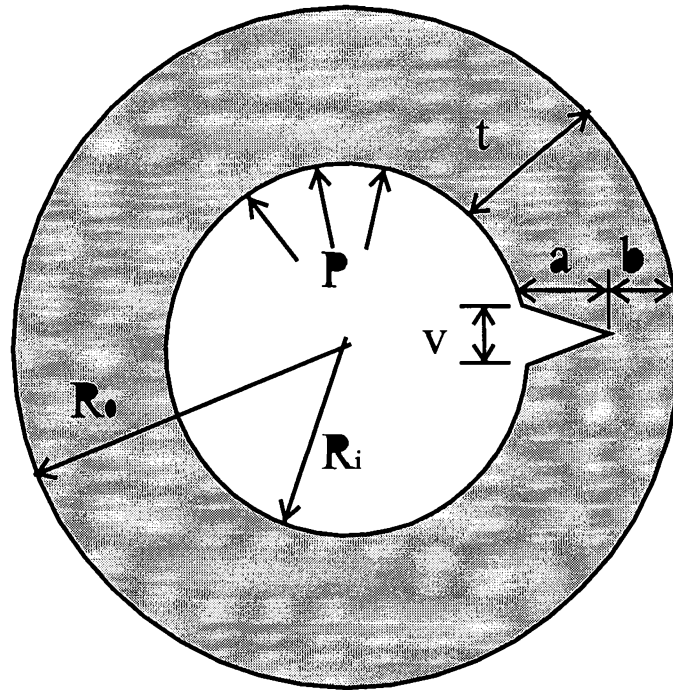
- **Variación de la presión.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.4, cuando la presión varía de 40.0 – 940.0 ksi (MPa) manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.11. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.5. CILINDRO SUJETO A PRESIÓN INTERNA, GRIETA INTERNA.



$$K_I = \frac{2pR_o^2}{R_o^2 - R_i^2} \sqrt{\pi a} F\left(\frac{a}{t}, \frac{R_i}{t}\right) \quad (5.5)$$

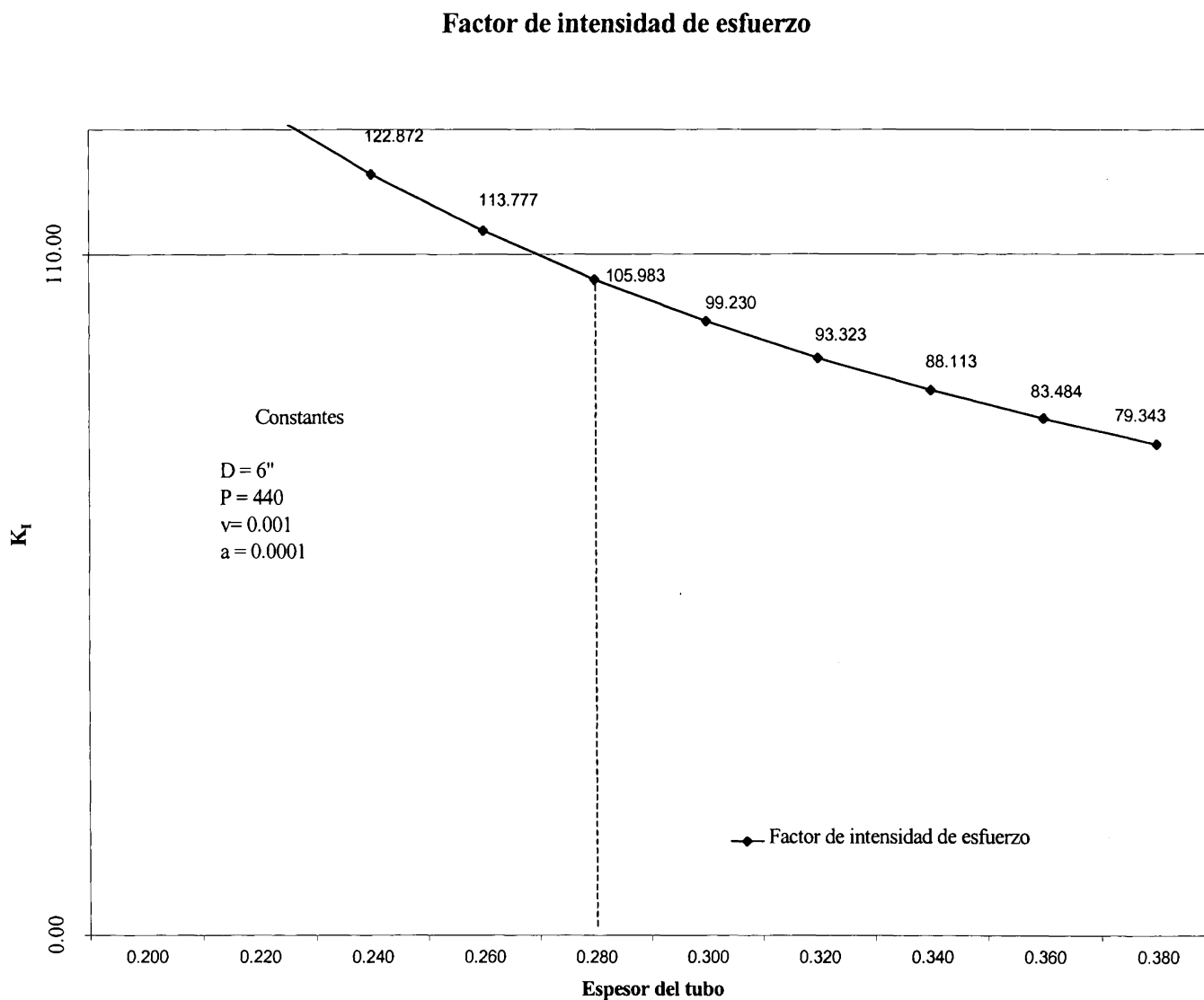
$$F = 1.1 + A \left[4.951 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + 1.092 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right]$$

$$A = \left(0.125 \frac{R_i}{t} - 0.25 \right)^{0.25} \quad \text{para } 5 \leq \frac{R_i}{t} \leq 10$$

$$A = \left(0.2 \frac{R_i}{t} - 1.0 \right)^{0.25} \quad \text{para } 10 \leq \frac{R_i}{t} \leq 20$$

- **Variación del espesor.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.5, cuando el espesor varía de 0.200 – 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

