



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN  
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERIA DE SISTEMAS  
DOCTORADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

**SEGURIDAD E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE  
PLATAFORMAS MARINAS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

**P R E S E N T A :**

**M. EN C. JOSÉ LOURDES FÉLIX HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. JAIME REYNALDO SANTOS REYES



México D.F.

Julio 2011



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

SIP-14

*ACTA DE REVISIÓN DE TESIS*

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 11:00 horas del día 16 del mes de Junio del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

**SEGURIDAD E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS**

Presentada por el alumno:

**FÉLIX**

Apellido paterno

**HERNÁNDEZ**

Apellido materno

**JOSÉ LOURDES**

Nombre(s)

Con registro:

B	0	7	1	6	5	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

**DOCTORADO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS**

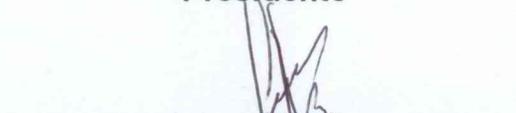
Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

**Director de tesis**

  
DR. JAIME REYNALDO SANTOS REYES

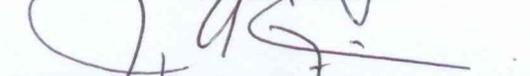
**Presidente**

  
DR. LUIS MANUEL HERNÁNDEZ SIMÓN

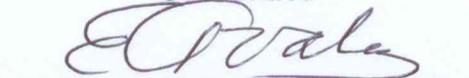
**Segundo Vocal**

  
DR. RICARDO TEJEIDA PADILLA

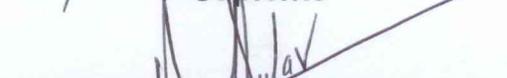
**Tercer Vocal**

  
DR. JORGE ARMANDO ROJAS RAMÍREZ

**Secretario**

  
DRA. ELVIRA ÁVALOS VILLARREAL

**Suplente**

  
DRA. CLAUDIA HERNÁNDEZ AGUILAR

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
DR. JAIME ROBLES GARCÍA





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 27 del mes 07 del año 11, el (la) que suscribe M. en C. José Lourdes Félix Hernández alumno (a) del Programa de Doctorado en Ciencias en Ingeniería de Sistemas con número de registro B071654, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Jaime Reynaldo Santos Reyes** y cede los derechos del trabajo intitulado: Seguridad e Integridad Estructural de Plataformas Marinas, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos" Edificio, 5, Segundo Piso Colonia Lindavista, D.F., C.P. 07738, Mexico. Tel, 57296000. Escrito que deberá dirigirse al **Dr. Jaime Reynaldo Santos Reyes**. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
M en C. José Lourdes Félix Hernández

Nombre y firma

# DEDICATORIAS

---

---

A mi esposa

María Zonia Tapia García

A mis padres

Catalina Hernández Chable  
Lázaro Félix Trinidad

A mis suegros

Victoria García Vásquez  
Virginio Tapia Galicia

+

A mi entrañable amigo

René Escamilla Cornejo

# AGRADECIMIENTO

---

---

La realización de este proyecto de investigación de SEGURIDAD E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS, ha sido posible gracias al modesto consejo del Dr. Jaime Reynaldo Santos Reyes, y además quiero en esta oportunidad agradecer a Dios todo poderoso que nos ha conservado con vida, con salud, que nos dio inteligencia, y nos ha guiado y cuidado hasta hoy.

## **A los maestros:**

Gracias, queridos maestros, por que cual velita encendida se fueron consumiendo para darnos la luz del conocimiento, gracias por vuestra paciencia, por vuestra simpatía, por vuestra comprensión, y recuerden que lo que ustedes han sembrado durante estos años pasados, pronto darán sus más exquisitos frutos.

## **A los Compañeros:**

Gracias a cada uno de mis compañeros, por vuestra simpatía y amistad, por sus bromas que cada día le daban un matiz cálido a nuestra vida estudiantil, gracias **Politécnico** por abrazarnos en tus aulas y además porque en tu seno crecimos y nos hemos formado como alumnos.

## Resumen

---

---

Los sistemas estructurales de plataformas marinas se han utilizados en la actividad petrolera por décadas, siendo la industria del petróleo y el gas una de las industrias más reguladas en el mundo cuando se trata de seguridad. Una plataforma marina es una estructura metálica a flote y/o instalada sobre el fondo marino y fijado a este a través de pilotes o líneas de fijación. La función principal de esta estructura es permitir la instalación de los equipos requeridos para las operaciones de exploración y explotación de hidrocarburos. Por otro lado, la seguridad del sistema estructural generalmente es obtenida por el diseño de acuerdo a las normas y métodos establecidos, para una vida útil esperada. Si una estructura está destinada a ser utilizada mas allá de su vida de diseño, debería de ser ejecutado un control exhaustivo de la seguridad. En particular esto podría ser importante con respecto a la fatiga y otros mecanismos de daños. Sin embargo, normas y reglamentos han sido modificados desde el diseño original.

La perspectiva del país en términos de seguridad energética y crecimiento económico se pone en riesgo, debido a los esfuerzos en exploración y explotación realizados por PEMEX han proporcionado algunas veces poco satisfactorios. Una de sus consecuencias radica precisamente en el colapso estructural de plataformas marinas. En general, el colapso de un sistema estructural como es el caso de una plataforma marina se puede entender como la ocurrencia de algún tipo de falla que conduce a la pérdida parcial o total de la instalación (incluyendo equipos, entre otros). En general, el colapso de un sistema estructural como es el caso de una plataforma marina puede entenderse como la ocurrencia de algún tipo de falla que conduce a la pérdida parcial o total de la instalación (incluyendo equipos, entre otros). Durante los últimos años, se han publicado una gran cantidad de trabajos de investigación sobre la concentración de tensiones en las uniones tubulares de estructuras. Además, se puede argumentar que desde la concepción y construcción de las primeras plataformas marinas se ha intensificado la investigación sobre estructuras tubulares. La mayor parte de estos han sido motivados, por la necesidad de garantizar un diseño confiable de las estructuras tubulares. Por otro lado, el envejecimiento de estas estructuras nos hace tener la necesidad de optar por nuevos métodos de evaluación de la integridad de las estructuras existentes.

Las estructuras tubulares cilíndricas huecas de las plataformas marinas están sometidas a subsidencias de aumento de cargas externas. Lo anterior hace que dichas estructuras se expongan a las cargas, a veces, más allá de su diseño estructural; lo cual resulta en fallas estructurales de dichos sistemas tal y como se mostrado en accidentes que han ocurrido en los últimos años.

Este proyecto de tesis surge de una necesidad de llevar a cabo una investigación aplicada a un caso particular de una plataforma marina fija ubicada en la Sonda de Campeche.

## Abstract

---

---

The offshore structural systems have been used in the oil industry for decades, with the oil and gas one of the most regulated industries in the world when it comes to security. An offshore platform is a floating metal structure and / or installed on the seabed and attached to this through piles or lines of fixation. The main function of this structure is to allow the installation of the equipment required for the exploration and exploitation of hydrocarbons. In addition, system security is usually obtained by structural design according to the rules and established methods, for an expected useful life. If a structure is intended to be used beyond their design life, should be implemented a comprehensive security control. In particular this could be important with regard to fatigue and other mechanisms of damage. However, rules and regulations have been modified since the original design.

The prospect of the country in terms of energy security and economic growth is at risk due to the exploration and development efforts undertaken by PEMEX have provided sometimes unsatisfactory. One consequence is precisely the structural collapse of marine platforms. In general, the collapse of a structural system as in the case of an offshore platform can be understood as the occurrence of any failure leading to partial or total loss of the facility (including equipment, etc.). In general, the collapse of a structural system as in the case of an offshore platform can be understood as the occurrence of any failure leading to partial or total loss of the facility (including equipment, etc.). In recent years, there have been a lot of research on stress concentration in joints tubular structures. In addition, it can be argued that since the design and construction of the first offshore platforms has intensified research on tubular structures. Most of these have been motivated by the need to ensure a reliable design of tubular structures. On the other hand, the aging of these structures makes us feel the need to opt for new methods for assessing the integrity of existing structures.

The cylindrical hollow tubular structures of offshore platforms are subjected to subsidence of increasing external loads. This makes these structures are exposed to loads, sometimes beyond their structural design, resulting in structural failure of these systems as shown in accidents that have occurred in recent years.

This thesis project stems from a need to carry out applied research in a particular case of a fixed offshore platform located in the Campeche Sound.

**Contenido**

Índice de figuras ..... (xii)  
 Índice de tablas ..... (xvi)  
 Simbología y nomenclatura .....(xvii)

**CAPITULO I: INTRODUCCIÓN .....**

1.1 Antecedentes..... 1  
 1.2 Investigación sobre seguridad estructural ..... 2  
 1.3 Industria del petróleo en el contexto internacional y nacional..... 11  
     1.3.1 Contexto internacional..... 11  
         1.3.1.1 Producción de crudo y gas ..... 12  
         1.3.1.2 Accidentes y Fallas estructurales ..... 13  
     1.3.2 Contexto nacional..... 15  
         1.3.2.1 Producción de crudo y gas ..... 16  
         1.3.2.2 Accidentes y Fallas estructurales ..... 17  
 1.4 Justificación de la tesis..... 18  
 1.5 Objetivos..... 19  
     1.5.1 Objetivos general..... 19  
     1.5.2 Objetivos específicos..... 20  
 1.6 Metodología de la investigación ..... 20  
 1.7 Delimitación de la investigación..... 22  
 1.8 Productos de la investigación ..... 24  
 1.9 Presentación de la tesis..... 24

**CAPITULO II: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA.....**

2.1 Teoría General de Sistemas (TGS) ..... 27  
     2.1.1 Tipos de sistemas ..... 29  
     2.1.2 Sistemas cerrados ..... 31  
     2.1.3 Sistemas abiertos ..... 31  
     2.1.4 Sistemas suaves..... 32  
     2.1.5 Sistemas duros ..... 32  
         2.1.5.1 Características de los Sistemas Duros ..... 33  
 2.2 Sistemas complejos..... 33  
     2.2.1 Teoría de sistemas complejos ..... 34  
     2.2.2 Tipos de complejidad ..... 35  
     2.2.3 Dinámica de los Sistemas Complejos ..... 36  
     2.2.4 Fractales ..... 37  
         2.2.4.1 Geometría Fractal ..... 38  
         2.2.4.2 Propiedad de los Fractales ..... 39  
         2.2.4.3 Dimensión Fractal ..... 40  
 2.3 Teoría de estructuras..... 43  
     2.3.1 Introducción ..... 43  
     2.3.2 Esfuerzos y deformaciones ..... 44  
     2.3.3 Principio de superposición ..... 45  
     2.3.4 Teoría de elasticidad..... 46  
         2.3.4.1 Estado de tensiones y deformaciones ..... 47  
         2.3.4.2 Campo de deformaciones ..... 49  
         2.3.4.3 Densidad de energía elástica..... 50  
         2.3.4.4 Ecuaciones de compatibilidad..... 51  
         2.3.4.5 Ecuaciones diferenciales de equilibrio ..... 51

2.3.4.6 Relación esfuerzo deformación.....	52
2.3.5 Análisis esfuerzos .....	53
2.3.5.1 Definición de esfuerzos.....	54
2.3.5.2 Esfuerzos axiales en armaduras de plataformas marinas .....	55
2.3.5.3 Concentración de esfuerzos en nodos de plataformas marinas .....	55
2.3.5.4 Esfuerzos críticos.....	56
2.3.5.5 Esfuerzos residuales.....	57
2.3.5.6 Esfuerzos críticos en cilindros a compresión .....	58
2.3.6 Teoría de la Plasticidad .....	60
2.3.6.1 Esfuerzo Plástico .....	60
2.3.6.2 Criterio de plastificación.....	62
2.3.6.3 Regla de endurecimiento .....	63
2.3.6.4 Articulación plástica y mecanismo de colapso plástico.....	63
2.3.6.5 Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas ....	64
2.3.7 Esfuerzo térmicos .....	66
2.3.7.1 Deformación elástica, plástica y térmica..... (EPT) en nodos estructurales tubulares .....	69
2.3.7.2 Fatiga.....	73
2.3.7.3 Concentración de esfuerzos .....	75
2.3.8 Elemento finito (EF) .....	75
2.3.8.1 Discretización del continuo .....	75
2.3.8.2 Funciones de forma .....	76
2.3.8.2 Ensamble y solución .....	76
2.4 Teoría de seguridad Estructural .....	77

### **CAPITULO III: METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN .....**

3.1 Justificación del modelo y Metodología .....	82
3.2 Cargas involucradas en la integridad estructural y propiedades del material.....	87
3.3 Factores correctores de distribución de esfuerzos .....	91
3.4 Integridad estructural.....	91
3.5 Estrategia para la integridad estructural de plataformas marinas.....	91
3.6 Variabilidad de la resistencia estructural .....	93
3.7 Relajación de esfuerzo en tiempo fractal.....	93
3.8 Generación de modelo en Ansys .....	94
3.9 Una aplicación práctica del Ansys .....	97
3.10 Breve historia de la investigación operativa.....	99

### **CAPITULO IV: INSPECCION ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS.....**

4.1 Introducción .....	101
4.2 Evaluación no Destructiva (END) .....	103
4.3 Clasificación de END .....	104
4.4 Tipos de ensayos no destructivos .....	106
4.4.1 Ensayo por líquidos penetrantes .....	106
4.4.1.1 Procedimiento general de inspección PT .....	107
4.4.2 Ensayo por partículas magnéticas.....	109
4.4.2.1 Procedimiento de partículas magnéticas .....	111
4.4.3 Ensayo radiográfico.....	111
4.4.4 Ensayo por corrientes parasitas .....	114
4.4.5 Ensayo por ultrasonidos .....	116
4.5 Ventajas y desventajas de la NDE .....	118

### **CAPITULO V: APLICACIÓN NUMERICA .....**

5.1 Descripción de los complejos petroquímicos.....	120
5.2 Descripción de campo petrolero en aguas someras.....	123
5.2.1 Descripción de la plataforma .....	126
5.3 Aplicación numérica .....	131
5.4 Característica de la plataforma marina .....	132
5.5 Simulación numérica de la plataforma marina.....	132
5.6 Construcción del modelo general de la plataforma marina.....	133
5.7 Análisis numérico con cargas y combinaciones .....	134
5.8 Resultados de esfuerzos en nodos estructurales .....	135
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO .....</b>	
6.1 Discusión.....	168
5.2 Conclusiones.....	168
5.3 Futuro trabajo .....	170
<b>Referencias .....</b>	<b>171</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>190</b>