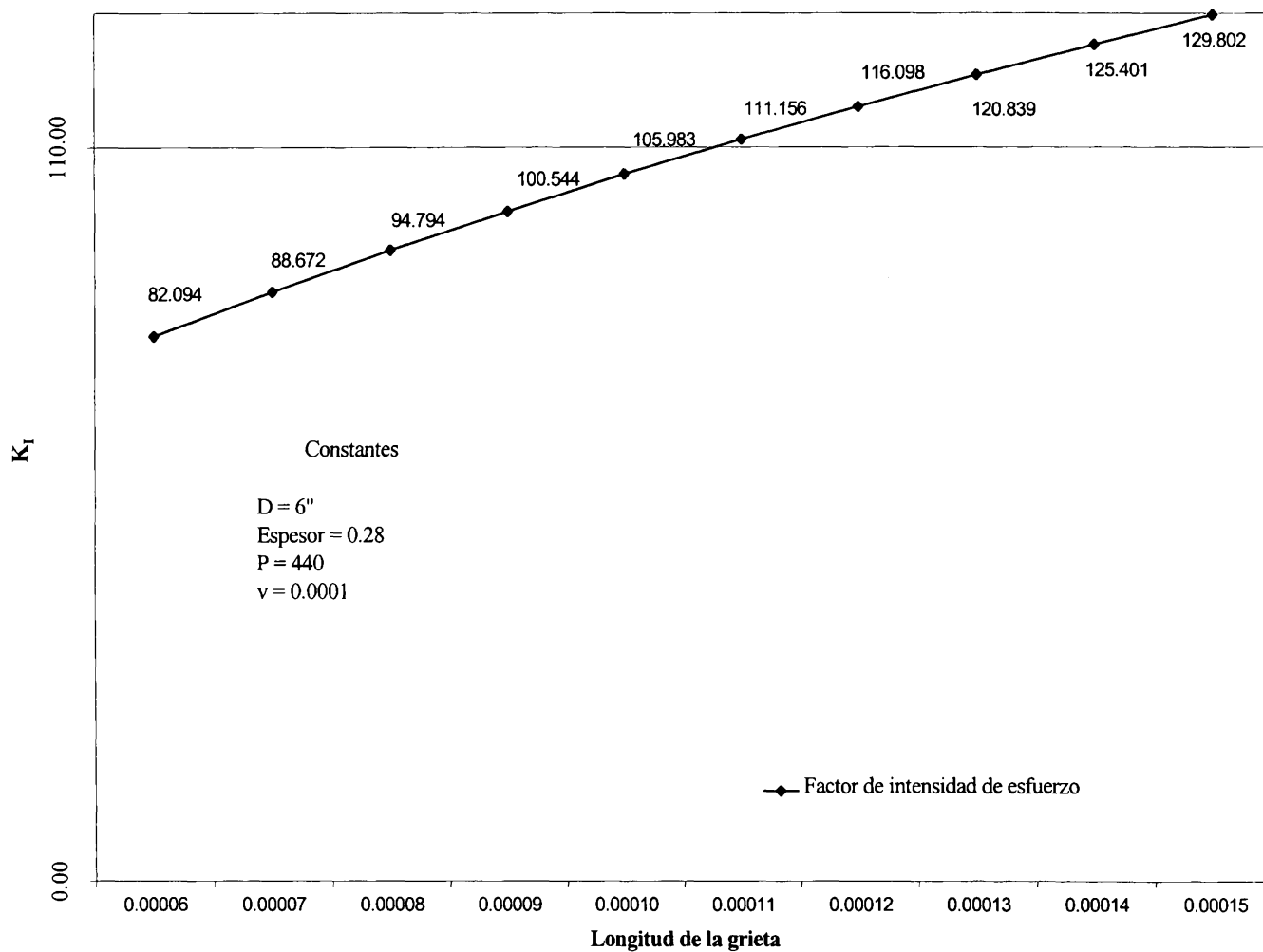


Gráfica 5.12. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación de la longitud de la grieta.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.5, cuando la longitud varía de 0.00006 – 0.00015 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

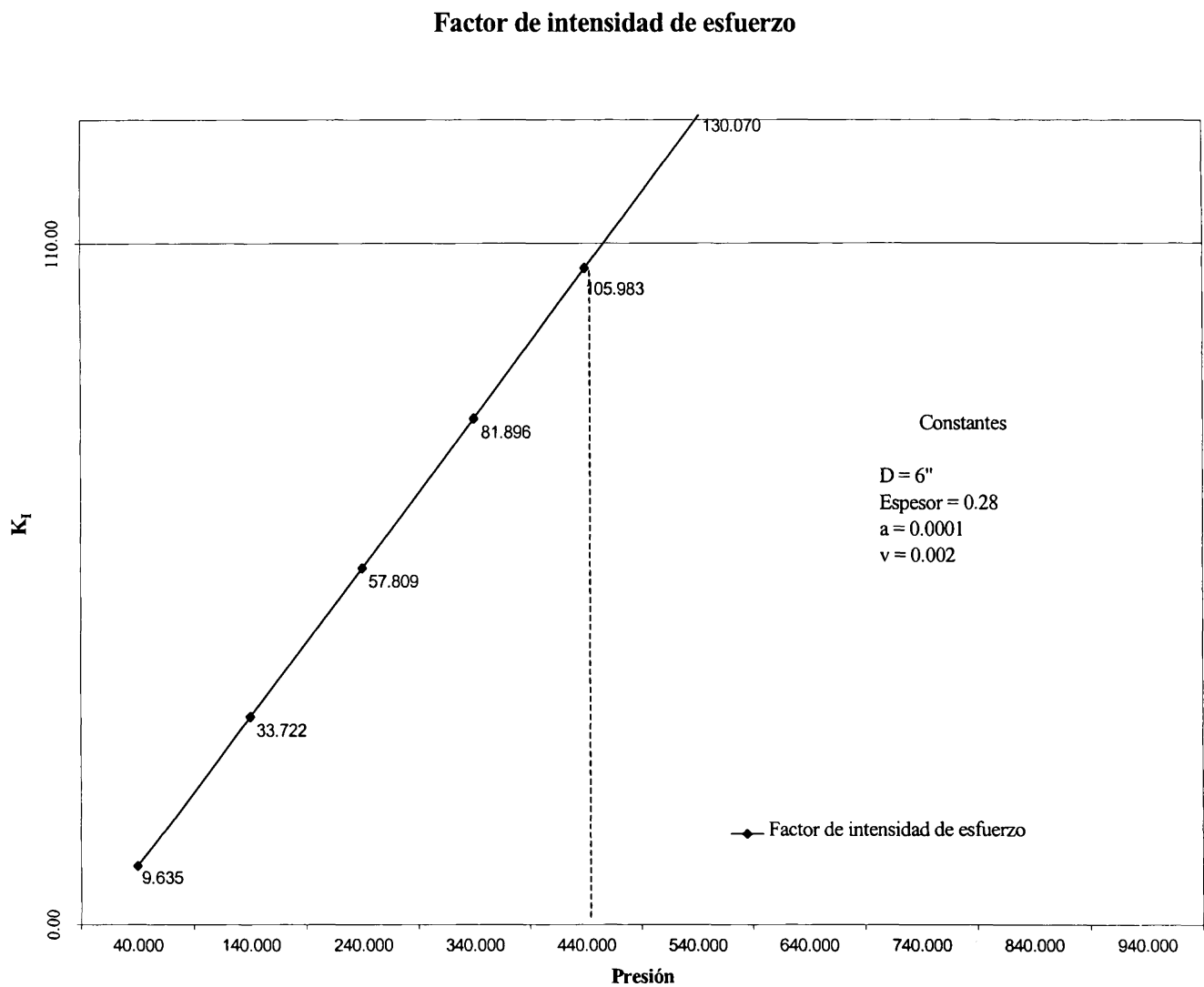
Factor de intensidad de esfuerzo



Gráfica 5.13. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

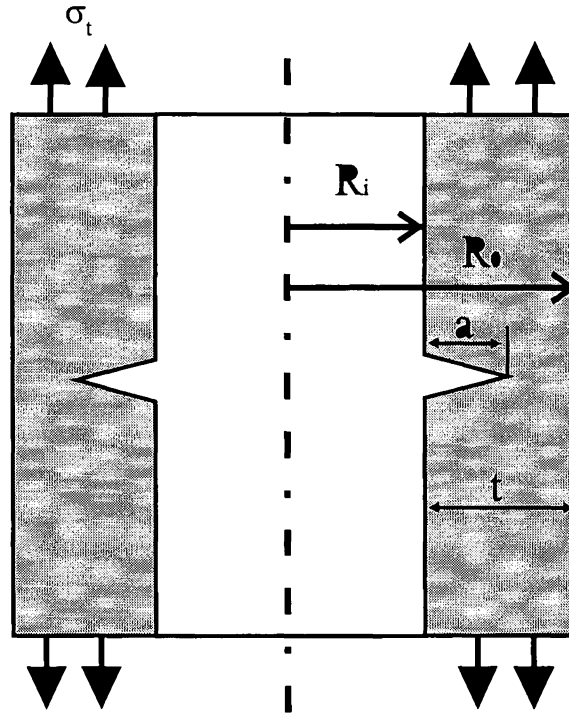
- **Variación de la presión.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.5, cuando la presión varía de 40.0 – 940.0 ksi (MPa) manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).



Gráfica 5.14. Valores de K_I al variar la presión interna. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.6. GRIETA AXISIMÉTRICA EN UN CILINDRO SUJETO A TENSIÓN UNIFORME.



$$K_I = \sigma_t \sqrt{\pi a F_t} \quad (5.6)$$

$$F_t = 1.1 + A \left[1.948 \left(\frac{a}{t} \right)^{1.5} + 0.3342 \left(\frac{a}{t} \right)^{4.24} \right]$$