## Índice de figuras

---

	Pág.
<i>Figura 1.1.</i> Pico de Producción. Elaboración propia. Fuente estadística	12
<i>Figura 1.2.</i> Producción de Gas. Elaboración propia. Fuente estadística	13
<i>Figura 1.3.</i> Demanda mundial de Gas. Elaboración propia. Fuente estadística	13
<i>Figura 1.4.</i> Producción por Activos. Elaboración propia. Fuente estadística	17
<i>Figura 1.5.</i> Plataformas	18
<i>Figura 1.6.</i> Análisis Estructural Sistemático, Churchman y Ackoff	21
<i>Figura 1.7.</i> Enfoques teóricos	22
<i>Figura 1.8.</i> Tipo de solicitaciones en plataformas	23
<i>Figura 2.1.</i> Teoría General de Sistemas Matemáticas, Filosóficas, TGS	30
<i>Figura 2.2.</i> Estructura de realimentación negativa en el proceso básico de toma de decisión	37
<i>Figura 2.3.</i> Triangulo Sierpinski Fractal auto similar	39
<i>Figura 2.4.</i> Componentes de Fuerzas internas	44
<i>Figura 2.5.</i> Deformación axial	44
<i>Figura 2.6.</i> Principio de superposición	45
<i>Figura 2.7.</i> Acciones de las cargas aplicadas	46
<i>Figura 2.8.</i> Acciones de las cargas aplicadas	46
<i>Figura 2.9.</i> Esfuerzo interno	48
<i>Figura 2.10.</i> Diagrama de tensión y deformación para el acero dulce	48
<i>Figura 2.11.</i> Fuerzas distribuidas sobre el volumen	49
<i>Figura 2.12.</i> Densidad de energía	50
<i>Figura 2.13.</i> Estado de esfuerzos	52
<i>Figura 2.14.</i> Esfuerzos en un punto	54
<i>Figura 2.15.</i> Esfuerzo axial	55
<i>Figura 2.16.</i> Gráfica de la curva de Euler	57
<i>Figura 2.17.</i> Representación esquemática de los tres tipos de curvas de esfuerzos. <i>I</i> Es la curva ideal y de <i>o</i> y <i>U</i> son dos tipos real de curva	62
<i>Figura 2.18.</i> Mecanismo de colapso para el marco	64
<i>Fig. 2.19.</i> Junta estructural tipo K-T	65
<i>Figura 2.20a.</i> Termofluencia de una barra	67
<i>Figura 2.20b.</i> Relajación de esfuerzo	67
<i>Figura 2.21.</i> Curva típica de deformación producida en función de tiempo para esfuerzo y temperatura constante	68
<i>Figura 2.22.</i> Junta estructural tipo K-T	73
<i>Figura 2.23.</i> Concentración de esfuerzo	74
<i>Figura 2.24.</i> Alternando esfuerzo por fatiga	74
<i>Figura 2.25.</i> Concentración de esfuerzos en nodos	75
<i>Figura 2.26.</i> Discretización del continuo	76

	<i>Pág.</i>
<i>Figura 3.1.</i> Diagrama de flujo de Análisis Estructural Sistemático, Churchman y Ackoff	86
<i>Figura 3.2.</i> Marco estructural de una plataforma “X”	90
<i>Figura 3.3.</i> Enfoque estratégico de integridad estructural	92
<i>Figura 3.4.</i> Opción de análisis	94
<i>Figura 3.5.</i> Definición del tipo de elemento	95
<i>Figura 3.6.</i> Definición de las propiedades del material	95
<i>Figura 3.7.</i> Definición de los nodos	96
<i>Figura 3.8.</i> Generación del modelo en 3D	96
<i>Figura 3.9.</i> Deflexión	98
<i>Figura 3.10.</i> Esfuerzo	98
<i>Figura 4.1.</i> Bombardero B-17F en vuelo después de una colisión en el aire	102
<i>Figura 4.2.</i> Ensayo por líquidos penetrante	107
<i>Figura 4.3.</i> Inspección de partículas magnéticas	110
<i>Figura 4.4.</i> Línea de fuerzas magnéticas	110
<i>Figura 4.5.</i> Defecto de porosidad presente en la radiografía	113
<i>Figura 4.6.</i> Corriente parasita	115
<i>Figura 4.7.</i> Ultrasonido	117
<i>Figura 5.1.</i> Localización de pozos y líneas de sección estratigráficas Estudiadas en la Sonda de Campeche, sur del Golfo de México	120
<i>Figura 5.2.</i> Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste	125
<i>Figura 5.3.</i> Red de plataformas marinas del complejo Ku-Maloob-Zap en la época actual	126
<i>Figura 5.4.</i> Uniones de Plataformas marinas	127
<i>Figura 5.5.</i> Integración de plataforma marina	128
<i>Figura 5.6.</i> Conexión tubular	129
<i>Figura 5.7.</i> Nodos estructurales	130
<i>Figura 5.8.</i> Marco tipo octapodo de plataforma marina	131
<i>Figura 5.9.</i> Elementos del modelo general	133
<i>Figura 5.10.</i> Modelo general con condición de frontera	134
<i>Figura 5.11.</i> Elementos tendientes al Colapso de la plataforma “X”	135
<i>Figura 5.12a.</i> Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares	137
<i>Figura 5.12b.</i> Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares	137
<i>Figura 5.12c.</i> Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares	138
<i>Figura 5.12d.</i> Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares	138
<i>Figura 5.13.</i> Parámetro matemático de Donnell	139
<i>Figura 5.14.</i> Modelo de plataforma “P-A” generado por el software ANSYS	144

	<i>Pág.</i>
<i>Figura 5.15.</i> Deformación plástica en nodos estructurales tubulares de la Plataforma P-A” generado por el software ANSYS	144
<i>Figura 5.16a.</i> Deformación plástica en nodos estructurales	146
<i>Figura 5.16b.</i> Deformación plástica en nodos estructurales	146
<i>Figura 5.16c.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	147
<i>Figura 5.16d.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	147
<i>Figura 5.16e.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	148
<i>Figura 5.1f.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	148
<i>Figura 5.1g.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	149
<i>Figura 5.16h.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	149
<i>Figura 5.16i.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	150
<i>Figura 5.16j.</i> Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor	150
<i>Fig. 5.17a.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	151
<i>Fig. 5.17b.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	151
<i>Fig. 5.17c.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	152
<i>Fig. 5.17d.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	152
<i>Fig. 5.17e.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	153
<i>Fig. 5.17f.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	153
<i>Fig. 5.17g.</i> Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	154
<i>Fig. 5.18.</i> Factor de concentración de Esfuerzo a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica	155
<i>Fig. 5.19.</i> Factor de concentración de esfuerzo plástico en nodo estructural	155
<i>Figura 5.20a.</i> Esfuerzo de relajación	161
<i>Figura 5.20b.</i> Esfuerzo de relajación	162
<i>Figura 5.20c.</i> Esfuerzo de relajación	162
<i>Figura 5.20d.</i> Esfuerzo de relajación	163

<i>Figura 5.20e.</i> Esfuerzo de relajación	163
<i>Figura 5.20f.</i> Esfuerzo de relajación	164
<i>Figura 5.20g.</i> Esfuerzo de relajación	164
<i>Figura 5.21.</i> Esfuerzo térmico en los nodos estructurales	165
<i>Figura 5.22.</i> Esfuerzo de deformación térmica	165
<i>Figura 5.23.</i> Termofluencia	166
<i>Figura 5.24.</i> Rapidez de deformación	167

## Índice de tablas

---

---

	Pág.
Tabla 2.1a <i>Pensadores en el desarrollo de la ciencia</i>	28
Tabla 2.2b. <i>Pensadores en el desarrollo de la ciencia</i>	29
Tabla 3.1. <i>Propiedades físicas del material</i>	87
Tabla 3.2 <i>Cargas gravitacionales</i> – Nivel + 19.100 m	88
Tabla 3.3 <i>Cargas gravitacionales</i> – Nivel + 27.939 m	88
Tabla 3.4 Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Operación	89
Tabla 3.5. Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Tormenta	90
Tabla 4.1. <i>Resúmenes de ventajas y desventajas</i>	119
Tabla 5.1. <i>Industria petroquímica de PEMEX plantas y personal ocupado, 1997. PEMEX (1997), Memoria de Labores</i>	123
Tabla 5.2. <i>Característica geométrica de plataforma</i>	132
Tabla 5.3. <i>Tipos de carga</i>	134
Tabla 5.4. <i>Esfuerzos en elementos tubulares</i>	136
Tabla 5.5a. <i>Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"</i>	140
Tabla 5.5b. <i>Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"</i>	141
Tabla 5.5c. <i>Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"</i>	142
Tabla 5.5d. <i>Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"</i>	143
Tabla 5.6a. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	156
Tabla 5.6b. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	157
Tabla 5.6c. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	158
Tabla 5.6d. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	159
Tabla 5.6e. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	160
Tabla 5.6f. <i>Esfuerzos de deformación térmica</i>	161

# Simbología y nomenclatura

---

---

## Nomenclatura

API	Instituto Americano del Petróleo
NRF	Norma de Referencia
BSI	Institución de Estándares Británica
LFRD	Carga y Factor de Resistencia de Diseño
ISO	Organización Internacional de Estandarización
WSD	Dinámica Mundial del Acero
AISC	Instituto Americano de la Construcción del Acero
IMP	Instituto Mexicano del Petróleo
FPSO	Almacenamiento de Producción Flotante y Descarga
LBZ	Zonas Locales Quebradizas
HAZ	Zona afectada por el calor
R-MISO	Múltiples Entradas Inversas de Sola Producción
PDF	Función de Densidad de Probabilidad
SMAS	Sistema de Seguridad, Administración y Evaluación
OPEP	Organización de Países Exportadores de Petróleo
KMZ	Ku-Maloob-Zaap
MEF	Método de Elemento Finito
TGS	Teoría General de Sistemas
aC	Antes de Cristo
TCS	Taxonomía de Ciencias de Sistemas
SD	Sistema Duro
DH-B	Dimension Hausdorff-Besicovitch
DT	dimensión topológica
R/S	Rango Reescalado
EPT	Elastoplasticatermica
EF	Elemento Finito
ASD	Método de Esfuerzos Permisibles
AISI	Americano del hierro y instituto del acero
ENDs	Evaluaciones no destructivas
IND	Inspección no destructiva
PT	Líquidos penetrantes
<i>FS</i>	Factor de seguridad
DCR	Diseño y Reglamento de Construcciones
IO	Investigación de Operaciones
MS	Administración científica

NW  
SNM  
NTCDF  
Federal

Noroeste  
Superficie nivel medio del mar  
Norma Técnicas Complementarias del Distrito

## Simbología

$R$	Distancia
$T$	Tiempo
$c$	Constante
$n$	Indicador del valor de la serie de tiempo
$H$	Exponente o coeficiente de Hurst
$F$	Fuerza exterior
$M_{x,y,z}$	Momentos en direcciones de los ejes coordenados
$B^l$	Deformación
$\alpha$	Angulo de deformación
$P$	Carga
$R_{A,B}$	Reacciones
$D$	Desplazamiento
$\sigma$	Tensión normal
$\varepsilon$	Alargamiento unitario
$L$	Longitud del elemento
$u$	Deformación unitaria o desplazamiento
$\Delta$	Vector que contienen las deformaciones
$U$	Energía de deformación
$U_0$	Densidad de energía de deformación
$V$	Volumen del cuerpo
$\varepsilon^t$	Tensor de deformación
$\frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} = \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2}$	Deformación en términos de desplazamiento
$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} + b_1 = 0$	Estado de esfuerzos y equilibrio
$C_e$	Coeficiente del estado de esfuerzo
$E$	Modulo de Elasticidad o Young
$\nu$	Poisson del acero
$P$	Fuerza externa
$A$	Área sobre el cual se distribuye la carga
$r$	Radio de giro
$\sigma_{cr}$	Esfuerzo crítico
$D/t$	Relación diámetro-espesor
$K_c$	Constante

$z$	Parámetro de Batdorf
$t$	Espesor de la placa
$R$	Radio
$\sigma$	Esfuerzo real
$\varepsilon$	Deformación real.
$\varepsilon^p$	Deformación plástica
$\varepsilon$	Deformación elástica
$\sigma_o$	Coefficiente
$m$	Exponente de endurecimiento por deformación
$k$	Valor característico del material
$f(\sigma)$	Invariante cuadrático
$\sigma^i$	Vector de tensión
$\sigma$	Tensor de tensiones
$g_{ij}$	Componentes del tensor métrico del espacio
$Q^2$	Vector de tensión
$\lambda$	Deformación plástica total equivalente
$M_p$	Momento plástico
$W_C$	Carga de colapso
$\beta$ y $\tau$	Parámetros Geométrico
$D$	Diámetro mayor
$d$	Diámetro menor
$g$	Separación
$\sigma_{yy}$ , $\sigma_{xy}$ y $\sigma_{xx}$	Esfuerzos
$\delta_o$	Alargamiento
$t_o$	Intervalo de tiempo
$\sigma_o$	Esfuerzo de tensión inicial
$\eta$	Viscosidad de corte
$A''$	Área de números de átomos
$\alpha$	Tensión inversa
$n$	Valores del exponente
$\Delta t^I$	Cambios de temperatura en cada nodo
$\varepsilon_{ii}^0$	Estado inicial de deformaciones restringidas
$\sigma_{ii}^0$	Estado de esfuerzo en tensión no equilibrado
$W$	Energía interna de deformación
$\Delta t$	Incremento del tiempo
$\Delta t^M$	Cambio térmico medio
$K_e$	Matriz de rigidez del elemento
$h$	Espesor del cilindro
$R_d$	Rapidez de termofluencia

$\Delta_d$	Incremento de deformación
$\Delta T^M$	Cambio térmico medio en Kelvin
$n$	Número de nodos en el elemento.
$\{b\}$	Vector de fuerzas
$\{u\}$	Variables nodales
$R_a$	Resistencia Permisible de Diseño.
$R_n$	Resistencia Nominal.
$f$	Factor de Seguridad.
$R$	Resistencia requerida
$R_n$	Resistencia nominal
$Q_i$	Efectos de carga
$\phi$	Factor de resistencia correspondiente a
$\gamma_i$	Factor de carga correspondiente a $Q_i$
$\phi R_n$	Resistencia de diseño
$\sum \gamma_i Q_i$	Resistencia requerida para las cargas factorizadas
$\sigma_{nodo}$	Esfuerzo del nodo
$v$	Factor por el tipo de nodo
$v_2$	Factor por la calidad de la unión
$\sigma_{adm}$	Esfuerzo de fluencia del material base
$\sigma_{Sadm}$	Esfuerzo admisible de la unión
$R_R$	Característica de la resistencia
$\mu_R$	Resistencia media
$V_R$	Coefficiente de variación
$R$ y $K_R$	Constante

## 1.1 Antecedentes

Los sistemas estructurales de plataformas marinas se han utilizados en la actividad petrolera por décadas, siendo la industria del petróleo y el gas una de las industrias más reguladas en el mundo cuando se trata de seguridad.

La seguridad del sistema estructural generalmente es obtenida por el diseño de acuerdo a las normas y métodos establecidos, para una vida útil esperada. Si una estructura está destinada a ser utilizada mas allá de su vida de diseño, debería de ser ejecutado un control exhaustivo de la seguridad. En particular esto podría ser importante con respecto a la fatiga y otros mecanismos de daños. Sin embargo, normas y reglamentos han sido modificados desde el diseño original.

La seguridad es una realidad compleja, que abarca desde la problemática estrictamente técnica hasta diversos tipos de efectos humanos sociales, dando origen a la estructuración sistemática; por lo tanto, para tomar decisiones optimas en sistemas de seguridad de las estructuras costa fuera, es necesario el uso de la confiabilidad y del análisis de riesgo en beneficio de las medidas cuantitativas de seguridad estructural relacionado con la falla final. Sin embargo, las estructuras costa afuera pueden ser objetos de deterioro relacionado con el tiempo, tales como la corrosión, grietas de fatigas o daños mecánicos que pueden disminuir significativamente la seguridad estructural de las plataformas. Hasta ahora se han realizado pocos estudios de la confiabilidad teniendo en cuenta el daño estructural en los elementos.

Las plataformas marinas, se les denominan plataformas petrolíferas al conjunto de las instalaciones ubicadas en los mares u océanos para la extracción del petróleo o gas natural del subsuelo y, estas están expuestas a las condiciones de severas de cargas: de equipos estáticos y dinámicos, además de estas cargas que soporta el sistema estructural también está sometida a fuerzas de oleajes, vientos y huracanes; estas estructuras cuyos elementos estructurales, son en general, cilindros verticales, horizontales y diagonales, estos tubos metálicos son eficientes para absorber la energía cinética pero sufren deformaciones plásticas, de manera que los elementos estructurales se

encuentran expuestos a un sobreesfuerzos y que pueden afectar su seguridad estructural incidiéndose al colapso estructural de la plataforma marina en su totalidad ocasionando pérdida de vidas humanas, contaminación ambiental y consecuencias económicas.

Los constantes incidentes de colapso estructural dan origen a la preocupación sobre la seguridad de las plataformas marinas, tema que ha preocupado a los investigadores en este tipo de estructuras.

En el estudio de seguridad estructural se considera, que se pueden presentar en las conexiones mayores esfuerzos, del cual el colapso incremental por carga repetida son efectos de interacción entre arriostramiento o brace en la unión o junta para uniones múltiples, que de seguir el proceso de carga, van apareciendo puntos en donde se da inicio la sesión plástica, siendo esta una propiedad de la cual se le denomina energía interna del sistema estructural, esta deformación elastoplásticamente, se debe al movimiento de una gran numero de átomos en respuesta a la tensión aplicada, correspondiente al movimiento de dislocaciones, a este movimiento se le denomina deslizamiento.

Cuando los metales son deformados elastoplasticamente, una fracción de la energía de deformación (aproximadamente 5%) es retenida internamente; el resto es disipado en forma de calor. La mayor proporción de esta energía almacenada lo es en forma de energía de deformación asociada con dislocaciones. Como consecuencia, existen regiones en donde se produce la formación de compresión, de tensión y cizalladura sobre los átomos vecinos. Estas distorsiones, pueden ser consideradas como campo de deformaciones que irradian a partir de la línea de la dislocación. Estos campos de deformaciones y de fuerzas asociadas, son importantes en los mecanismos de refuerzos de los metales. Durante la deformación elastoplástica, el número dislocaciones aumenta drásticamente.

## **1.2 Investigación sobre seguridad estructural**

Una plataforma marina es una estructura metálica a flote y/o instalada sobre el fondo marino y fijado a este a través de pilotes o líneas de fijación. La función principal de esta estructura es permitir la instalación de los equipos requeridos para las operaciones de exploración y explotación de hidrocarburos. Los elementos principales que conforman la Plataforma son los siguientes; Pilotes, Castillo, Mesas y Componentes auxiliares.

Existen varias hipótesis, para predecir que el sistema de nodo estructural no es confiable debido a que se haya instalado a mar abierto en donde está expuesto a diferentes solicitaciones de los parámetros meteorológicos y oceanográficos asociados con la altura de ola de tormenta, parámetros

hidrodinámicos adicionales (velocidad de viento con lapso de premediación de una hora), parámetro sísmico y parámetro de las condiciones de operación que origina fatiga en el sistema de nodo mecánico estructural [1] .

Wang y Kieran [2], Ambos aplican las medidas de seguridad después de que la Piper Alpha el 6 de julio de 1988 fuera la causante de 167 muertes, con lo que se decidió que la regulación en medidas de seguridad en estructuras costa fuera sea transferido al Ministerio de Energía como el solo cuerpo regulador para la seguridad costa afuera. Moan y Song [3], realiza la investigación de los efectos de la carga de ola en las estructuras sobre su resistencia a la fatiga, de manera que se revisa el jacket mediante la teoría de la confiabilidad de acuerdo a la experiencia que se tiene con estructuras del mar de norte, de modo que la reevaluación significa el proceso de adaptabilidad para el uso de las instalaciones durante la operación y además proponiendo que la modificación mantenga la funcionabilidad y seguridad lo suficientemente bueno y humana y sobre todo ambiental.

A pesar, que estos parámetros han sido estudiados por diferentes investigadores [4-7], y establecido como recomendaciones en los manuales APIRP-2A WSD (American Petroleum Institute), 20<sup>a</sup> Edición, NRF-003-Pemex-2000 (Norma de referencia), Norsok Standard (Det Norske Veritas) y BSI (British Standards Institution) los factores de diseño recomendados no satisfacen la integridad y confiabilidad del sistema estructural para el parámetro de fatiga generado por la fuerza de viento, fuerza sísmica, fuerza de oleaje; estas se presenta con mayor intensidad en los nodos estructurales. Aparte de los factores de diseño que se han quedado obsoletos, también se presenta el fenómeno de la soldadura en los nodos. El factor que puede alterar la microestructura resultante en la zona de fusión es la velocidad de enfriamiento, la cual dependerá de las condiciones ambientales presentes y del espesor de la placa.

De modo que, Grupo de investigadores encabezado por Chandrasekaran, et. al., [8], de la Journal of Waterway, port, coastal, and Ocean engineering , estudiaron el trabajo realizado por chakrabarti quien modificó y también uso la función de Stokes de quinto orden para teoría de olas no lineales obteniendo extremos grados de libertad en comparación con la teoría de la función de Airy el cual fue menor, Adicionalmente S. Chandrasekaran toma estos grados de libertad, estudiando los coeficiente cinemáticos ( $C_d$  y  $C_m$ ) en aguas profundas en condiciones de tormentas de las piernas sometidas a tensión de la plataforma marina tipo trípode. Fred Moses y Bernhard Stahl [9], ambos estudiaron la calibración de las cargas y factores de resistencia de diseño (LFRD) misma que se anexo al API RP 2<sup>a</sup>-LRFD para el diseño de resistencia última de las plataformas marinas, en coordinación con la Internacional Organizacional de Estandarización (ISO); diseñándose por varias décadas un

gran número de plataformas costafuera de acuerdo al API RP 2<sup>a</sup> publicado por el Instituto Americano del Petróleo; estas dieron pautas al WSD (World Steel Dynamics) en considerar al esfuerzo en las especificaciones para diseño de pandeo en estructura de acero y, debido a la tasa alta de falla de las plataformas marinas en el Golfo de México, que en 1965 estas se colapsaban en el orden 1 a 200 por año, por tales razones se incluyeron los estados límites de cargas derivado de la AISC (American Institute of Steel Construction), especialmente se consideraron comportamientos de miembros tubulares y sus conexiones, límite de altura de ola, el efecto de las fuerzas de oleaje, corriente, juntas estructurales y características de la cimentación en suelos.

Por otro lado Guptaa, et. al., [10], se enfocaron al estudio del daño por fatiga en la parte del ensamble de la plataforma, tomando en consideración que estas plataformas son usadas para la explotación y extracción de hidrocarburos desde el lecho oceánico, las cuales son estructuras móviles. Se diseñan para funcionar en varias localizaciones y en las diferentes condiciones de operación y para grandes profundidades debajo del nivel de mar. En las últimas décadas, la industria costa fuera tiene demasiadas aventuras en el de introducirse a las profundidades del mar con las más severas condiciones ambientales. Consecuentemente, la creciente evaluación para la seguridad de las estructuras, que usualmente están construido en costos masivos, es ahí por lo tanto el considerable interés en la estimación del periodo de vida útil de la plataforma móvil y creando cédulas de mantenimiento eficiente, con el objetivo de incrementar su vida útil sin comprometerse en la seguridad de desarrollo eficiente de la cuantificación del envejecimiento de estas instalaciones estructurales. El envejecimiento estructural es un fenómeno caracterizado por la degradación del material estructural, el cual se tiene que reconocer a varios fenómenos, como la diferencia de temperatura, efectos de movimiento lento, daño por fatiga debido a los efectos dinámicos de las olas del mar y daños mecánicos debido a accidentes de impacto de barcos y otras embarcaciones marinas. Es un problema complicado estimar daños por fatiga en estructuras costa fuera, requiriendo de un análisis dinámico exacto de estas estructuras con cargas debajo de las olas del mar. Así, a menudo las teorías simples de olas son usadas donde la elevación del mar son supuesto estacionarios de los procesos Gaussian y el comportamiento estructural es supuestamente lineal.

Por otra parte Raizer [11], considera la determinación óptima de un método en intervalos entre juntas termales; el realizar el estudio de análisis probabilístico de forma aleatoria sobre la temperatura en el cual vienen las fluctuaciones de los estados de esfuerzos y ahí existe la probabilidad de daño para algunas columnas. Donde la longitud de los intervalos entre juntas termales incrementa la probabilidad de falla debido a la deformación por temperatura. Del mismo modo el grupo de investigadores liderado por Tello [12], del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP), se enfocan al estudio de la

confiabilidad de juntas tubulares de la cubierta de plataformas marinas, considerando los cuatro modos de fallas: plasticidad elasticidad, pandeo y fatiga; en el proceso de cada modo de falla, es analizado separadamente, desde las iteraciones mecánica entre los diferentes modos de falla. La mayoría de las estructuras de la cubierta de plataforma marinas en México están hechas de marcos de acero compuestos por elementos tubulares y estructurados en tres partes; subestructura o cubierta, superestructura o cubierta y cimentaciones. La profundidad en la cual estas plataformas son localizadas es entre 15 y 80 metros. La principal contribución de este grupo de investigadores es proporcionar procedimientos y modelos adecuado para el análisis de las juntas tubulares, de quien es el manejo local decisivo en la correcta estimación de su desempeño global y confiabilidad. Lo esencial es el correcto entendimiento del comportamientos estructural de las plataformas marinas, de este modo podrá ser reflejado en el mejor diseño y filosofía de la inspección, buscar la mas grade seguridad en orden a optimizar estos tipos de estructura.

De igual manera el grupo de investigadores liderados Cassidy [13], este considera que la mayoría de análisis estructural del jack-up de las plataformas usan modelos de unidades extraordinariamente determinísticas con parámetros especificados. Sin embargo, también reconocen las condiciones de cargas y los eventos de la acción de plataforma jack-up, en un rango de posibilidades para la evaluación de una respuesta segura que puede ser alcanzado probabilísticamente, acercándose a las tensiones probabilísticas de un análisis deterministico, pero con un número de cualidades previamente fijadas considerando distribuciones específicas. Es una constante demanda por el uso de jack-up en aguas profundas y en más duras condiciones. Su confianza en el uso ambiental requiere de una técnica de análisis reflejado exactamente a la ocurrencia de procesos físicos. Sin embargo, casi todo análisis determinístico no toma en cuenta las variables dentro de la estructura de cimentación y cargas de oleajes que son modelos asignados por distribuciones probabilísticas y su influencia sobre las respuestas estadísticas.

Melchers [14], hace hincapié sobre la evaluación de la teoría de confiabilidad de sistemas estructurales costa fuera existentes para seguridad de vida; considerando el tiempo de deterioro de reducción de los esfuerzos estructurales en la aplicación de las múltiples cargas. De modo, que se requieren buenos modelos de calidad para el proceso de corrosión e implicando en la mejor comprensión de los factores corrosivos que influyen en las estructuras marítimas de acero dulce. Generalmente estos son solo datos estadísticos de muy poca profundidad teórica, proporcionando alta incertidumbre estadística.

De igual manera, grupo de investigadores liderado por Cole [15], relacionan entre el esfuerzo y la fatiga confiable de una plataforma costa afuera en donde pone mucho énfasis en los programas de inspecciones estructural apropiados; considerando el envejecimiento de la estructura, la cual realizan un ejemplo de

un una plataforma tipo monopod (una sola pierna), para examinar su relación entre el esfuerzo y fatiga confiable de las plataformas instaladas en aguas superficiales sujetos a fuerzas típicas de oleajes, del norte-oeste de Australia, el cual consideran la probabilidad de falla por fatiga debido a la sobrecarga de la tormenta aumentando la posibilidad de direccionar en la inspección, hacia riesgos más altos ante la amenaza de daños por corrosión, de este modo optimizando el total de costo de una nueva estructura.

Hai-Houng y Soares [16], ambos prepusieron el método LRFD (Load and Resistance Factor Design) para diseño estructural de producción flotante (Plataforma Marina), de las unidades de almacenamiento y descargas FPSO (Floating Production, Storage and Offloading) tomaron en consideración que la FPSO ha sido empleado por todo el mundo como una solución económica para el aceite y gas costa fuera y su incremento desarrollo para aguas profundas. El criterio de diseño de estructuras FPSO para efectos de cargas y sus distribuciones protocolizadas, en que “el factor de la severidad ambiental” es introducido para las condiciones específicas de sitio de la carga hidrodinámica; y para estados límites de los tres tipos de modo de falla: Los modos de falla consisten en el momento completamente plástico, el momento inicial de fluencia y modos de momento de colapso; para el estudio de estos modos de falla realizaron ensayos de distribuciones probabilísticas a los efectos de las cargas estableciendo el índice de confiabilidad a los estados límites y, así mismo tomaron en consideración los efectos de las cargas de oleaje.