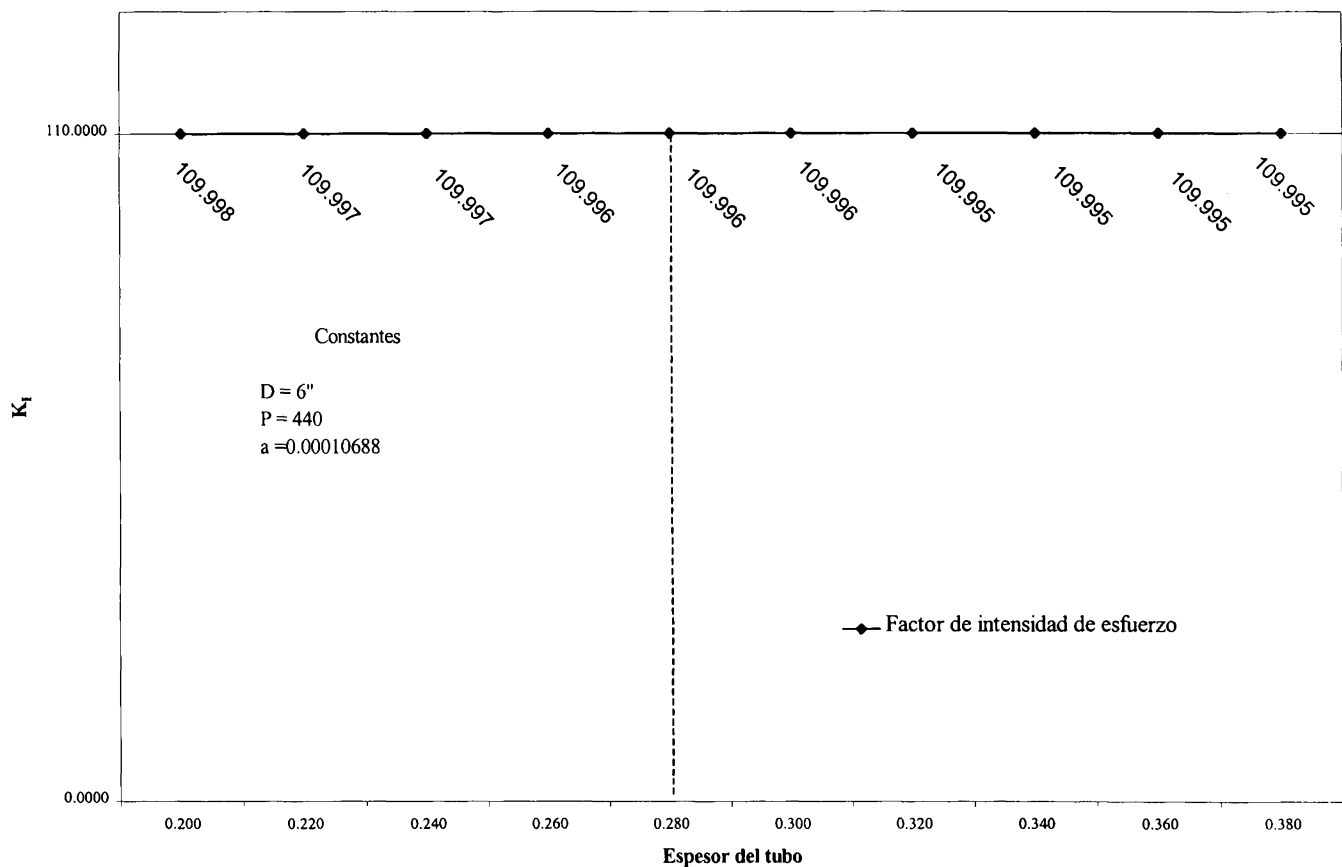
$$A = \left(0.125 \frac{R_i}{t} - 0.25 \right)^{0.25} \quad \text{para } 5 \leq \frac{R_i}{t} \leq 10$$

$$A = \left(0.4 \frac{R_i}{t} - 3.0 \right)^{0.25} \quad \text{para } 10 \leq \frac{R_i}{t} \leq 20$$

- **Variación del espesor.**

Aquí podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.6, cuando el espesor varía de 0.200 – 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

Factor de intensidad de esfuerzo

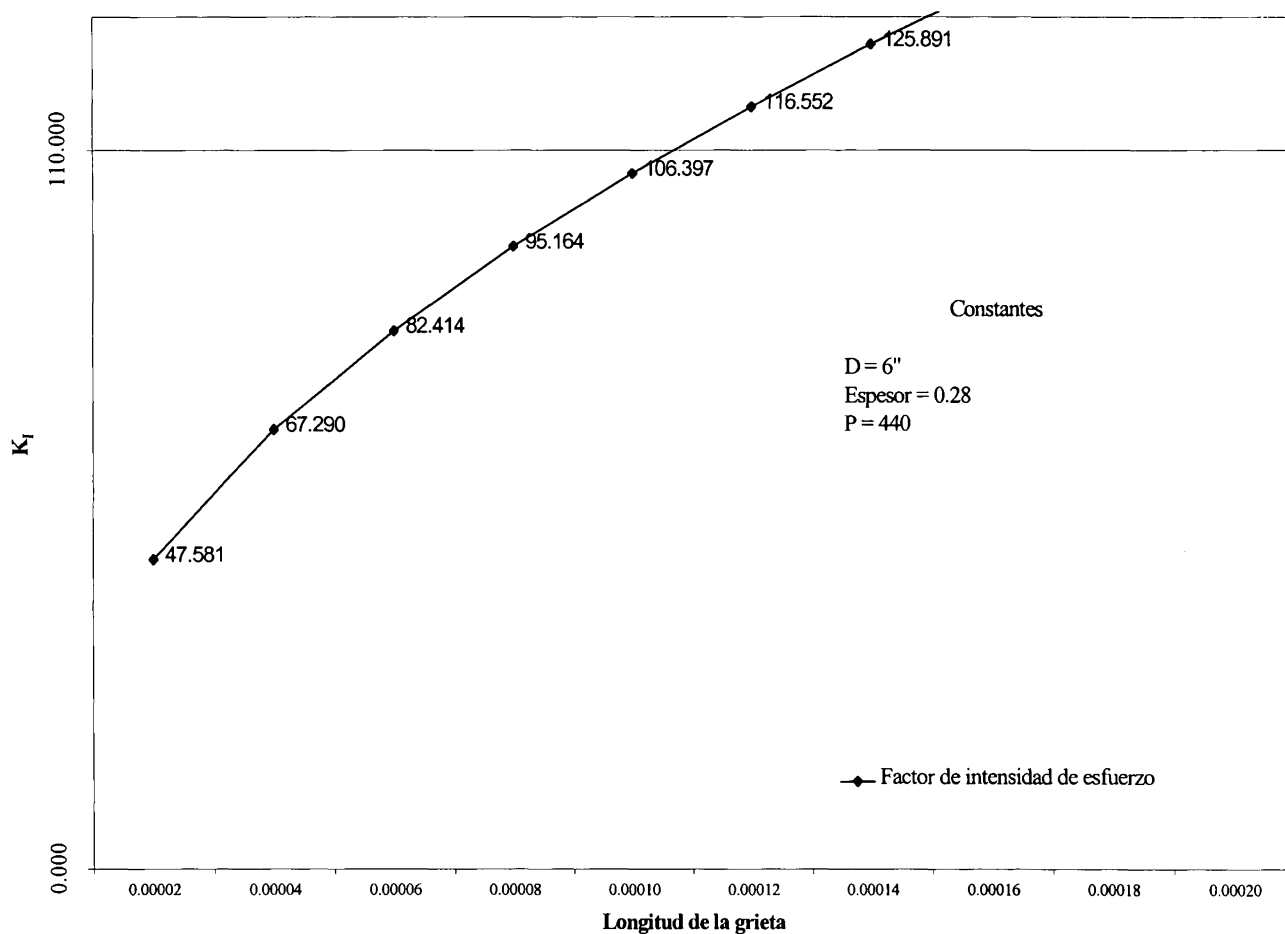


Gráfica 5.15. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación de la longitud de la grieta.**

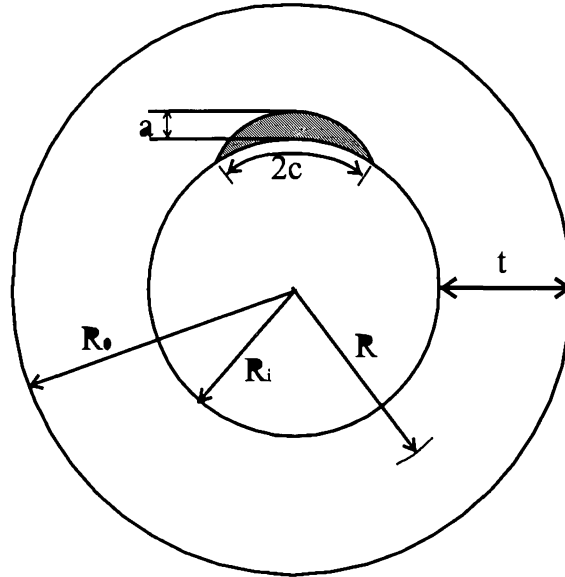
En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.6, cuando la longitud varía de 0.00002 – 0.00020 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

Factor de intensidad de esfuerzo



Gráfica 5.16. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.7. GRIETA SEMIELÍPTICA EN UN CILINDRO SUJETO A TENSION UNIFORME.