Del mismo modo grupo de investigadores liderados por Ronalds [17], se enfocan a la confiabilidad del cajón estructural de una plataforma tipo monopod debido a la falla por momento flexionante y el de pandeo local que se genero por un severo ciclón tropical, esta falla se presento debajo la zona espesada de picaduras debido a la corrosión, ellos se dan cuenta que el exponente de la altura de la ola varia con respecto a la profundidad del agua y de las fuerzas típicas ambientales; la naturaleza de esta carga no es dirigida en códigos de diseño profesionales y ni en el análisis tradicional de pushover (procedimiento diseñado para determinar la vulnerabilidad sísmica en edificios, Implica incrementar permanentemente el sismo de diseño hasta alcanzar un estado límite de la estructura, finalmente el diagrama de capacidad debe ser transformado a una curva bilineal equivalente que representa un comportamiento perfectamente elastoplástico). La investigación de la confiabilidad de un cajón bajo carga de tormenta es investigada en el estante norte-oeste de Australia con datos medio ambientales en la cual utilizan los momentos de flexión debido a la carga hidrodinámica combinando con el periodo de retorno de la altura de ola.

Di Paola y Failla [18], ambos presentan un estudio estadístico cubico para la predicción estocástica de plataformas costa fuera sujetas a obstáculos de carga no lineal de tipo Morrison, los datos estadísticos los obtienen de un sistema no

líneal, reemplazando la fuerza de Morrison por una función polinómica cubica de la velocidad líquida relativa de la estructura, tomaron en consideración la expansión de la serie de Volterra con representación finita de la serie de Fourier para la aproximación de respuesta de sistema equivalente; de este modo expresaron los coeficientes de Fourier de primero, segundo y tercer orden de respuesta estadística hasta el sexto orden para ser promediada de forma Gaussiana.

Liaw y Zheng [19], ambos estudian la aproximación polinomial no lineal debido a la superficie variable del agua, siendo este otro efecto importante de la carga de ola, estas aproximaciones son de cuarto grado las cuales son derivadas utilizando el método cuadrático, además consideran otro efecto no lineal, la segunda cinética de la ola y la fuerza de inercia, las cuales corresponden a la respuesta estructural debido a efectos no lineales del sistema estructural costera fuera fijas, estas consideraciones les son útiles para la representación de la serie de Volterra ante fuerzas no lineales de ola.

El grupo de investigadores liderado por Rodriguez, et. al., [20], analizan las nuevas clases diferentes de espectros bimodales escalares que se utilizan para estudiar los efectos de la proporción relativa de energía y la separación de frecuencia alta entre el bajo campos de distribución de ola frecuente, los resultados que se generan estas son comparadas con las predicciones de los modelos protocolizados adaptados a la práctica, estas modelaciones protocolizadas revelan que el modelo de Rayleigh sobreestima sistemáticamente el número de alturas de olas observadas más grande que la altura pequeña de ola, ellos se dieron cuenta que ninguno de los modelos predecían las probabilidades de excedencia que pueden caracterizar adecuadamente casos de estados de mar bimodal; siendo para ellos distribución probabilística de las alturas de ola, así estas cobran gran importancia en el campo de la ingeniería estructural costera fuera.

Tuty, et. al., [21], estos investigadores basan su investigación en el exponente crítico de la altura de ola para estructuras en aguas superficiales, debido a que en el Norte Occidental de Australia cercano a la costa se hayan numerosas estructuras mínimas localizadas en el agua relativamente superficial, requiriendo así la teoría no lineal de ola; estos utilizaron la teoría de la función de la corriente que es la más utilizadas para predecir la onda cinética en condiciones superficiales de agua. Para esto las teorías siguientes de onda son comparadas: la teoría regular de la Función de la Corriente, la teoría de onda de senoidal, la teoría de Stokes, la teoría de Nueva Ola, y una segunda teoría de nueva ola de corrección de orden dando como resultado la cinética, las cargas y el exponente  $\beta$  son los resultados para un cilindro en tres diferente de profundidades de agua.

Garbatov y Soares [22], ambos dan un enfoque Bayesiano, para actualizar algunos parámetros de las distribuciones de la probabilidad para el mantenimiento y confiabilidad en estructuras flotantes, combinando los métodos del análisis de la confiabilidad con la vida de la fatiga y modelos mecánicos de fractura, de este modo el diseño estructural basado en evaluaciones de confiabilidad de fatiga, estas son debidas a la iniciación y la propagación bajo la carga cíclica, a la corrosión, o a una combinación de éstos; de modo que las inspecciones no destructivas son requeridas en intervalos especificados para controlar la degradación; este resultado, puede ser utilizado para actualizar la planificación de la conservación y estimaciones de confiabilidad.

Ronalds, et. al., [23], estos se enfocaron al análisis resultante del pushover, de los valores críticos de sobrecarga de la tormenta y de la altura de las olas, las cuales son representados para una gran variedad de profundidades de agua; teniendo tendencia fuerte para la confiabilidad estructural, de disminuir en profundidades más superficiales de agua. El Jack-up es una extraordinaria unidad móvil cercana a la costa, con el que opera una plataforma fija. El cuál alberga el equipo, varias piernas verticales, y una base. Las piernas pueden ser movidas hacia arriba y hacia abajo. El primer Jack-up fue construido en 1954, y hay actualmente más de 300 unidades que operan mundialmente.

Lanning y Shen [24], ambos estudiaron las juntas soldadas, siendo esta zonas concierne en un análisis de fatiga, debido a la concentraciones probables de esfuerzos e imperfecciones de soldadura, y la variable microestructura creada durante el proceso de soldadura, toman en consideración que las ubicaciones de soldadura son los sitios vulnerables para la iniciación de la grieta por fatiga, y para la región del material sometido al calor debido al proceso de soldadura, modificando localmente las propiedades del material, la resistencia y la dureza; para su análisis se enfocan al estudio de una placa que contienen una grieta de superficie media elíptica que intersecta las regiones de las diferentes propiedades del material. Desarrollando un modelo más débil de las conexiones para expresar las distribuciones de fractura y de la dureza en términos de las longitudes efectivas de la grieta, justificando el factor de intensidad de esfuerzo, que este varía frente de la grieta, ayudando en el desarrollo de distribuciones de dureza de fractura para las grietas que se encuentran en zonas locales quebradizas (LBZ), con el calor las zonas afectadas (HAZ) de juntas soldadas, donde los valores de la dureza de fractura han sido medidos en el laboratorio cuando una porción significativa frente de la grieta se cruza LBZs.

Thandavamoorthy [25], desarrolla la investigación experimental y numérica en la junta tubular, que son puestas en tres anillos anulares para el estudio de sus esfuerzos bajo carga axial de compresión, aplicando el Método del Elemento Finito; de este modo predecir las deformaciones de las juntas que por contraste

el ovalamiento y abolladuras dan un énfasis de esfuerzo que toma en cuenta las características del endurecimiento del material. Chakrabarti [26], realiza estudio de una estructura flotante, del cual considera que las estructuras para perforación petrolera en ocasiones son semi sumergibles con conectores, este análisis se lleva a cabo en función del tiempo que asume el movimiento rígido del cuerpo de la estructura careciendo de linealidad en la excitación y impulso, teniendo en cuenta la inestabilidad en las oscilaciones de las torres así como las líneas flojas de amarre, este análisis se realiza con tres categorías de fuerzas las cuales son vientos, corriente y olas, siendo estas no colineales; las olas pueden ser de frecuencias solas o compuestas de frecuencias múltiples. Para olas regulares de teoría lineal o de quinto orden, puede ser utilizada. La ola irregular que puede ser incluida como un modelo espectral. Las estructuras flotantes son libres en responder a las fuerzas en seis grados de libertad y cuando se presenta en la torre es libre responder en dos grados de libertad y precisión.

Bhattacharyya y Selvam [27], ambos utilizan el método de las Múltiples Entradas Inversas de Sola Producción (R-MISO) el cual considera a un solo grado de sistema de libertad con rigidez lineales y cúbicas no lineales para la partición de la masa del sistema, en una frecuencia independiente y una frecuencia del componente dependiente; su impulso es el dependiente de la frecuencia pudiendo ser un modelo de un sistema flotante con un movimiento dominante asociado con la rigidez no lineal; por lo que la fuerza de la ola, la excitación al sistema, es conocido así como la carga es simulado con y sin el ruido que asume el espectro, rindiendo el dependiente de la frecuencia de impulso agregado de masa y radiación lineal, también los coeficientes no lineales de rigidez son satisfactorios. El método, ha sido adoptado para el problema de un flotador grande amarrado al cuerpo bajo la carga aleatoria de onda; basándose sobre una descripción espectral lineal.

Teigen y Naess [28], este evalúa la respuesta externa de la ola para estructuras costafuera flotantes en aguas profundas, sujetas a cargas estocásticas del viento y de olas concurrentes; asociando a estas cargas con corrientes del océano, así mismo toma en consideración las olas de cresta larga y de cresta corta, asumiendo que el viento es unidireccional bajo la consideración de la función de densidad de probabilidad (PDF) de la frecuencia combinada de olas, y de respuesta en baja frecuencia de la estructura debido a las olas, aplicándoles un análisis de eigenvalores y complicándolo con el PDF correspondiente a la carga de viento, obteniéndose de este modo la respuesta global del PDF. Las soluciones numéricas son presentadas para una gran variedad de parámetros duros, de tipo tiempo y ambientales siendo un problema mayor del diseño de estructuras costafuera en el de evaluar su respuesta máxima bajo estado del tiempo extremos.

Gudmestad et. al.,[29], este grupo de investigadores de IMP inicio estudios en octubre del 1995 debido a que el huracán Roxanne golpeó con facilidad la bahía de Campeche y PEMEX se apoyo en el Instituto Mexicano Petróleo (IMP) para realizar las actividades intensas de la recalificación estructural para demostrar que estas tienen la capacidad suficiente o su rehabilitación estructural puede ser requerida ya que este huracán provoco daños severos al equipo cuando las olas golpearon los pisos debajo de las plataformas, para estas recalificaciones se basaron en el criterio transitorio para el Diseño y Evaluación de Plataformas Marinas y con el API RP 2<sup>a</sup> y así mismo realizaron análisis de resistencia a la fatiga para saber su confiabilidad estructural. Bea [30], utiliza los conceptos de probabilidad para evaluar la confiabilidad de estructuras costa fuera durante la fase de diseño, realizando un análisis cualitativo para definir los factores de forma de desempeño que son utilizados para modificar el estándar o las tasas normales de la ocurrencia de errores de ingeniería de diseño, estos estudios de fracaso han sido utilizados para desarrollar una escala calibrada para relacionar los resultados de la evaluación cualitativa con información de entrada utilizada en un análisis protocolización cuantitativa del riesgo; el primer procesos identificado como SMAS (sistema de Seguridad, administración y evaluación). Moan y Song [3], ambos consideran que un mayor número de fallas en estructuras de acero del jacket de las estructuras costafuera son las de fatiga en las juntas tubulares, por lo que la inspección se efectúa durante su periodo de vida útil y de servicio para valorar la condición verdadera de las propiedades diferentes de juntas en la cual se llegan a localizar fisuras debido a la fatiga.

Bea, et. al., [31], estudian las alturas extremas de la cresta de la ola de la tormenta de condición para muchas plataformas mayores señalan que habría "agua verde" en las cubiertas inferiores. Las pautas del API para determinar fuerzas de ola actuando en las cubiertas de estas plataformas señalan que la mayoría de plataformas no pueden sobrevivir a tales cargas. Las cubiertas o deben ser removidas o las cubiertas levantadas para despejar la ola especificada bordean la cúspide de. Una variedad de pruebas del laboratorio ha sido realizada para ocuparse de este problema. Varios avances han sido desarrollados para computar las cargas de la cresta de la ola y las respuestas de las plataformas para las cargas. Allí han sido muchas instancias en las cuales las plataformas han experimentado cargas significativas de la ola en sus cubiertas inferiores durante huracanes. Algunas de estas plataformas han sobrevivido y alguna ha errado. Este escrito resume resultados de un estudio de resultados de prueba del laboratorio y el desempeño de plataformas en el golfo de México haya sobrevivido y fracasado durante las cargas huracanadas de la ola en sus cubiertas. Las modificaciones para las líneas directivas de fuerza de la ola de la cubierta en el API son discutidas y validadas con datos de prueba del laboratorio y desempeño del campo de la plataforma durante huracanes.

Moan, [32], da a conocer el algoritmo de flujo incompresible de Navier-stokes que es acoplado a un cuerpo elástico de la respuesta estructural para numéricamente investigar la hidrodinámica de varios usos relevantes en el exterior. Incompresible fluidos encuentran en una variedad de problemas de la ingeniería, incluyendo la ciencia en el exterior marítimo, la aerodinámica, y una amplia clase de usos civiles e industriales de la ingeniería. De interés particular, es como fluidos incompresible actúan recíprocamente con las estructuras ellos rodean y las fuerzas hidrodinámicas que son impuestas a estas estructuras.

### **1.3 Industria del petróleo en el contexto internacional y nacional**

#### **1.3.1 Contexto internacional**

Lo más destacable del mercado internacional de energéticos que se desarrolló a través del decenio de los setenta, fue que se logró aumentar los precios, así como el impacto y la repercusión política económica que éste tuvo [33]. La dependencia del petróleo importado por las economías de los países industrializados fue funcional para la dominación imperialista sobre América Latina y el Medio Oriente; que en la década del siglo XX se marca el comienzo con el auge del transporte basado en el automóvil y de los ferrocarriles. Esto permitió fabulosa acumulación de capital por la industria petrolera y la del automóvil, ya que millones de trabajadores se vieron obligados a gastar una parte sustancial de sus ingresos en la compra, operación y mantenimiento de sus automóviles. En tanto que inicialmente el auge del automóvil permitió una mayor movilidad para los automovilistas, en la medida en que se generalizó su uso causó un empeoramiento de la calidad de vida, por la contaminación ambiental. La contaminación causa también la pérdida de millones de horas de trabajo, así como perturbación de las tareas educativas por ausentismo causado por enfermedades pulmonares. En 1960 Venezuela, Irak, Irán, Arabia Saudita y Kuwait formaron la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Hacia 1971 habían ingresado cinco países más. En 1973 impuso un aumento de los precios. Actualmente se han unido otros países a esa organización, la cual cuenta con dos terceras partes de las reservas y genera el 35% de la producción a nivel internacional. Las trasnacionales petroleras no fueron perjudicadas por el aumento de los precios, pero sí lo fueron millones de consumidores de Estados Unidos, Canadá, Europa Occidental, Japón y otros países, que vieron aumentar las tarifas eléctricas y fueron obligados a gastar más en la operación de sus automóviles, mientras que las autocracias del Golfo Pérsico acumulaban fabulosas ganancias, en parte derrochadas en obras suntuarias de infraestructura y compra de armamentos, mientras que algunas decenas de miles de privilegiados las usaron para comprar bienes raíces en Gran Bretaña. El parasitismo incluyó la búsqueda de armas nucleares por Irak y las guerras, como la sangrienta guerra entre Irak e Irán (1980-1988), la

invasión de Kuwait por Irak en 1990-1991, y la construcción de centrales nucleares por Irán.