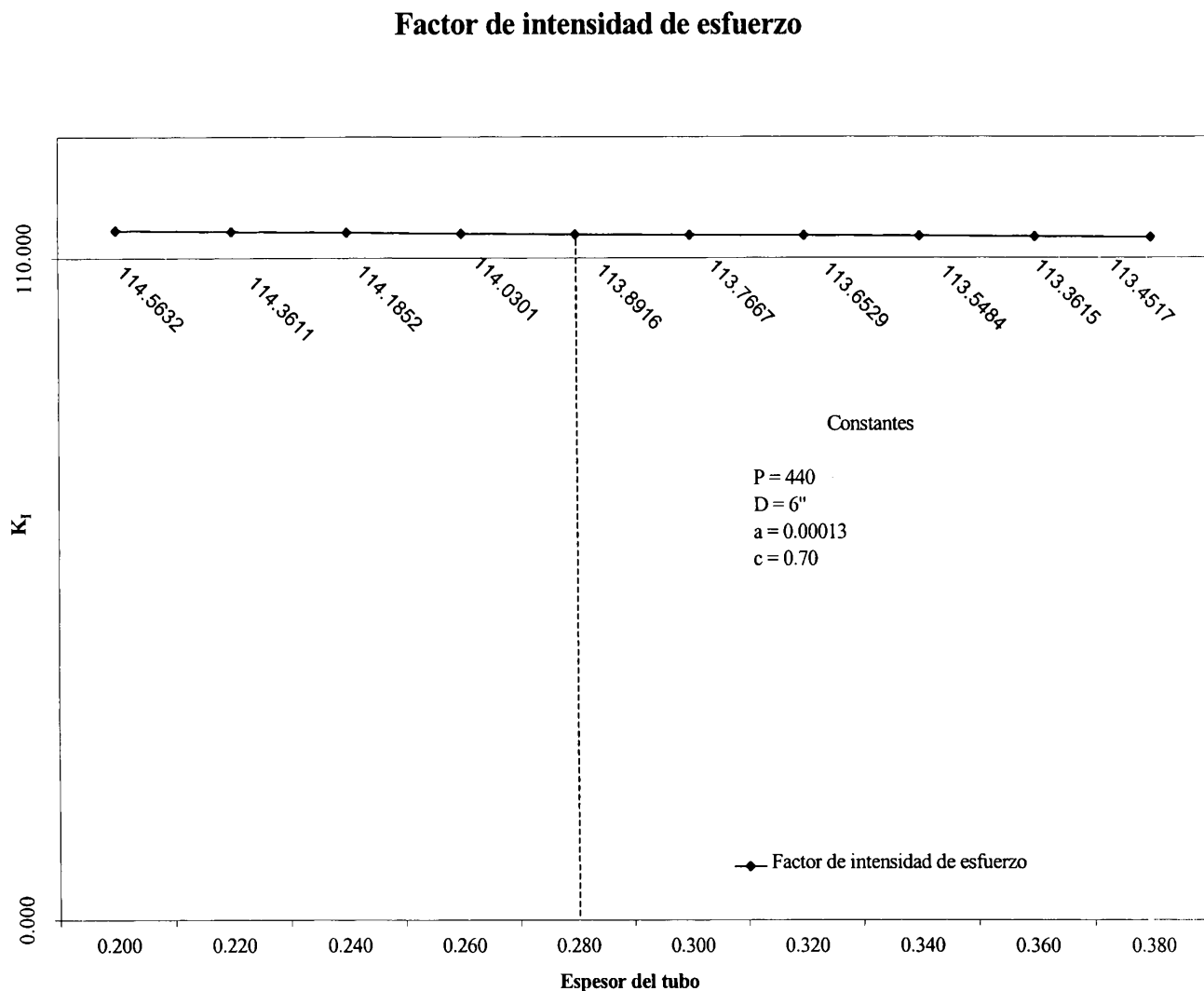
$$K_I = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F_t \quad (5.7)$$

$$F_t = 1 + \left[0.02 + \xi(0.0103 + 0.00617\xi) + 0.0035(1 + 0.7\xi) \left(\frac{R}{t} - 5 \right)^{0.7} \right] Q^2$$

$$\xi = \frac{a}{t} \left(\frac{a}{2c} \right) Q = 1 + 1.464 \left(\frac{a}{2c} \right)^{1.65}$$

- **Variación del espesor.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.7, cuando el espesor varía de 0.200 – 0.380 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

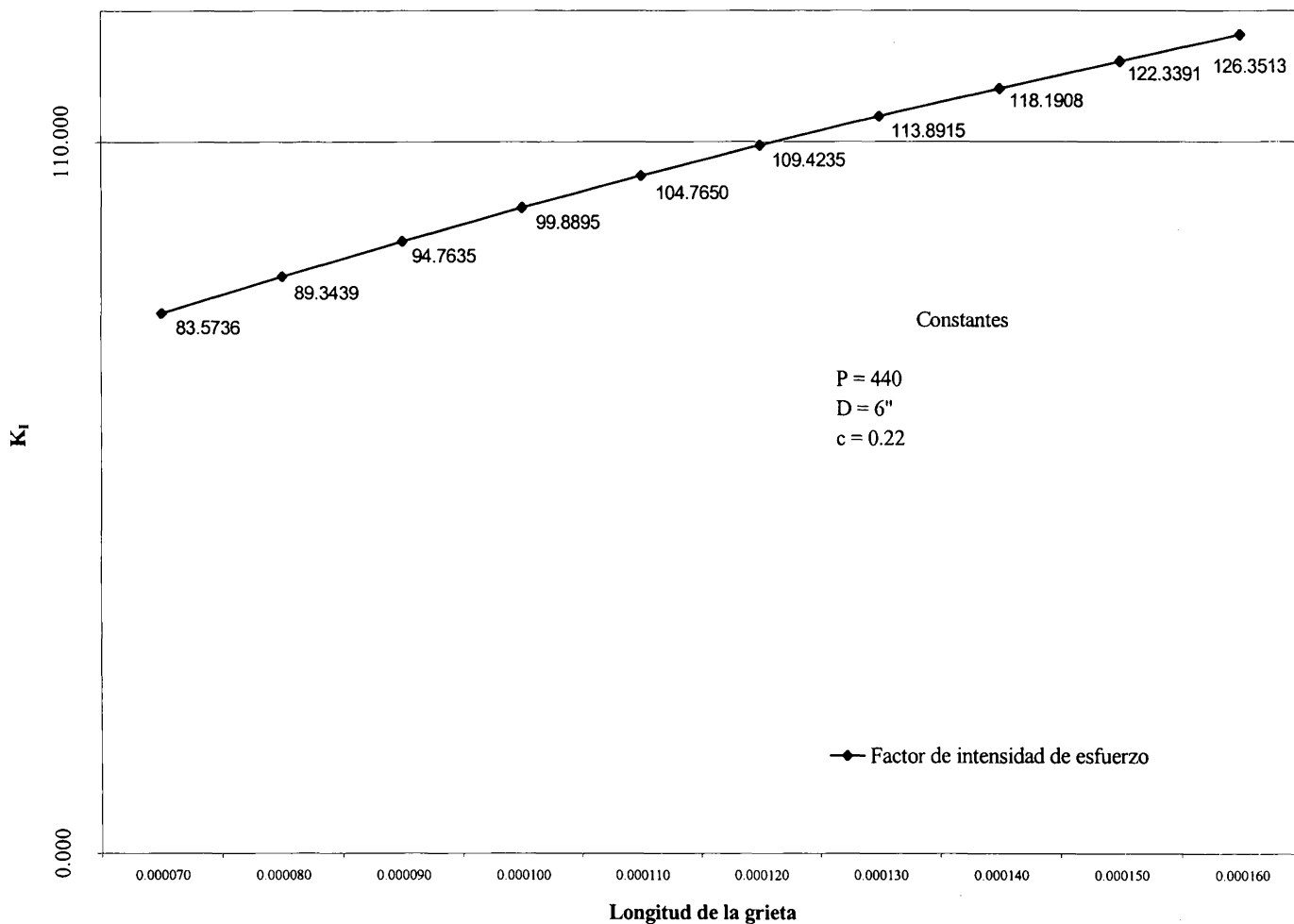


Gráfica 5.17. Valores de K_I al variar el espesor del tubo. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

- **Variación de la longitud de la grieta.**

En esta gráfica podemos observar la variación del factor de intensidad de esfuerzos ecuación 5.7, cuando la longitud varía de 0.00007 – 0.00016 pulgadas manteniendo los demás parámetros de ésta constantes (diámetro, temperatura, espesor, etc.).

Factor de intensidad de esfuerzo



Gráfica 5.18. Valores de K_I al variar la longitud de la grieta. El valor de $110 \text{ MPa}/\sqrt{\text{m}}$ es la resistencia a la fractura del acero.

5.8. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

La mecánica de la fractura es una ciencia relativamente nueva y por lo tanto poco conocida en nuestro país, sin embargo existen muchas soluciones publicadas con las cuales podemos analizar el problema de fractura. Para poder analizar un problema de un miembro agrietado por medio de la mecánica de la fractura seguimos los siguientes pasos:

- Seleccionar el modelo que mejor se ajuste a nuestro problema.
- Conocer el valor del factor de intensidad de esfuerzos crítico, K_c .
- Evaluar la fórmula con los datos de nuestro problema y obtener el K para nuestro ejemplo.
- Comparar K con el K_c para determinar la condición de la grieta.
- Hacer las recomendaciones necesarias.