La perforación en aguas profundas implica un gran aumento de los costos de perforación, de algunos millones de dólares para aguas someras a cien o ciento cincuenta millones, lo que implica que los pozos que tienen un potencial de producción pequeño o mediano, suficiente para ser explotado en tierra o aguas someras, ya no lo serían en profundas. La perforación y explotación de pozos en aguas profundas plantean además nuevos problemas a nivel mundial siendo este en ambientes geológicamente complejos de difícil acceso, como la vulnerabilidad de las plataformas frente a los huracanes para las ubicadas en el Golfo de México, y la posible dificultad para controlar pozos en los que pudieran ocurrir situaciones de descontrol, por ejemplo a dos kilómetros bajo la superficie del mar [34,35]. La industria petrolera es altamente compleja, y al observarla desde diferentes perspectivas se hace cada vez más complicada: los recursos remanentes son más difíciles de detectar, y una vez que se descubren, son más difíciles y costosos de producir (como en aguas profundas) [36].

### 1.3.1.1 Producción de crudo y gas

A continuación se presenta en la Figura 1.1, el pico de producción de petróleo crudo que han alcanzado los diferentes países y en la Figura 1.2, la producción de gas.

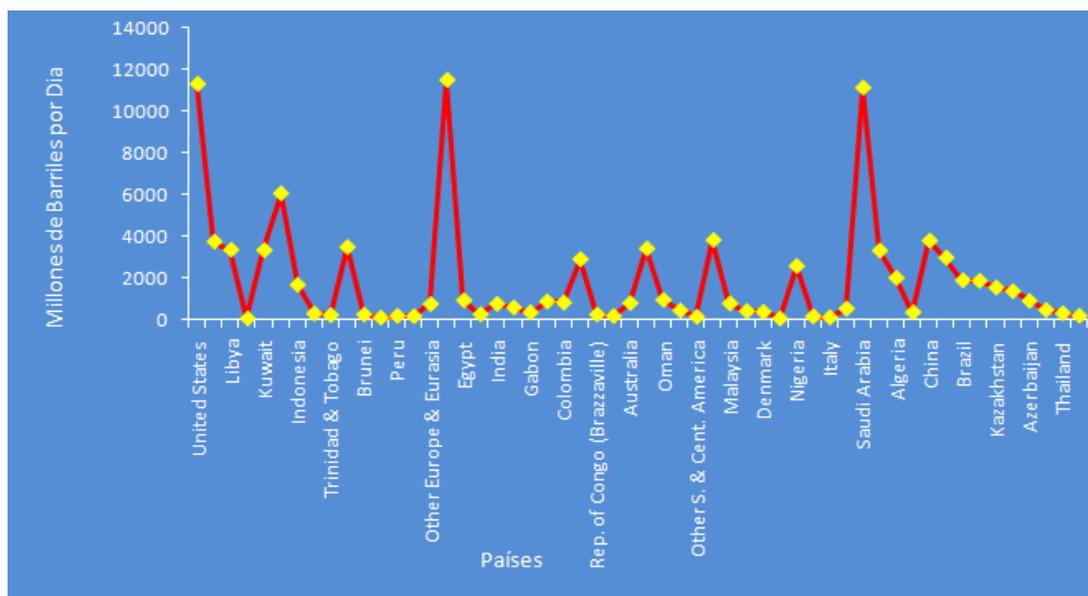


Figura 1.1. Pico de Producción. Elaboración propia. Fuente estadística [37]

Cabe destacar que en la Figura 1.3 se presenta la pronosticación de la demanda mundial de gas para el 2015.

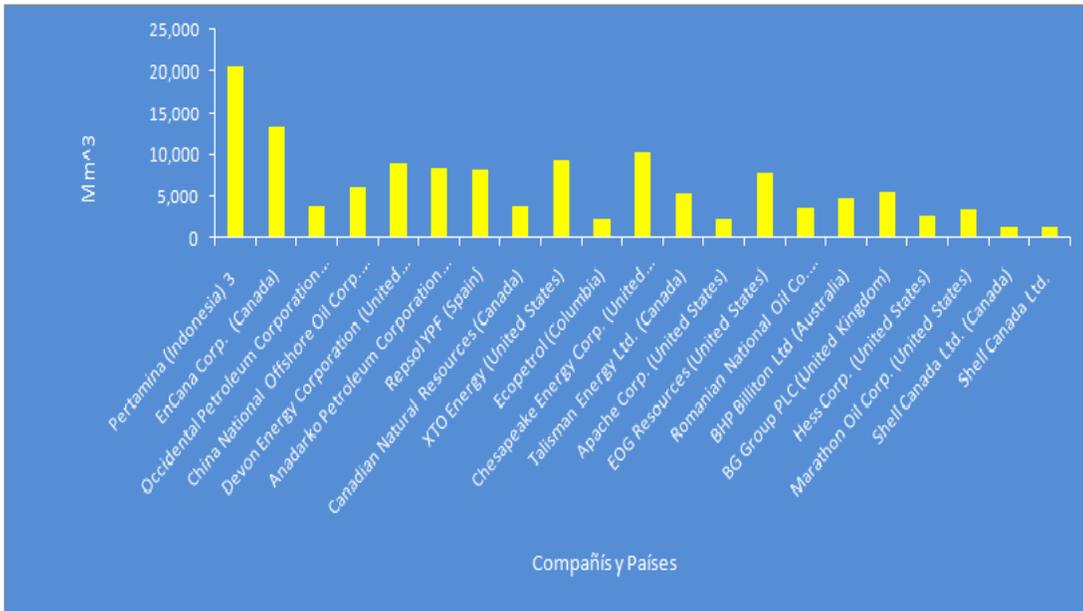


Figura 1.2. Producción de Gas. Elaboración propia. Fuente estadística [37]

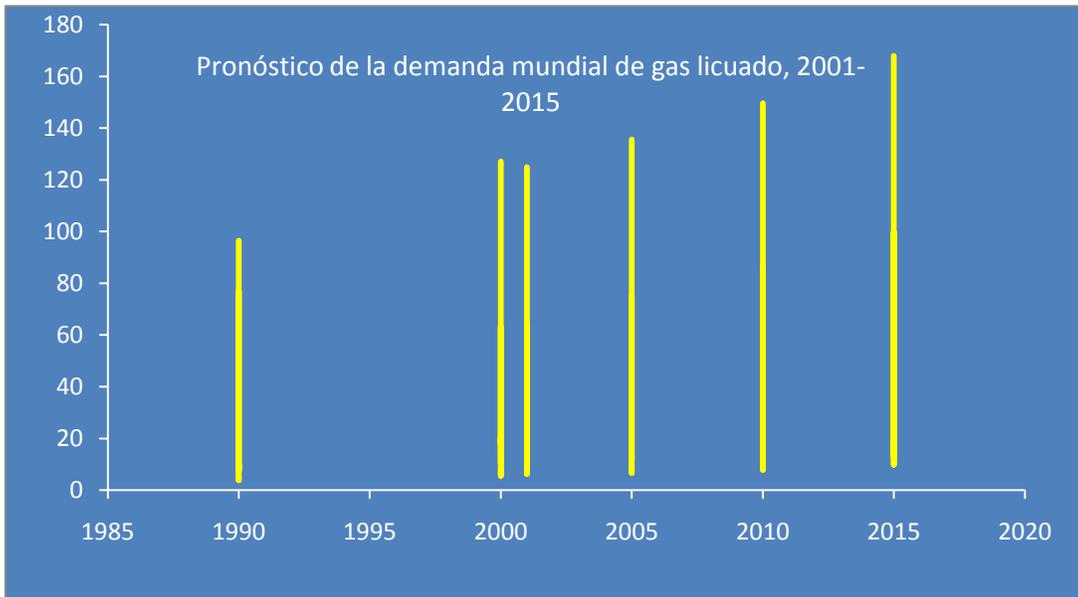


Figura 1.3. Demanda mundial de Gas. Fuente estadística [38]

### 1.3.1.2 Accidentes y Fallas estructurales

La plataforma “Piper Alpha era una enorme plataforma petrolera, ubicada en el Mar del Norte, a unos 180 km de la Costa de Aberdeen. Era operada por la compañía “Occidental Petroleum”, ahí trabajaban 232 personas”. Esta planta contaba con dos partes principales para el desarrollo de la explotación

de petróleo: primero la torre de perforación donde salía el Petróleo Crudo, Propano y Gas Condensado. La segunda parte es una planta procesadora central, donde se separaba el producto en sus partes constitutivas y se las conducían a la Costa Norte mediante Tuberías. El día de las 22 hs. el 6 de julio de 1988 hubo una explosión seguida por un incendio y 3 horas más tarde parte de la explanada sur donde estaba la torre de extracción/perforación de 12.000 toneladas de acero, quedó a 140 m de profundidad al fondo del mar. Es prácticamente seguro que fue una fuga de gas lo que causó el desastre. Ciento sesenta y seis hombres perdieron la vida más uno al día siguiente, solo setenta y tres pudieron ser rescatados, la mayoría con quemaduras y fracturas. El pavoroso incendio que envolvió a la gran estructura, podía verse desde muchos kilómetros de distancia, cuyas conclusiones fueron [39]:

- Deficiencia en la capacitación y entrenamiento de los Gerentes, tanto de planta como Contratistas.
- Deficiencias en sistemas de permisos de trabajos.
- Deficiencia en entrenamiento de emergencias y evacuación para con los trabajadores.
- Diseño de las instalaciones contra incendio y/o explosiones deficientes.
- Falla en la toma de decisiones y responsabilidad de la Gerencia.

La plataforma petrolera, considerada la más grande del mundo, se hundió a 125 kilómetros de la costa a causa de explosiones en que perdieron la vida 175 personas que solo uno de estos su cadáver fue recuperado y el resto hundiéndose con la plataforma, ha esta estructura se le denominaba P36, yéndose a pique a 1.360 metros de profundidad, sin la posibilidad de rescate alguno”, debiéndose a su inclinación de 31 grados con relación al eje vertical, considerado por los peritos como el límite para mantener la estructura a flote. La explosión había derrumbado un pilar de soporte, por lo que la plataforma comenzó a inclinarse y hundirse frente a Macae, a unos 190 kilómetros al nordeste de Río, pues la P36 almacena unos 1,5 millones de litros de combustible en sus tuberías y depósitos. Con la probabilidad de que dicha plataforma caiga sobre algunos de los pozos. Una de las principales hipótesis es que las explosiones ocurrieron por una fuga de gas en una de las columnas que sustentaban la plataforma [40].

El hundimiento de la Plataforma marina Aban Pearl, se debió a que comenzó a hacer agua en uno de sus flotadores inclinándose a 45 grados, cabe destacar que esta plataforma marina era plataforma semisumergible, el cual origino el cierre de operaciones y evacuación de 95 personas. No habiendo riesgo de derrame debido a que afortunadamente aún no se había logrado hacer la perforación [41].

La plataforma marina Deepwater Horizon, colapsada en el Golfo de México da a conocer que los sistemas de seguridad en plataformas de extracción no son infalibles. Esto aún cuando en los pozos modernos los sistemas de seguridad funcionan automáticamente. El diagnóstico de que "la causa del colapso de la explosión y el derrame masivo de petróleo se debió a fallas técnicas y no humanas", del por qué no funcionó el sistema de válvulas de prevención de explosiones [42].

### 1.3.2 Contexto Nacional

La industria petrolera mexicana es una de las empresas petroleras con mayores reservas, se observa que dicha industria es productiva, que genera recursos, pero destina un porcentaje muy pequeño a la investigación, generando un desarrollo tecnológico casi imperceptible para el crecimiento industrial de México. Hoy enfrenta importantes desafíos que impulsan la búsqueda de nuevas y mejoras tecnologías. Las condiciones de nuestros yacimientos ha venido cambiando con respecto a lo que se tenía hace 35 años, se puede agregar la alta complejidad e incertidumbre asociada a la ejecución de nuevos proyectos, destacando la necesidad de compensar la declinación de Cantarell; planteando así la necesidad de explorar los recursos que se encuentran en aguas profundas del Golfo de México, así como restricciones ambientales severas; los crudos altamente pesados y con mas contenidos en azufre, metales, sal y agua, finalmente la necesidad de operar eficientemente y tener la capacidad suficiente de ejecución [43].

La multiplicación de los conflictos socio-ambientales relacionados con las actividades petroleras, ha dado lugar a una amplia literatura (sobre la explotación más o menos racional de los recursos naturales, las políticas públicas petrolera, ambiental e indigenista, el papel de las empresas multinacionales en el país, etc.). Ello muestra la importancia del tema socio-ambiental y el desarrollo sostenible en la vida política y social de México. Se debe de considerar que el procesamiento del petróleo son actividades económicas. Toda actividad económica implica un determinado impacto sobre el medio ambiente, se generan riesgos tanto para el ser humano como para el entorno, se arrijan desechos, se compite con otros organismo por espacios físicos y por algunos servicios ambientales [44]; la intensa actividad que desarrolla Pemex implica la posibilidad de impactos de contaminación por petróleo y sus derivados en el medio ambiente marino, asociados a los procesos de exploración y producción en altamar, transporte marítimo y submarino, operaciones de embarques y almacenamiento, accidentes en operación con rupturas de los oleoductos submarinos, accidente de buques-tanque, derrame y explosiones de plataformas, a sí mismo hay otra fuente de hidrocarburo de petróleo e hidrocarburo aromáticos poli cíclicos que inciden en el área a partir de la

descargas industriales y municipales que alcanzan el área por vía de escurrimiento de ríos y descargas costeras, producción biológica in situ, emanaciones crónicas y discretas (“chapapoterías”, como se denomina en México) proveniente de afloramientos naturales marinos y la intensa actividad de botes pesqueros y comerciales [45].

Aunado a esto el desabasto de profesionistas altamente especializados, encaminándonos al riesgo de extinción profesional en materia de industria petrolera y esto se ha generado debido a la falta de interés por parte de los jóvenes y la complejidad de colocarse en un puesto laboral [46].

Se observa que la industria del petróleo y gas en México no es sustentable ya que el reemplazo de la producción con nuevos descubrimientos ha sido menor al 15% de las reservas a niveles críticos. La perspectiva del país en términos de seguridad energética y crecimiento económico está en riesgo, debido a los esfuerzos en exploración realizados por Petróleos Mexicanos (PEMEX) han proporcionados resultados poco satisfactorios.

De modo que se estima que los yacimientos en aguas profundas del Golfo de México tienen el potencial para cubrir el estado crítico a largo plazo; sin embargo, al pretender explotar este potencial sin los conocimientos, experiencias y capacidades técnicas que puede aportar la industria petrolera internacional resultaría en una acción grave, larga y altamente riesgosa con consecuencia financiera y ambiental. Cabe señalarse que se trata más de aportaciones metodológicas que tecnológicas.

Por el otro lado la capacidad de refinación en México no ha crecido en sintonía con la economía y la población. Las refinerías son incapaces de abastecer los productos refinados que requiere el mercado nacional, en términos de volumen o calidad, razón por la cual existe una significativa y cada vez mayor importación de hidrocarburos; se considera que con una reestructuración de la industria, lo que hoy son importaciones podrían ser en el futuro productos elaborados en México, con un impacto positivo en la economía nacional y regional [47].

### **1.3.2.1 Producción de crudo y gas**

La historia contemporánea de la producción petrolera de México puede periodizarse en cuatro etapas bien definidas. En la primera se registró una expansión acelerada que se inicia en 1973 y concluyó en 1982. En estos 10 años se sextuplicó el volumen anual extraído gracias al descubrimiento y desarrollo de campos gigantes y súper-gigantes en las cuencas del sureste, primero en los campos del mesozoico de Tabasco y Chiapas y después, a fines de los años setentas, en la Sonda de Campeche, región que eventualmente convirtió al país

en el principal productor costa afuera del mundo. La segunda etapa, de 1983 a 1995, es una de estabilización. Sorprende en ella la estrecha fluctuación anual de la producción respecto a la media del periodo de 2.6 millones de barriles diarios (mmbd). En 1996, comienza una tercera etapa de expansión secundaria asociada a un nuevo desarrollo del campo Cantarell, cuya producción de crudo pesado se elevó de un poco menos de 1.0 mmbd en 1995 a 2.1 mmbd en 2004. Este aumento extraordinario compensó con creces la baja en la extracción de crudos ligeros iniciada en 1997. Todo parece indicar que en la cuarta etapa se observará una declinación gradual de la producción. Es probable que en 2004 se haya alcanzado el pico de la producción total de petróleo y que esta se mantendrá más o menos constante por un periodo de 3 o 4 años, al cabo del cual se iniciará propiamente el proceso de declinación. A corto y mediano plazos, el volumen de la producción de petróleo dependerá, de manera fundamental, de la velocidad con la que disminuya la extracción en Cantarell, así como del ritmo al que se expandirá, y el nivel que alcanzará, la producción del complejo Ku-Maloob-Zaap (KMZ). La contribución de campos profundos que se localizan en aguas someras del Litoral de Tabasco sólo incidirá de manera marginal. En la Figura 1.4 se dan a conocer la producción de crudo y gas [48].

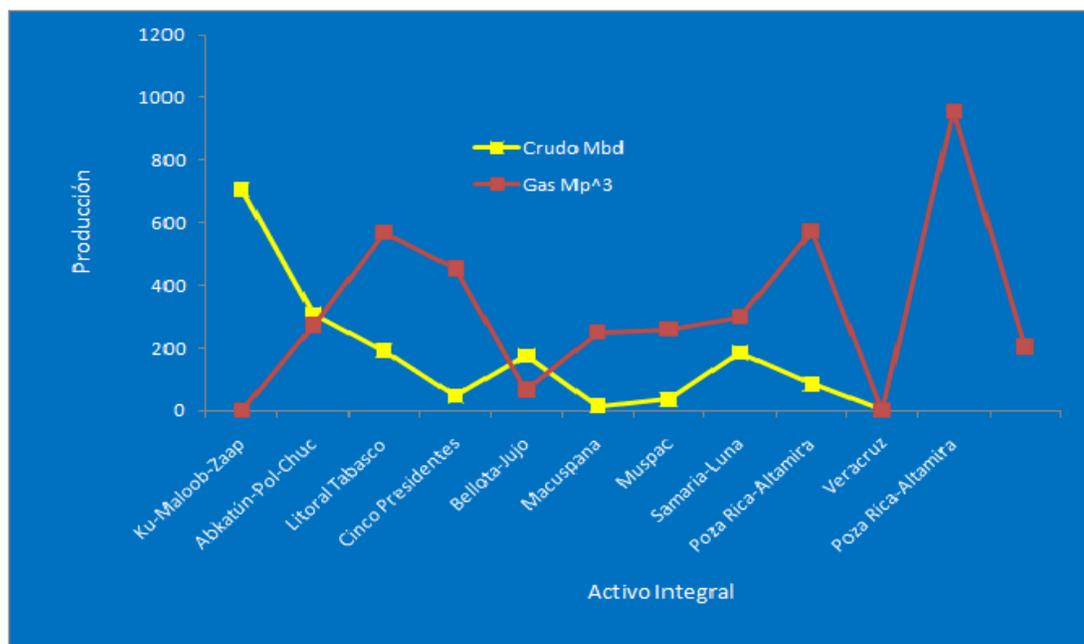


Figura 1.4. Producción por Activos. Elaboración propia. Fuente estadística [48]

### 1.3.2.2 Accidentes y Fallas estructurales

Como consecuencia del frente frío número cuatro que afectaba al Golfo de México, donde se registraba mala condiciones climatológicas, con rachas de

viento de hasta 130 kilómetros por hora y olas de 6 a 8 metros, provocando movimientos oscilatorios en la plataforma Usumacinta que ocasionaron que el cantiliver de la plataforma golpeará la parte superior del árbol de válvulas del pozo Kab-101 al chocar la plataforma junta a la plataforma fija, lo que causó una fuga e incendio petrolero y gas. Fallando todos los intentos por controlar el fuego, destacándose que la plataforma Usumacinta es de tipo flotante [49]. En la Figura 1.5, se muestran ambas plataformas [50]



*Figura 1.5.* Plataformas [50]

#### 1.4 Justificación de la tesis

La perspectiva del país en términos de seguridad energética y crecimiento económico se pone en riesgo, debido a los esfuerzos en exploración y explotación realizados por PEMEX han proporcionado algunas veces poco satisfactorios. Una de sus consecuencias radica precisamente en el colapso estructural de plataformas marinas. En general, el colapso de un sistema estructural como es el caso de una plataforma marina se puede entender como la ocurrencia de algún tipo de falla que conduce a la pérdida parcial o total de la instalación (incluyendo equipos, entre otros).

En general, el colapso de un sistema estructural como es el caso de una plataforma marina puede entenderse como la ocurrencia de algún tipo de falla que conduce a la pérdida parcial o total de la instalación (incluyendo equipos, entre otros). Durante los últimos años, se han publicado una gran cantidad de trabajos de investigación sobre la concentración de tensiones en las uniones tubulares de estructuras. Además, se puede argumentar que desde la

concepción y construcción de las primeras plataformas marinas se ha intensificado la investigación sobre estructuras tubulares [51-55].

La mayor parte de estos han sido motivados, por la necesidad de garantizar un diseño confiable de las estructuras tubulares. Por otro lado, el envejecimiento de estas estructuras nos hace tener la necesidad de optar por nuevos métodos de evaluación de la integridad de las estructuras existentes [19]. En un sistema estructural tubular, la región de la conexión se define como nodo ó juntas; los nodos se pueden clasificar como circulares o rectangulares, en formas de tipo K, T, X, K-T, y K-K e Y [56-60].

Las estructuras tubulares cilíndricas huecas de las plataformas marinas están sometidas a subsidencias de aumento de cargas externas (fuerza de ola, vibración mecánica de equipos, fuerza sísmica, corrientes marinas altas en tiempo de tormenta). Lo anterior hace que dichas estructuras se expongan a las cargas, a veces, más allá de su diseño estructural; esto es particularmente crítico si la redistribución de esfuerzos ocurre en pandeo y deformación plástica [61], de la cual se tiende a producir fluencia, haciendo que su valor efectivo de rigidez y a la flexión descienda paulatinamente, en el que se forman un número de nodos plenamente plástico suficientes para transformar los elementos estructurales tubulares en un mecanismo de inestabilidad global [57, 62]. El comportamiento de la curva esfuerzo deformación y del endurecimiento que experimenta el acero, es de suma importancia en diferentes aspectos del estudio elástico-plástico, debido a la zona plástica de la curva que depende de los parámetros que predicen los mecanismos de deformación del material [63-65]. Así mismo, en cualquier lugar donde halla concentración de esfuerzos, resultarán deformaciones plásticas locales como una relajación de los esfuerzos, es por ello que la concentración de esfuerzos debe descubrirse y reducirse todo lo posible; la concentración de esfuerzos puede dar un punto de partida para una grieta, con resultados catastróficos, además que la conexión tubular de estructuras costa fuera están sujetos a fatiga [63, 66, 4].

Este proyecto de tesis surge de una necesidad de llevar a cabo una investigación aplicada a un caso particular de una plataforma marina fija ubicada en la Sonda de Campeche.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo general**

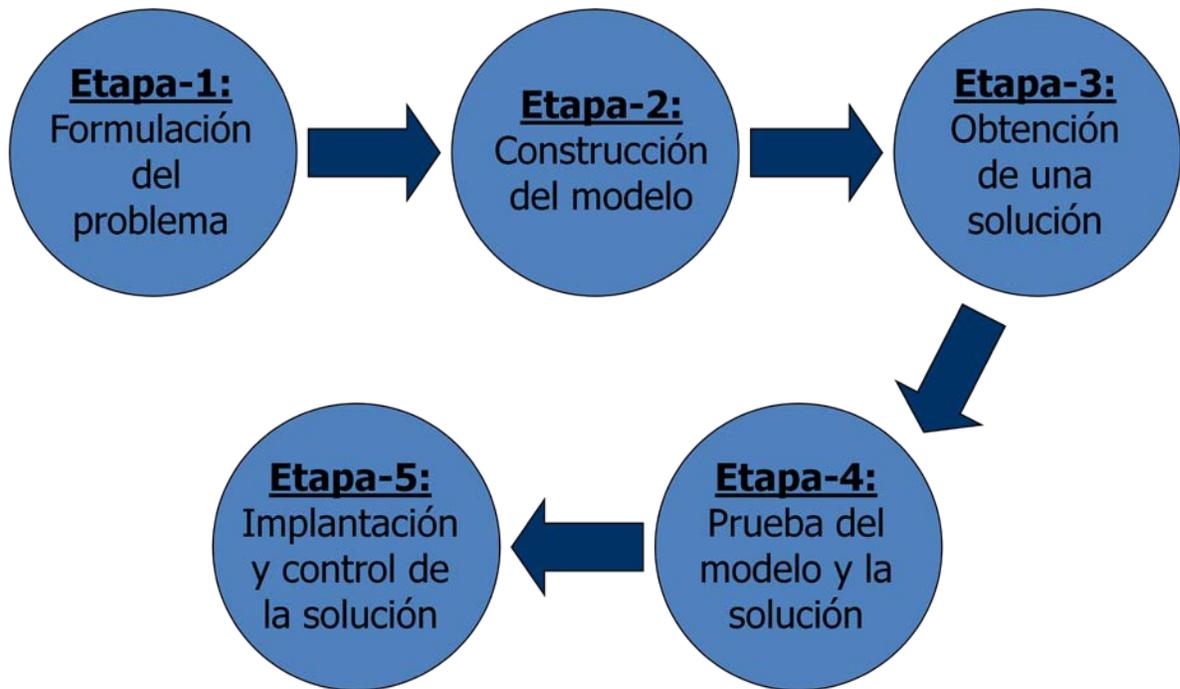
Llevar a cabo un análisis de los esfuerzos a los componentes estructurales de una plataforma marina fija, así como la evaluación de las tecnologías existentes de monitoreo de la integridad estructural de dichas instalaciones.

### 1.5.1 Objetivos específicos

- Llevar a cabo una revisión crítica de la literatura relacionada con las investigaciones que se han llevado a cabo en sistemas estructurales.
- Llevar a cabo una revisión exhaustiva y crítica de la literatura relacionada con las tecnologías existentes de monitoreo de la integridad estructural de plataformas marinas fijas.
- Llevar a cabo una recopilación de datos en campo de la plataforma marina “X” bajo estudio.
- Análisis de los esfuerzos a la que se encuentra sometido el sistema estructural de la plataforma marina mediante el enfoque clásico de la teoría de estructuras.
- Evaluar los esfuerzos a la que se encuentra sometida la plataforma marina mediante un enfoque de sistemas complejos.
- Evaluar la seguridad estructural de la plataforma marina
- Evaluar las tecnologías existentes de monitoreo de la integridad estructural de plataformas marinas fijas.
- Documentar los resultados de la investigación.

### 1.6 Metodología de la investigación

El análisis estructural sistemático, puede sintetizarse en dos órdenes de objetivos; en el orden metodológico, se muestran los procedimientos y la necesidad del diseño y la comprobación estructural. En el orden de los contenidos (teorías, técnicas y aplicaciones). El diagrama de flujo de análisis estructural sistemático que se presenta, permite una reordenación de la estructura de conceptos en los que se basa el modelo sistemático de Churchman & Ackoff, ver Figura 1.6. Con él se trata de explicitar la secuencia de conceptos entrelazados que lo constituyen.