Para el caso de un cilindro sometido a tensión figura 5.1 se varió el espesor, el ángulo de la grieta y la presión interna, observando lo siguiente:

- El parámetro más importante, es decir el que hace que se incremente de manera crítica el factor de intensidad de esfuerzo es el ángulo o tamaño de la grieta.
- Para el modelo que se analizó con AutoPipe, la presencia de una grieta hace que se vuelva crítica su situación ya que existen ciertas combinaciones (ver gráficas del ejemplo) de estos parámetros que harán que la línea falle.

Por otro lado, cuando en la misma figura se hace la variación de parámetros para el caso de flexión observamos lo siguiente:

- La presión interna no influye para este caso, nuevamente el parámetro más crítico es el tamaño de la grieta.
- Para el ejemplo que se evaluó con el programa AutoPipe si tuviéramos una grieta 0.20 radianes la tubería no fallaría, a menos que el espesor del tubo sea menor de 0.38 pulgadas aproximadamente (ver figura 5.4).

Como último caso para esta figura se analizó la ecuación para la presión interna de la cual concluimos lo siguiente: se observó que el parámetro más importante es el ángulo o tamaño de la grieta, ya que por ejemplo para el modelo de la tubería que se analizó el tamaño más grande que se pueda tolerar es de aproximadamente de 0.000195 pulgadas la cual es una grieta demasiado pequeña. En cambio de las figuras 5.7 y 5.9 notamos que nuestro ejemplo está del lado de la seguridad.

Para el estudio paramétrico del cilindro del punto 5.4, se observó que el tamaño de grieta tolerable es nuevamente muy pequeña y por lo tanto dominará el diseño por fractura, igualmente para nuestro ejemplo no hay problema de falla siempre y cuando el tamaño de la grieta sea del orden de 0.0001 pulgadas. El espesor y la presión interna tiene un papel menos importante desde el punto de vista de la mecánica de la fractura.

Para un cilindro sujeto a presión interna, con una grieta en su interior (ver punto 5.5) podemos concluir lo siguiente: los dos factores primordiales están nuevamente relacionados con las dimensiones de la grieta como son el ancho y la longitud, teniendo ambos una influencia igual en el factor de intensidad de esfuerzos. De igual manera para nuestro modelo se muestran las gráficas para las cuales éste cae del lado de la seguridad.

Observamos que para el cilindro del punto 5.6 la variación del espesor influye poco en el factor de intensidad de esfuerzos, siendo el parámetro importante la longitud de la grieta, mas sin embargo para nuestro modelo la falla es inminente. La presión interna no afecta a esta ecuación.

Como último caso se analizó el cilindro mostrado en punto 5.7, para este problema la presión interna no influye directamente en la ecuación que determina el factor de intensidad de esfuerzos, la gráfica para la variación del espesor del tubo es casi constante lo que indica la poca influencia sobre el valor de K , nuevamente el parámetro de mayor importancia es la longitud o tamaño de grieta.

Cabe hacer notar que en todas las gráficas se hicieron los ajustes necesarios, principalmente el tamaño de la grieta, para poder comparar el valor de la resistencia de nuestra tubería con la resistencia contra la fractura del acero.

Como comentario final del estudio paramétrico que se realizó de algunas de las formulas más comunes utilizadas para el análisis de tuberías fracturadas, podemos decir lo siguiente:

- El comportamiento de las ecuaciones es no lineal.
- Con los datos reales que ocupamos en el ejemplo observamos que el parámetro más importante es el tamaño de grieta, a .
- Estas ecuaciones no toman en cuenta el efecto de temperatura.
- En algunos casos la presión interna no tiene influencia directa sobre el valor de K .

6. CONCLUSIONES.

El objetivo central de este trabajo fue mostrar algunas aplicaciones posibles de la mecánica de la fractura en el análisis de tuberías de conducción de hidrocarburos. Para ello presentamos, algunos antecedentes históricos de la mecánica de fractura, conceptos básicos y planes de control de fractura. Además se presentó una descripción más detallada de los parámetros utilizados en la mecánica de la fractura lineal elástica para el análisis de esfuerzos en miembros agrietados. Entre ellos contamos al factor de intensidad de esfuerzo, K , y la tasa de liberación de energía, G , así como la relación entre ambos. Asimismo, hablamos de las condiciones para la estabilidad de grietas y las condiciones existentes en la punta de la grieta.

Los procedimientos de diseño en la mecánica de la fractura por falla terminal y la selección de materiales para el diseño se presentaron, mediante la descripción de cómo la mecánica de la fractura puede ayudar al ingeniero en la selección inicial de materiales, niveles de esfuerzos y tamaño de grieta tolerable para el control de calidad o inspección.

Dado que el interés central del trabajo era aplicarlo a tuberías de conducción de hidrocarburos se presentó la interpretación y alcances de las principales normas, así como el cálculo de los esfuerzos actuantes y permisibles de cada una de éstas.

Por otro lado se desarrolló un estudio paramétrico de las fórmulas analíticas más comunes utilizadas para analizar tuberías agrietadas, el propósito de dicho análisis fue mostrar de manera gráfica cuales son los principales parámetros en dichas ecuaciones.

Después del desarrollo del presente trabajo podemos concluir:

- La importancia de la mecánica de la fractura quedó manifestada en el estudio paramétrico de las formulas más comunes para el caso de tuberías, ya que en él pudimos ver que la presencia de una grieta afecta considerablemente la capacidad de carga de la tubería, identificando como el parámetro más importante a la longitud de grieta.
- Desde el punto de vista matemático, la teoría de la Mecánica de la Fractura representa un problema difícil de resolver por lo que sólo contamos con algunas soluciones analíticas, sin embargo la aplicación de estas formulas es simple. Pero aún no es práctica común la aplicación de ellas.
- Debido a que el principal medio de transporte de hidrocarburos son las tuberías o ductos huelga decir que la Mecánica de la Fractura debe de ser una de las ciencias que deben de tener una pronta aplicación en dicha industria. Ya sea para poder tener las herramientas necesarias de prevención o diseño contra la fractura de tuberías. Sabemos que algunas áreas de control de línea desarrollan actualmente trabajos en esta dirección.
- La mecánica de la fractura es una herramienta que se debe de tomar en cuenta al momento de diseñar o analizar las condiciones existentes en un medio agrietado, ya que con ella podemos decir si el medio fallará por fluencia, fractura o una combinación de ambas.
- También podemos mencionar que hace falta hacer un estudio paramétrico en el que se tome en cuenta la influencia de la temperatura, ya que ésta afecta directamente al

valor del factor de intensidad de esfuerzos crítico, K_c , así como el valor del factor de intensidad de esfuerzos actuantes.

- Además debemos de resaltar que el estudio anterior sólo se tomó en cuenta la etapa lineal del material, es decir se basó en un análisis elástico, quedando mucho por estudiar del caso en el cual el comportamiento del material cae dentro del rango plástico el cual se presenta en la mayoría de los aceros.
- También debemos recordar que no se consideró el caso de propagación de grietas, quedando esto como un tema para futuros estudios.
- Las condiciones bajo las cuales se analizaron las grietas en este trabajo fueron condiciones estáticas, faltando por estudiar las mismas bajo solicitaciones dinámicas, lo cual obviamente representa una condición muy importante y difícil de analizar. También podemos desarrollar trabajos de investigación en las áreas de fatiga, vibración, corrosión, inclusión de hidrogeno, etc.
- También cabe mencionar que existen otros métodos mediante los cuales podemos analizar fractura para los casos en los que no contamos con soluciones analíticas, entre los que podemos citar debido a su importancia al método del elemento finito y al método de elementos de frontera.

La idea central del presente trabajo fue la de mostrar posibles aplicaciones de la Mecánica de la Fractura en el análisis de tuberías de transporte. Es sin duda limitado y resta mucho por hacer. Mostramos el potencial de los métodos que seguramente serán incorporados en los futuros programas de inspección y mantenimiento de ductos.

APÉNDICE

Tablas empleadas en las gráficas para el análisis de la variación de parámetros.

- Cilindro sometido a flexión y tensión combinados.

Tensión axial.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.100	0.200	3.113	3.313	3.213	440.000
2	1853.000	0.100	0.220	3.093	3.313	3.203	440.000
3	1853.000	0.100	0.240	3.073	3.313	3.193	440.000
4	1853.000	0.100	0.260	3.053	3.313	3.183	440.000
5	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.100	0.300	3.013	3.313	3.163	440.000
7	1853.000	0.100	0.320	2.993	3.313	3.153	440.000
8	1853.000	0.100	0.340	2.973	3.313	3.143	440.000
9	1853.000	0.100	0.360	2.953	3.313	3.133	440.000
10	1853.000	0.100	0.380	2.933	3.313	3.123	440.000

	R/t		A	F _t	σ_t
1	16.065		1.360	1.041	108.976
2	14.559		1.296	1.039	99.378
3	13.304		1.234	1.037	91.382
4	12.242		1.174	1.036	84.618
5	11.332		1.113	1.034	78.821
6	10.543		1.050	1.032	73.799
7	9.853		0.995	1.030	69.406
8	9.244		0.975	1.030	65.531
9	8.703		0.957	1.029	62.088
10	8.218		0.939	1.028	59.009

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	113.997
2	103.602
3	94.945
4	87.623
5	81.348
6	75.906
7	71.159
8	67.041
9	63.382
10	60.111

Tensión axial.

Variación del ángulo de la grieta

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.140	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
2	1853.000	0.150	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
3	1853.000	0.160	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
4	1853.000	0.170	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
5	1853.000	0.180	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.190	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
7	1853.000	0.200	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
8	1853.000	0.210	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
9	1853.000	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
10	1853.000	0.230	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000

	R/t		A	F_t	σ_t
1	11.332		1.113	1.056	78.821
2	11.332		1.113	1.062	78.821
3	11.332		1.113	1.068	78.821
4	11.332		1.113	1.075	78.821
5	11.332		1.113	1.081	78.821
6	11.332		1.113	1.088	78.821
7	11.332		1.113	1.095	78.821
8	11.332		1.113	1.103	78.821
9	11.332		1.113	1.110	78.821
10	11.332		1.113	1.118	78.821

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	98.314
2	102.352
3	106.336
4	110.277
5	114.182
6	118.060
7	121.916
8	125.756
9	129.586
10	133.409

Tensión axial.

Variación de la presión

Datos (Nodo A7)

Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	40.000
2	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	140.000
3	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	240.000
4	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	340.000
5	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	540.000
7	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	640.000
8	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	740.000
9	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	840.000
10	1853.000	0.100	0.280	3.033	3.313	3.173	940.000

	R/t		A	F _t	σ_t
1	11.332		1.113	1.034	7.166
2	11.332		1.113	1.034	25.080
3	11.332		1.113	1.034	42.993
4	11.332		1.113	1.034	60.907
5	11.332		1.113	1.034	78.821
6	11.332		1.113	1.034	96.735
7	11.332		1.113	1.034	114.649
8	11.332		1.113	1.034	132.563
9	11.332		1.113	1.034	150.477
10	11.332		1.113	1.034	168.391

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	7.395
2	25.883
3	44.371
4	62.860
5	81.348
6	99.836
7	118.324
8	136.812
9	155.300
10	173.788

Momento flexionante.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.020	0.200	3.113	3.313	3.213	440.000
2	1853.000	0.020	0.220	3.093	3.313	3.203	440.000
3	1853.000	0.020	0.240	3.073	3.313	3.193	440.000
4	1853.000	0.020	0.260	3.053	3.313	3.183	440.000
5	1853.000	0.020	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.020	0.300	3.013	3.313	3.163	440.000
7	1853.000	0.020	0.320	2.993	3.313	3.153	440.000
8	1853.000	0.020	0.340	2.973	3.313	3.143	440.000
9	1853.000	0.020	0.360	2.953	3.313	3.133	440.000
10	1853.000	0.020	0.380	2.933	3.313	3.123	440.000

	F_f	σ_f
1	1.003	285.676
2	1.003	261.329
3	1.003	241.055
4	1.003	223.912
5	1.003	209.231
6	1.002	196.519
7	1.002	185.407
8	1.002	175.613
9	1.002	166.917
10	1.002	159.146

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_t)
1	128.765
2	117.590
3	108.282
4	100.410
5	93.665
6	87.823
7	82.716
8	78.218
9	74.223
10	70.652

Momento flexionante.**Variación del ángulo de la grieta****Datos (Nodo A7)**

Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	M	θ	t	R _i	R _o	R	P
1	1853.000	0.005	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
2	1853.000	0.010	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
3	1853.000	0.015	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
4	1853.000	0.020	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
5	1853.000	0.025	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.030	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
7	1853.000	0.035	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
8	1853.000	0.040	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
9	1853.000	0.045	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
10	1853.000	0.050	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000

	F _t	σ_f
1	1.000	209.231
2	1.001	209.231
3	1.002	209.231
4	1.003	209.231
5	1.004	209.231
6	1.005	209.231
7	1.006	209.231
8	1.007	209.231
9	1.009	209.231
10	1.010	209.231

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	46.726
2	66.120
3	81.043
4	93.665
5	104.829
6	114.965
7	124.330
8	133.090
9	141.363
10	149.231

Presión interna.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.0001	0.200	3.113	3.313	3.213	440.000
2	1853.000	0.0001	0.220	3.093	3.313	3.203	440.000
3	1853.000	0.0001	0.240	3.073	3.313	3.193	440.000
4	1853.000	0.0001	0.260	3.053	3.313	3.183	440.000
5	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.0001	0.300	3.013	3.313	3.163	440.000
7	1853.000	0.0001	0.320	2.993	3.313	3.153	440.000
8	1853.000	0.0001	0.340	2.973	3.313	3.143	440.000
9	1853.000	0.0001	0.360	2.953	3.313	3.133	440.000
10	1853.000	0.0001	0.380	2.933	3.313	3.123	440.000

	γ	σ_m	F_m
1	0.000	3534.300	1.000
2	0.000	3203.000	1.000
3	0.000	2926.917	1.000
4	0.000	2693.308	1.000
5	0.000	2493.071	1.000
6	0.000	2319.533	1.000
7	0.000	2167.688	1.000
8	0.000	2033.706	1.000
9	0.000	1914.611	1.000
10	0.000	1808.053	1.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	112.288
2	101.604
3	92.701
4	85.169
5	78.713
6	73.118
7	68.224
8	63.905
9	60.067
10	56.633

Presión interna.**Variación del ángulo de la grieta****Datos (Nodo A7)**

Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	M	θ	t	Ri	Ro	R	P
1	1853.000	0.00014	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
2	1853.000	0.00015	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
3	1853.000	0.00016	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
4	1853.000	0.00017	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
5	1853.000	0.00018	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.00019	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
7	1853.000	0.00020	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
8	1853.000	0.00021	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
9	1853.000	0.00022	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
10	1853.000	0.00023	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000

	γ	σ_m	F_m
1	0.000	2493.071	1.000
2	0.001	2493.071	1.000
3	0.001	2493.071	1.000
4	0.001	2493.071	1.000
5	0.001	2493.071	1.000
6	0.001	2493.071	1.000
7	0.001	2493.071	1.000
8	0.001	2493.071	1.000
9	0.001	2493.071	1.000
10	0.001	2493.071	1.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	93.134
2	96.403
3	99.565
4	102.629
5	105.605
6	108.498
7	111.317
8	114.066
9	116.750
10	119.374

Presión interna.

Variación de la presión

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Momento	Angulo de la grieta (Rad)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in²)
	M	θ	t	R_i	R_o	R	P
1	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	40.000
2	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	140.000
3	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	240.000
4	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	340.000
5	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	540.000
7	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	640.000
8	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	740.000
9	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	840.000
10	1853.000	0.0001	0.280	3.033	3.313	3.173	940.000

	γ	σ_m	F_m
1	0.000	226.643	1.000
2	0.000	793.250	1.000
3	0.000	1359.857	1.000
4	0.000	1926.464	1.000
5	0.000	2493.071	1.000
6	0.000	3059.679	1.000
7	0.000	3626.286	1.000
8	0.000	4192.893	1.000
9	0.000	4759.500	1.000
10	0.000	5326.107	1.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	7.156
2	25.045
3	42.934
4	60.824
5	78.713
6	96.602
7	114.491
8	132.381
9	150.270
10	168.159

- Cilindro sujeto a presión interna, grieta de longitud finita a través del espesor del cilindro.

Variación del espesor				
Datos (Nodo A7)				
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	t	R	P
1	0.0001	0.200	3.173	440.000
2	0.0001	0.220	3.173	440.000
3	0.0001	0.240	3.173	440.000
4	0.0001	0.260	3.173	440.000
5	0.0001	0.280	3.173	440.000
6	0.0001	0.300	3.173	440.000
7	0.0001	0.320	3.173	440.000
8	0.0001	0.340	3.173	440.000
9	0.0001	0.360	3.173	440.000
10	0.0001	0.380	3.173	440.000

Nota : Válido para $R \gg t$

	σ_h	x
1	6980.600	0.000
2	6346.000	0.000
3	5817.167	0.000
4	5369.692	0.000
5	4986.143	0.000
6	4653.733	0.000
7	4362.875	0.000
8	4106.235	0.000
9	3878.111	0.000
10	3674.000	0.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	123.732
2	112.484
3	103.110
4	95.178
5	88.380
6	82.488
7	77.332
8	72.783
9	68.739
10	65.122

Variación de la longitud de la grieta

Datos (Nodo A7)				
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in²)
	a	t	R	P
1	0.00014	0.280	3.173	440.000
2	0.00015	0.280	3.173	440.000
3	0.00016	0.280	3.173	440.000
4	0.00017	0.280	3.173	440.000
5	0.00018	0.280	3.173	440.000
6	0.00019	0.280	3.173	440.000
7	0.00020	0.280	3.173	440.000
8	0.00021	0.280	3.173	440.000
9	0.00022	0.280	3.173	440.000
10	0.00023	0.280	3.173	440.000