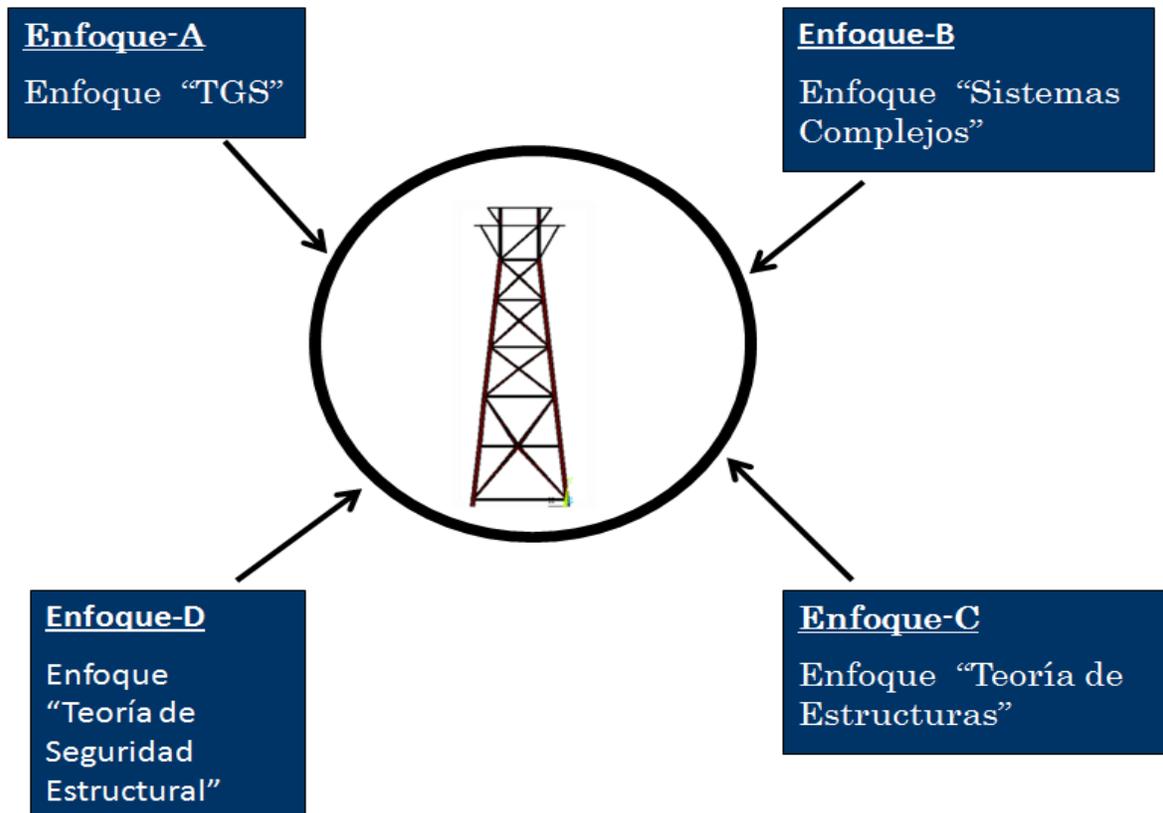
*Figura 1.6. Análisis Estructural Sistemático, Churchman y Ackoff*

En base a los métodos de la teoría estructural, y como así también del enfoque de sistemas complejos y los métodos de seguridad y riesgo estructural, se desarrollará en cuatro enfoques, ver Figura 1.7.

El método de teoría estructural nos permitirá evaluar las incidencias de las cargas gravitacionales, cargas ambientales, cargas accidentales y cargas por deformaciones de la estructura, que afectan a la estructuras de plataformas marinas permitiéndonos conocer los esfuerzos térmicos debido a la fatiga en la unión soldada mediante el software ANSYS.

De acuerdo al método de sistemas complejos se conocerá la superficie de naturaleza rugosa de los esfuerzos plásticos térmicos, adquiriendo la forma geométrica fractal, definido por la auto-similitud, de la insuficiencia de soportar grandes esfuerzos y el cambio del rango crítico en decaimiento de sus esfuerzos, sobrepasando el coeficiente de seguridad.

Del enfoque de seguridad estructural, se obtendrá el riesgo estructural en que se encuentra la plataforma marina al sobrepasar el índice de seguridad estructural.



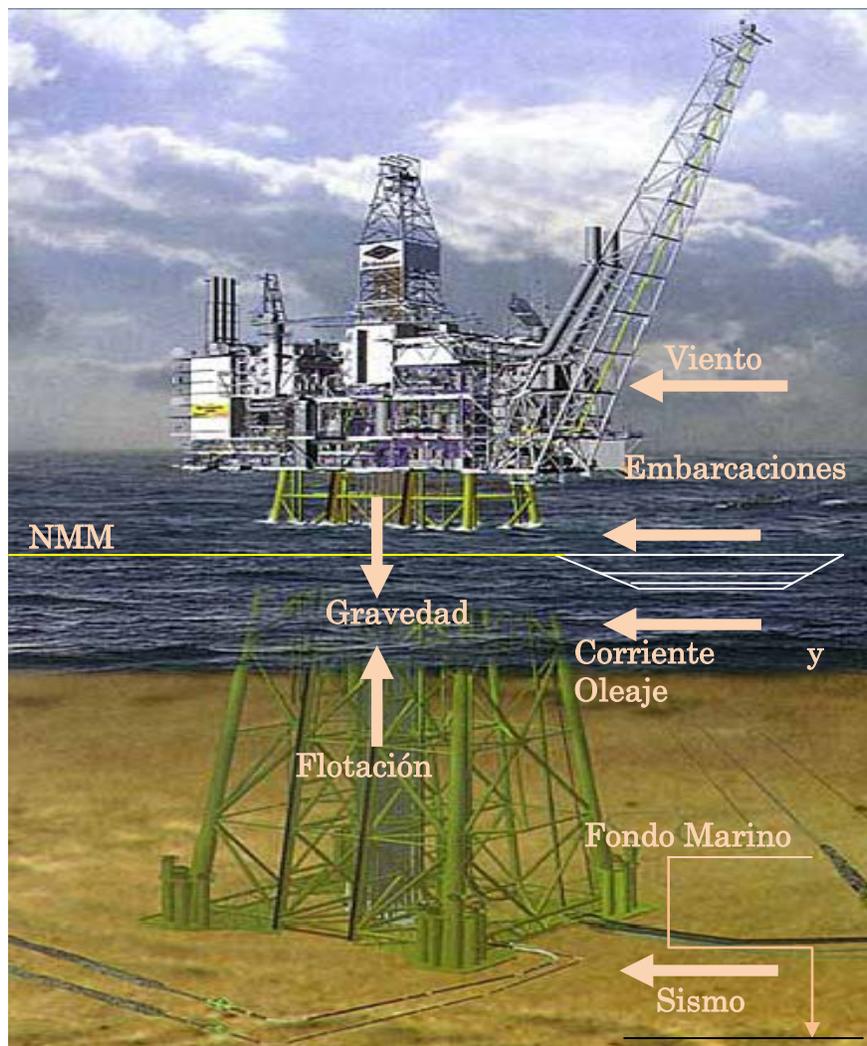
*Figura 1.7. Enfoques teóricos*

## 1.7 Delimitación de la investigación

Las limitaciones del presente proyecto de investigación fueron las siguientes:

- Esta tesis evalúa la seguridad de los esfuerzos críticos en los nodos estructurales de plataformas marinas que se encuentran expuestos a diferentes tipos de solicitaciones, ver Figura 1.8, como son las condiciones de cargas gravitacionales (o cargas verticales), cargas ambientales (o cargas laterales), cargas accidentales y cargas por deformaciones de la estructura.
- Otro mayor riesgo, tales como cargas de terremotos no son evaluadas y así como cargas por impacto de embarcaciones y daños mecánicos por picaduras de corrosión y abolladuras de elementos estructurales. Sin embargo, la investigación no se considero las cargas.
  - ✓ Cargas por terremotos
  - ✓ Cargas por impacto de embarcaciones no son estudiadas definitivamente en esta tesis.

- ✓ Picadura por corrosión definitivamente podría ser un riesgo en caso de que la protección anticorrosiva y catódica no sea suficiente para el incremento de vida útil.
- ✓ Abolladuras, que son desconfiguraciones geométricas que se presentan en los elementos del sistema estructural son un riesgo total debido a la incapacidad de absorber los esfuerzos.
- Desde el diseño, la corrosión no es tomada en cuenta para la vida útil de los elementos estructurales que integran a las plataformas marinas. Por lo tanto, los efectos de la corrosión en estructuras de plataformas marinas de más de su periodo de vida útil de 50 años podría ser necesaria una investigación específica.



*Figura 1.8.* Tipo de solicitaciones en plataformas.

## 1.8 Productos de la investigación

Los productos de investigación derivados de este proyecto se listan a continuación:

- ☞ **Félix Hernández, J. L.**, Santos Reyes, J. R. (2010). Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas, *Ingeniería estructural*, vol. 43, 44-53.
- ☞ **José L. Félix Hdez** y Jaime Santos. (2010). Deformación Elástica, Plástica y Térmica (EPT) de una Plataforma Marina. *Memorias del XVII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural-organizado por la Sociedad mexicana de Ingeniería Estructural*, A.C. 7 y 8 de noviembre de 2010, León, Guanajuato. México.
- ☞ **José L. Félix Hdez** y Jaime Santos R. (2009). Plastic and elastic deformation analysis of structural joints of offshore platforms. In *Proc. of the XVIII International Materials Research Congress (IMRC, 2009)*, 16-20 August, 2009, Cancún, México.
- ☞ **José L. Félix Hdez** y Jaime Santos Reyes. (2009). Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas. *Memorias del 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería mecánica (CIBIM9)*, 17-20, Noviembre 2009, Las palmas de Gran Canaria, Islas Canarias, España.
- ☞ **José L. Félix Hdez** y Jaime Santos Reyes. (2008). Colapso de elemento estructural tubular de la Plataforma marina KU-Maloob-Zaap. *Memorias del XVI Congreso Nacional de Ingeniería Estructural-organizado por la Sociedad mexicana de Ingeniería Estructural*, A.C. 7 y 8 de noviembre de 2008, Ver. México.

## 1.9 Presentación de la tesis

La tesis comprende de seis capítulos que se describen muy brevemente a continuación.

El capítulo I, presenta los antecedentes del proyecto de investigación; además, aborda las delimitaciones del mismo así como la justificación del proyecto de tesis.

El capítulo II, presenta una descripción del estado del arte de la seguridad estructural de plataformas marinas.

El capítulo III, presenta la metodología de investigación del presente proyecto de tesis.

El capítulo IV, presenta los diferentes tipos de inspección estructural.

El capítulo V, describe el caso de estudio así como los principales resultados del análisis.

El capítulo VI, presenta una discusión de los principales resultados del proyecto. Además, presenta las conclusiones y futuro trabajo.

Finalmente, este reporte de tesis contiene cuatros anexos, los cuales se enlistan a continuación:

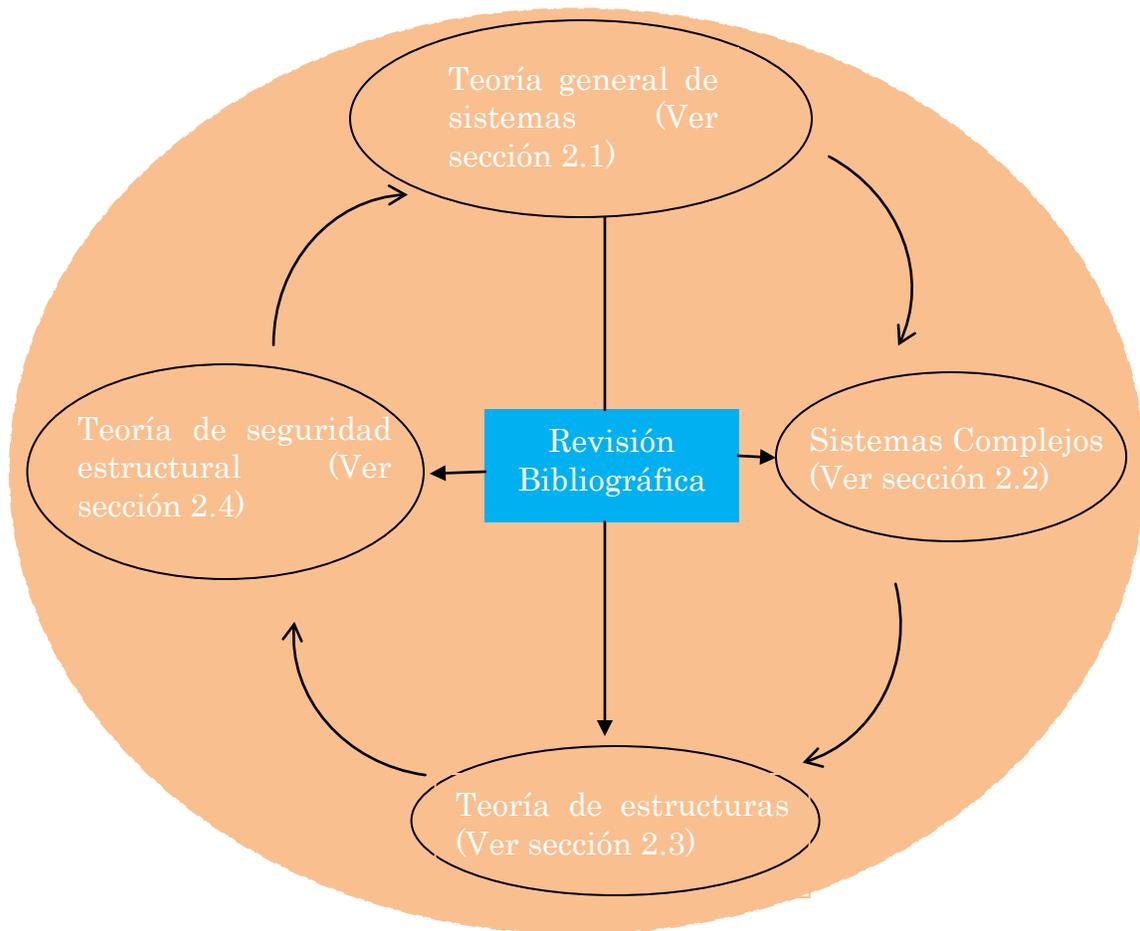
Anexo A, “Método de las Rigideces”

Anexo B, “Método de Elemento Finito (MEF)”

Anexo C, “Esfuerzos críticos”

Anexo D, “Esfuerzos complejos fractales”

## CAPITULO II. REVISION BIBLIOGRAFICA



## 2.1 Teoría General de Sistemas (TGS)

La teoría general de sistemas (TGS) tiene su origen en los mismos orígenes de la filosofía y la ciencia. La palabra sistema proviene de la palabra *sytema*, que a su vez procede *synistanai* (reunir) y de *synistemi* (mantenerse juntos). Se dice que el término es introducido en la Filosofía entre el 500 y 200 a. C., por Anaxágoras, Aristóteles, Sexto Empírico y los Estoicos. Entre los siglos XVI y XIX se trabaja en la concepción de la idea de sistema, su funcionamiento y estructura; se le relaciona con este proceso a René Descartes, Baruch Spinoza, Gottfried Wilhem Leibniz, Immanuel Kant, Ettiene Bonnot de Condillac, Augusto Comte y Pepper Stephen Coburn.