	σ_h	x
1	4986.143	0.000
2	4986.143	0.000
3	4986.143	0.000
4	4986.143	0.000
5	4986.143	0.000
6	4986.143	0.000
7	4986.143	0.000
8	4986.143	0.000
9	4986.143	0.000
10	4986.143	0.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	104.573
2	108.244
3	111.794
4	115.235
5	118.576
6	121.826
7	124.991
8	128.078
9	131.093
10	134.039

Variación de la presión

Datos (Nodo A7)

Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	t	R	P
1	0.0001	0.280	3.173	40.000
2	0.0001	0.280	3.173	140.000
3	0.0001	0.280	3.173	240.000
4	0.0001	0.280	3.173	340.000
5	0.0001	0.280	3.173	440.000
6	0.0001	0.280	3.173	540.000
7	0.0001	0.280	3.173	640.000
8	0.0001	0.280	3.173	740.000
9	0.0001	0.280	3.173	840.000
10	0.0001	0.280	3.173	940.000

	σ_h	x
1	453.286	0.000
2	1586.500	0.000
3	2719.714	0.000
4	3852.929	0.000
5	4986.143	0.000
6	6119.357	0.000
7	7252.571	0.000
8	8385.786	0.000
9	9519.000	0.000
10	10652.214	0.000

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
8.035
28.121
48.207
68.293
88.380
108.466
128.552
148.638
168.725
188.811

- Cilindro sujeto a presión interna, grieta interna.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)						
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Ancho de la grieta (in)	Radio inter. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Espesor del tubo (in)	Presión int. (lb/in ²)
	a	v	Ri	Ro	t	P
1	0.0001	0.001	3.113	3.313	0.200	440.000
2	0.0001	0.001	3.093	3.313	0.220	440.000
3	0.0001	0.001	3.073	3.313	0.240	440.000
4	0.0001	0.001	3.053	3.313	0.260	440.000
5	0.0001	0.001	3.033	3.313	0.280	440.000
6	0.0001	0.001	3.013	3.313	0.300	440.000
7	0.0001	0.001	2.993	3.313	0.320	440.000
8	0.0001	0.001	2.973	3.313	0.340	440.000
9	0.0001	0.001	2.953	3.313	0.360	440.000
10	0.0001	0.001	2.933	3.313	0.380	440.000

Ri/t	
1	15.565
2	14.059
3	12.804
4	11.742
5	10.832
6	10.043
7	9.353
8	8.744
9	8.203
10	7.718

	A	F
1	1.206	1.100
2	1.160	1.100
3	1.118	1.100
4	1.078	1.100
5	1.039	1.100
6	1.002	1.100
7	0.979	1.100
8	0.958	1.100
9	0.938	1.100
10	0.919	1.100

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
146.529
133.624
122.872
113.777
105.983
99.230
93.323
88.113
83.484
79.343

Variación de la longitud de la grieta

Datos (Nodo A7)						
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Ancho de la grieta (in)	Radio inter. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Espesor del tubo (in)	Presión int. (lb/in ²)
	a	v	Ri	Ro	t	P
1	0.00006	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
2	0.00007	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
3	0.00008	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
4	0.00009	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
5	0.00010	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
6	0.00011	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
7	0.00012	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
8	0.00013	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
9	0.00014	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000
10	0.00015	0.0001	3.033	3.313	0.280	440.000

Ri/t	
1	10.832
2	10.832
3	10.832
4	10.832
5	10.832
6	10.832
7	10.832
8	10.832
9	10.832
10	10.832

	A	F
1	1.039	1.100
2	1.039	1.100
3	1.039	1.100
4	1.039	1.100
5	1.039	1.100
6	1.039	1.100
7	1.039	1.100
8	1.039	1.100
9	1.039	1.100
10	1.039	1.100

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
82.094
88.672
94.794
100.544
105.983
111.156
116.098
120.839
125.401
129.802

Variación de la presión

Datos (Nodo A7)

Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Ancho de la grieta (in)	Radio inter. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Espesor del tubo (in)	Presión int. (lb/in ²)
	a	v	Ri	Ro	t	P
1	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	40.000
2	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	140.000
3	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	240.000
4	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	340.000
5	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	440.000
6	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	540.000
7	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	640.000
8	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	740.000
9	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	840.000
10	0.0001	0.002	3.033	3.313	0.280	940.000

Ri/t	
1	10.832
2	10.832
3	10.832
4	10.832
5	10.832
6	10.832
7	10.832
8	10.832
9	10.832
10	10.832

	A	F
1	1.039	1.100
2	1.039	1.100
3	1.039	1.100
4	1.039	1.100
5	1.039	1.100
6	1.039	1.100
7	1.039	1.100
8	1.039	1.100
9	1.039	1.100
10	1.039	1.100

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
9.635
33.722
57.809
81.896
105.983
130.070
154.157
178.244
202.331
226.418

- Grieta axisimétrica en un cilindro sujeto a tensión uniforme.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)						
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio inter. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	t	Ri	Ro	R	P
1	0.00010688	0.200	3.113	3.313	3.213	440.000
2	0.00010688	0.220	3.093	3.313	3.203	440.000
3	0.00010688	0.240	3.073	3.313	3.193	440.000
4	0.00010688	0.260	3.053	3.313	3.183	440.000
5	0.00010688	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	0.00010688	0.300	3.013	3.313	3.163	440.000
7	0.00010688	0.320	2.993	3.313	3.153	440.000
8	0.00010688	0.340	2.973	3.313	3.143	440.000
9	0.00010688	0.360	2.953	3.313	3.133	440.000
10	0.00010688	0.380	2.933	3.313	3.123	440.000

	Ri/t
1	15.565
2	14.059
3	12.804
4	11.742
5	10.832
6	10.043
7	9.353
8	8.744
9	8.203
10	7.718

	A	Ft	σ_t
1	1.340	1.100	5457.000
2	1.273	1.100	5457.000
3	1.207	1.100	5457.000
4	1.141	1.100	5457.000
5	1.074	1.100	5457.000
6	1.004	1.100	5457.000
7	0.979	1.100	5457.000
8	0.958	1.100	5457.000
9	0.938	1.100	5457.000
10	0.919	1.100	5457.000

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
109.998
109.997
109.997
109.996
109.996
109.996
109.995
109.995
109.995
109.995

Variación de la longitud de la grieta

Datos (Nodo A7)						
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio inter. del tubo (in)	Radio ext. del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	t	Ri	Ro	R	P
1	0.00002	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
2	0.00004	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
3	0.00006	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
4	0.00008	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
5	0.00010	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	0.00012	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
7	0.00014	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
8	0.00016	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
9	0.00018	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
10	0.00020	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000

	Ri/t
1	10.832
2	10.832
3	10.832
4	10.832
5	10.832
6	10.832
7	10.832
8	10.832
9	10.832
10	10.832

	A	Ft	σ_t
1	1.074	1.100	5457.000
2	1.074	1.100	5457.000
3	1.074	1.100	5457.000
4	1.074	1.100	5457.000
5	1.074	1.100	5457.000
6	1.074	1.100	5457.000
7	1.074	1.100	5457.000
8	1.074	1.100	5457.000
9	1.074	1.100	5457.000
10	1.074	1.100	5457.000

Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
47.581
67.290
82.414
95.164
106.397
116.552
125.891
134.584
142.749
150.471

- Grieta semielíptica en un cilindro sujeto a tensión uniforme.

Variación del espesor

Datos (Nodo A7)

Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Ancho de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio exterior del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	c	t	Ri	Ro	R	P
1	0.00013	0.700	0.200	3.113	3.313	3.213	440.000
2	0.00013	0.700	0.220	3.093	3.313	3.203	440.000
3	0.00013	0.700	0.240	3.073	3.313	3.193	440.000
4	0.00013	0.700	0.260	3.053	3.313	3.183	440.000
5	0.00013	0.700	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	0.00013	0.700	0.300	3.013	3.313	3.163	440.000
7	0.00013	0.700	0.320	2.993	3.313	3.153	440.000
8	0.00013	0.700	0.340	2.973	3.313	3.143	440.000
9	0.00013	0.700	0.360	2.953	3.313	3.133	440.000
10	0.00013	0.700	0.380	2.933	3.313	3.123	440.000

	ξ	Q	F _t	σ_t
1	0.000	1.000	1.039	5457.000
2	0.000	1.000	1.037	5457.000
3	0.000	1.000	1.035	5457.000
4	0.000	1.000	1.034	5457.000
5	0.000	1.000	1.033	5457.000
6	0.000	1.000	1.032	5457.000
7	0.000	1.000	1.031	5457.000
8	0.000	1.000	1.030	5457.000
9	0.000	1.000	1.029	5457.000
10	0.000	1.000	1.028	5457.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	114.5632
2	114.3611
3	114.1852
4	114.0301
5	113.8916
6	113.7667
7	113.6529
8	113.5484
9	113.4517
10	113.3615

Variación de la longitud de la grieta

Datos (Nodo A7)							
Tubería de 6"	Longitud de la grieta (in)	Ancho de la grieta (in)	Espesor del tubo (in)	Radio int. del tubo (in)	Radio exterior del tubo (in)	Radio medio del tubo (in)	Presión (lb/in ²)
	a	c	t	Ri	Ro	R	P
1	0.000070	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
2	0.000080	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
3	0.000090	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
4	0.000100	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
5	0.000110	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
6	0.000120	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
7	0.000130	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
8	0.000140	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
9	0.000150	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000
10	0.000160	0.220	0.280	3.033	3.313	3.173	440.000

	ξ	Q	F_t	σ_t
1	0.000	1.000	1.033	5457.000
2	0.000	1.000	1.033	5457.000
3	0.000	1.000	1.033	5457.000
4	0.000	1.000	1.033	5457.000
5	0.000	1.000	1.033	5457.000
6	0.000	1.000	1.033	5457.000
7	0.000	1.000	1.033	5457.000
8	0.000	1.000	1.033	5457.000
9	0.000	1.000	1.033	5457.000
10	0.000	1.000	1.033	5457.000

	Factor de intensidad de esfuerzo (K_I)
1	83.5736
2	89.3439
3	94.7635
4	99.8895
5	104.7650
6	109.4235
7	113.8915
8	118.1908
9	122.3391
10	126.3513

NOMENCLATURA

K_c = factor de intensidad de esfuerzo crítico para carga estática y condiciones de esfuerzo plano de restricciones variables. Así, este valor depende del espesor de la muestra y de la geometría, así como del tamaño de la grieta.

K_{Ic} = factor de intensidad de esfuerzo crítico para carga estática y condiciones de esfuerzo plano de restricciones máximas. Así, este valor es un mínimo valor para placas gruesas.

K_{Id} = factor de intensidad de esfuerzo crítico para carga dinámica (impacto) y condiciones de esfuerzo plano de restricción.

σ_{ys} = esfuerzo de fluencia.

C = constante, función del espécimen y geometría de la grieta.

σ = esfuerzo nominal, ksi (MN/m^2).

a = tamaño de la grieta, in.(mm).

G = tasa de liberación de energía, también se conoce como fuerza para la extensión de la grieta o fuerza que provoca el agrietamiento.

G_c = resistencia que el material tiene para no fracturarse.

β y Φ_0 = integral elíptica.

δ = desplazamiento de abertura en la punta de la grieta.

A = Suma de tolerancias por ranuras y filetes, así como por corrosión y erosión .

P = presión interna de diseño.

D = diámetro nominal de la tubería.

F = factor de diseño por tipo de construcción.

t = espesor de tubo.

T = factor que varía dependiendo de la temperatura.

σ_L = esfuerzo longitudinal actuante en un punto de la tubería.

σ_{axial} = esfuerzo axial en el punto.

$\sigma_A = 0.72$ esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

σ_b = resultante de esfuerzos flexionantes.

σ_E = esfuerzo combinado debido a efectos de temperatura.

σ_H = esfuerzo circunferencial.

$\sigma_t = Mt / 2Z$ = esfuerzo torsionante.

i_i = factor de intensificación de esfuerzos en el plano.

i_o = factor de intensificación de esfuerzos fuera del plano.

M_i = momento flexionante en el plano.

M_o = momento flexionante fuera del plano.

Mt = momento torsional.

M_X = Componente de M_C en un plano vertical en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs-pie.

M_Y = Componente de M_C en el plano horizontal, lbs-pie.

M_Z = Componente de M_C en un plano vertical paralelo a la flecha de la turbina, lbs-pie.

M_r = Momento resultante, lbs-pie.

M_c = Momento resultante, lbs-pie.

D_c = Diámetro equivalente, pulg.

F_X = Componente horizontal de F_C paralela a la flecha de la turbina, lbs.

F_Y = Componente vertical de F_C , lbs.

F_z = Componente horizontal de F_C en ángulo recto a la flecha de la turbina, lbs.

F_r = fuerzas resultantes permisibles, in.

F_c = fuerza resultante combinada, lbs.

S = succión.

d = descarga.

X_1, Y_1 y Z_1 = Distancia entre las boquillas de la turbina, pies.

E = factor de calidad de junta.

S = esfuerzo de cedencia mínimo especificado (SMYS).

Y = coeficiente por tipo de material y temperatura.

Z = módulo de sección.

M_{is} = Momentos flexionantes en el plano debido a carga sostenida.

M_{os} = Momentos flexionantes fuera del plano debido a carga sostenida.

D_o = Diámetro exterior de la tubería.

i = Factor de intensificación de esfuerzo.

t_{cor} = Corrosión del espesor de la pared de la tubería.

z_{cor} = Modulo de sección de la tubería.

F_{ax} = Fuerza axial en la tubería.

d_{cor} = diámetro interior de la tubería corroída.

REFERENCIAS

-
- ¹ H. M. Westergaard, "Bearing Pressures and Cracks," *Transactions, ASME, Journal of Applied Mechanics*, 1939.
 - ² G. R. Irwin, "Analysis of Stresses and Strain Near the End of a Crack Traversing a Plate," *Transactions, ASME, Journal of Applied Mechanics*, vol 24, 1957.
 - ³ A. A. Griffith, "The Phenomena of Rupture and Flaw in Solids," *Transactions, Royal Society of London, A*, 221, 1920.
 - ⁴ C. P. Paris and G. C. Sih, "Stress Analysis of Crack," in "Fracture Toughness Testing and Its Applications," *ASTM STP No. 381*, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1965.
 - ⁵ H. Tada, P. C. Paris and G. R. Irwin, ed., *Stress Analysis of Cracks Handbook*, Del Research Corporation, Hellertown, Pa., 1973.
 - ⁶ Irwin, G. R. "Onset of Fast Crack Propagations in High Strength Steel and Alluminium Alloys" *Sagamore Research Conference Proceeding*, Vol. 2, 1956, pp. 289-305.
 - ⁷ Anderson, T. L., "Fracture Mechanics: fundamentals and applications" *CRC Press*, 1991
 - ⁸ G. R. Irwin, "Plastic Zone Near a Crack and Fracture Transition, and Fracture Control," *Engineering Fracture Mechanics*, 1, No. 2, Aug. 1968.
 - ⁹ G. R. Irwin, "Linear Fracture Mechanics, Fracture Transition, and Fracture Control," *Engineering Fracture Mechanics*, 1, No. 2, Aug. 1968.
 - ¹⁰ F. A. McClintock and J. Hult, "Elastic-Plastic Stress and Strain Distribution Around Sharp Notches in Repeated Shear," *Nineth International Congress of Applied Mechanics*, New York, 1956.
 - ¹¹ J. C. Newman, Jr., "An Improved Method of Collocation for the Stress Analysis of Cracked Plates with Various Shaped Boundaries," *NASA Techical Note, NASA TN D-6376*, Aug. 1971.
 - ¹² G. R. Irwin, "The Crack Extension Force for a Part Thorough Crack in a Plate," *Transactions, ASME, Journal of Applied Mechanics*, vol 29, No. 4, 1962.
 - ¹³ W. K. Wilson, "Stress Intensity Factors for Compact Specimens Used To Determine Fracture Mechanics Parameters," *Research Report 73-1E7FMPWR-R1*, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, July 27, 1973.
 - ¹⁴ W. K. Wilson, "Analytical Determination of Stress Intensity Factors for Manjoine Brittle Fracture Specimen," *Research Report AEC, WERL 0029-3*, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, Aug. 26, 1965.
 - ¹⁵ W. K. Wilson, "Stress Intensity Factors for Compact Tension Specimen," *Research Memorandum 67-1D6-BTLFR-M1*, Westinghouse Research Laboratories, Pittsburgh, June 12, 1967.
 - ¹⁶ Anderson, T. L., "Fracture Mechanic: fundamentals and aplications." *CRC Press*, 1991.
 - ¹⁷ J. W. Fisher and B. T. Yen, "Design, Structural Details, and Discontinuities in Steel, Safety and Reliability of Metal Structural," *ASCE*, Nov. 2, 1972.
 - ¹⁸ E. V. Bravenec, "Analysis of Brittle Fractures During Fabricarion and Testing," *ASCE*, March 1972.

¹⁹ T. J. Dolan, "Preclude Failure: A Philosophy for Materials Selections and Simulated Service Testing," Wm. M. Murray Lecture, SESA fall Meeting, Houston, Oct. 1969, published SESA Journal of Experimental Mechanics, Jan 1957.