Específicamente se le atribuyen a George Wilhem Friedrich Hegel (1770 – 1831) el planteamiento de las siguientes ideas:

- El todo es más que la suma de las partes
- El todo determina la naturaleza de las partes
- Las partes no pueden comprenderse si se consideran en forma aislada del todo
- Las partes están dinámicamente interrelacionadas o son interdependientes

Diferentes concepciones de los filósofos griegos sobre el Hombre y el Universo, tienen en común una perspectiva integradora y globalista, que integra en un todo a los hombres, el universo físico y las ideas [67]. Siendo que para conceptuar el actual método de los sistemas, es conveniente considerar la idea de sistema no como una reciente técnica, más bien como una contribución al contexto de la historia de las ideas. En la Tabla 2.1a y 2.1b se muestran algunos pensadores y experimentadores importantes en el desarrollo de la ciencia.

Tabla 2.1a. *Pensadores en el desarrollo de la ciencia* [68].

Ionia	Tales	c. 624-565 a. C.	Los filósofos naturales de Ionia.
	Anaximandro	c. 611-547 a. C.	Creación de mitos racionales acerca del universo;
	Anaxímenes	c. 570- a. C.	discusión crítica de ellos
	Heráclito	c. 540-475 a. C.	El cambio como principio unitario que subraya la apariencia de las cosas; una distinción aguda entre el sentido y la razón.
	Demócrito	c. 470-400 a. C.	El mundo en forma de átomos y espacio, cualidades atributos a nuestros sentidos.
Maga Grecia	Parménides	Siglo V a. C.	El ataque a la ciencia observacional; aseveración de la primacía del pensamiento lógico. Desarrollo de las condiciones para discusión racional: “lo que no se puede formular sin contradicción no puede ser” (Wartofsky, 1968)
	Zenón de Elena	Siglo V a. C.	Defensa de la ciencia observacional; el mundo formado por mezclas de los elementos básicos: Tierra, Aire, Fuego, Agua.
	Empédocles	c. 500-430 a. C.	La tradición religiosa (anti-ioniana); la tradición matemática. La unidad central: el número. La estructura última del mundo se considera su forma matemática.
	Pitágoras	c. 582-a. C.	Empericismo: la verdad emerge de la observación cuidadosa y verificación de la práctica exitosa.
	Hipócrates (de Caos en Asia Menor)	c. 460- a. C.	
Atenas	Sócrates	c. 470- 399 a. C.	El método dialecto: el descubrimiento mediante la pregunta y la respuesta.
	Platón	c. 428- 347 a. C.	La realidad última expresada en ideas. La verdadera perfección del universo (detrás de las apariencias externas) se puede expresar matemáticamente.
	Aristóteles	c. 384- 322 a. C.	Las ideas no están separadas de su encarnación en los objetos. La clasificación por función como principio fundamental de la ciencia: el mundo visto como una lucha teológica de las cosas por alcanzar sus naturalezas verdaderas. Una cosmovisión comprensible que permaneció intacta durante 2000 años
<b>Ciencia medieval</b>			
Avicena	980-1037		El más grande de los filósofos musulmanes. Escritos sistemáticos sobre medicina.
Averroes	1126-1198		Una larga serie de comentarios sobre trabajos de Aristóteles. La recuperación de la ciencia aristotélica.
Grossetest	c. 1169-1253		Discusión de la metodología de la ciencia inductiva. Trabajo experimental sobre la óptica.
Roger Bacon	c. 1214-1294		Propuso una teoría de la ciencia experimental con método para establecer la verdad.
William de Ockham	c. 1300-1349		Un nominalista extremo. El principio de la rasuradora de Ockham: no multiplicar entidades innecesariamente.

Tabla 2.1b. *Pensadores en el desarrollo de la ciencia* [68].

La revolución científica		
Copérnico	1473-1543	Sugirió un modelo heliocéntrico del universo que redujo las complicaciones de los modelos anteriores con la tierra como centro.
Gilbert	1540-1603	Un énfasis importante en el enfoque experimental a los problemas piráticos (por ejemplo, la navegación).
Bacon	1561-1626	Declaro que el poder de la ciencia experimental de mayor control sobre las condiciones materiales de la vida y que era necesario un método de experimentación
Galileo	1564-1642	Un desafío importante a la cosmovisión Aristotélica mediante el trabajo sobre la mecánica. Las de demostraciones experimentales expresadas en el lenguaje de las matemáticas.
Kepler	1571-1630	Reducción de las observaciones astronómicas de Brahe a tres leyes matemáticas. El numero visto como el lenguaje de la naturaleza.
Harvey	1578-1657	La experimentación y la observación práctica y la investigación médica generan la teoría de la circulación de la sangre; la conclusión es respaldada con el cálculo.
Descartes	1596-1650	Se establece la metodología del racionalismo; el reduccionismo es el objetivo de la explicación científica. La culminación del desplazamiento hacia el experimento y la expresión matemática iniciado por Galileo.
Newton	1642-1727	El método une a la mecánica terrestre con la celestial y finalmente derrota a la cosmovisión aristotélica. Se establecen los principios de la experimentación.
Einstein	1879-1955	Establece una nueva cosmovisión que explica las observaciones de manera más completa que la cosmovisión de Newton, y que sobrevive a verificaciones estrictas.

### 2.1.1 Tipos de sistemas

Dependiendo de sus relaciones con el medio que les rodea. Tenemos: sistemas cerrados y sistemas abiertos [69]. En la Figura 2.1, se presenta la Taxonomía de Ciencias de Sistemas (TCS).



Figura 2.1. Teoría General de Sistemas Matemáticas, Filosóficas, TGS [69].

### 2.1.2 Sistemas cerrados.

En espacio topológico, un sistema es cerrado si y solamente si coincide con su encierro. Este tipo de sistemas, parecen sometidos a leyes de evolución intrínsecas y aislados de su entorno, del que están perfectamente diferenciados y con el no intercambian absolutamente nada a través de la interface de separación desde el punto de vista de la Teoría General de Sistemas, un sistema cerrado es aquel que no hace nada en ninguna parte y carece de finalidad, es decir, que desde la perspectiva de un observador externo el sistema cerrado, al no intercambiar flujos con su entorno, es un sistema inactivo aunque en su interior puedan ocurrir una serie de sucesos [70]. Los sistemas cerrados se mueven a un estado estático de equilibrio que es únicamente dependiente de las condiciones iniciales del sistema. Sí cambian las condiciones iniciales, cambiará el estado estable final. De acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, el sistema se moverá en dirección a la *entropía* máxima, término que posteriormente se explicará. En el caso de los sistemas abiertos, puede lograrse el mismo estado final a partir de diferentes condiciones iniciales, debido a la interacción con el medio. A esta propiedad se le da el nombre de *equifinalidad*. Los sistemas no vivientes con una retroalimentación apropiada tenderán hacia estados de equilibrio, que no dependen únicamente de las condiciones iniciales, sino más bien de las limitaciones impuestas al sistema. El movimiento hacia este estado final le da al sistema no viviente alguna semejanza a la conducta de búsqueda de objetivos, la cual está reservada estrictamente a los sistemas vivientes. Por tanto, en virtud del mecanismo de retroalimentación, los sistemas no vivientes "parecen mostrar equifinalidad" y adquirir algunas de las propiedades de los sistemas vivientes en virtud de estar abiertos [71, 72].

### 2.1.3 Sistemas abiertos

Un sistema abierto, está definido como sistema que intercambia materia con el medio circundante, que exhibe importación y exportación, constitución y degradación de sus componentes materiales. Este concepto de sistema abierto fue acuñado en el primer tercio de este siglo por el biólogo Ludwig von Bertalanffy, al notar que es notable y a la vez improbable proceso de permanente equilibrio e incrementado nivel de organización de los sistemas vivos y de muchas de las estructuras sociales, económicas e industriales creadas por el hombre no podía ser explicado bajo la perspectiva de una entropía creciente. La razón de ello habría que buscarla en el hecho de que estos sistemas interrelacionan con su entorno: son sistemas abiertos. Estos sistemas intercambian con su entorno flujos de materia, energía e información y estos flujos marcan diferencias esenciales con los sistemas cerrados [73,74]. La teoría de sistemas abiertos es nueva y tiene muchos problemas pendientes. El desarrollo de la teoría cinética de los sistemas abiertos deriva de dos fuentes:

primero la biofísica del organismo vivo; segundo, adelantos de la maquina industrial, recurren a sistemas de reacción continua, a causa de su mayor eficiencia. La teoría de la termodinámica de los sistemas abiertos es la llamada termodinámica irreversible (Meixner y Reik, 1959) [75].

#### 2.1.4 Sistemas suaves

La metodología suave se considera como caso general. Los sistemas "flexibles" están dotados con características conductuales, son vivientes y sufren un cambio cuando se enfrentan a su medio, estos serian del dominio de las ciencias de la vida y las ciencias conductual y social. Se le pueden aplicar la metodología del paradigma de sistemas. En vez de basarnos exclusivamente en el análisis y la deducción, necesitamos sintetizar y ser inductivos. En vez de basarnos estrictamente en métodos formales de pensamiento, debemos tomar en cuenta lo siguiente:

- Los procesos de razonamiento informales, como el juicio y la intuición.
- El peso de los datos comprobados, derivados de unas cuantas observaciones y muy poca oportunidad de réplica.
- Las predicciones basadas en datos comprobados endebles, más que en explicaciones.
- Mayor discontinuidad de dominio y la importancia del evento único

Los sistemas suaves se identifican como aquellos en que se les da mayor importancia a la parte social. La componente social de estos sistemas se considera la primordial. El comportamiento del individuo o del grupo social se toma como un sistema teleológico, con fines, con voluntad, un sistema pleno de propósitos, capaz de desplegar comportamientos, actitudes y aptitudes múltiples; siendo así que un sistema suave es un sistema con propósitos, que no solo es capaz de escoger medios para alcanzar determinados fines, sino que también es capaz de seleccionar y cambiar sus fines. En estos sistemas se dificulta la determinación clara y precisa de los fines en contraste a los sistemas duros. Los problemas en los sistemas suaves es que no tienen estructura fácilmente identificable. Los sistemas blandos son también, desde el punto de vista de la Teoría General de Sistemas, sistemas y es precisamente esta circunstancia la que da lugar a que existan situaciones comunes a ambos tipos de sistemas; los blandos y los duros [68].

#### 2.1.5 Sistemas duros

Las ideas de sistemas, serian la base del pensamiento del proyecto y los proyectos de sistemas en sí, así como la búsqueda de mejoras practicas en la situación problemática, proporcionarían un cuerpo creciente de experiencia que

debería ser fuerte tanto de discernimiento dentro de las ideas de sistemas como en la metodología para utilizar los conceptos de sistemas. Una metodología derivada tentativamente de un número de estudios podría con suerte verificarse después y redefinirse formando otras.

Se habla sobre la existencia de una dicotomía entre la teoría de sistemas "rígidos" (duros) y la teoría de sistemas "flexibles" (blandos), los sistemas "rígidos" son típicamente los encontrados en las ciencias físicas y a los cuales se puede aplicar satisfactoriamente las técnicas tradicionales del método científico y del paradigma de ciencia [74].

### **2.1.5.1 Características de los Sistemas Duros.**

Los conceptos básicos de sistemas representan una excelente manera de analizar y tratar sistemas tanto duros como blandos. Ahora se verán cómo algunos conceptos se comportan cuando se aplican al tratamiento de un Sistema Duro (SD).

- Objetivos
- Medidas de Desempeño
- Seguimiento y Control
- Toma de Decisiones

El proceso de la toma de decisiones sea un proceso cuyas variables de decisión sean medibles, cuantitativas y fáciles de determinar. Cuando los estados futuros de lo que puede pasar son claramente identificables. Para la asignación de los recursos del sistema a las áreas que lo soliciten sean fáciles y expeditas. En general los sistemas permiten procesos de razonamiento formal en los cuales las derivaciones Lógico - matemáticas representan un papel muy importante. En esta forma podemos ver que los experimentos realizados en estos sistemas son repetibles y la información y evidencia obtenida de los mismos puede ser probada cada vez que el experimento se efectuó teniendo así relaciones de tipo CAUSA - EFECTO. Finalmente, y debido a este tipo de relaciones CAUSA - EFECTO, los pronósticos o predicciones del futuro esperado del sistema bajo ciertas condiciones específicas son bastantes exactos y/o seguros. [74].

## **2.2 Sistemas Complejos**

Un sistema complejo es una representación de un recorte de esa realidad, conceptualizada como una totalidad organizada (de ahí le denominación de sistema), en la cual los elementos no son "separables" y, por tanto, no pueden ser estudiados aisladamente. De modo que los sistemas complejos están

constituidos por elementos heterogéneos en interacción y de allí su denominación de complejos, lo cual significa que sus subsistemas pertenecen a los dominios materiales de muy diversas disciplinas, siendo característica determinante la interdefinibilidad y mutua dependencia de las funciones que cumplen dichos elementos dentro del sistema total [76]. Etimológicamente la palabra complejo, tiene como raíz la expresión “plexus” que significa entrelazamiento, que engendra complexus; es decir, enredo, conexión, conflagración, apretón, y perplexus (embrollo) [77], David Bohm en "La totalidad y el orden implicado". Sistema y conjunto también significan etimológicamente los mismo, "puesto junto", pero conjunto hace énfasis en las entidades y sistema hace énfasis en las relaciones, la "más difícil de las categorías de Aristóteles". Por eso se suele definir sistema como un conjunto de elementos relacionados [78].

### **2.2.1 Teoría de sistemas complejos**

Durante los últimos años se han venido desarrollando considerables esfuerzos por abordar temas en física, biología y ciencias cognitivas que hasta el momento resultaban imposibles de analizar con las herramientas de trabajo tradicionales. Muchos de estos programas de investigación pueden ser agrupados bajo la clasificación como un estudio de los Sistemas Complejos. Las primeras perspectivas teóricas que trataron con los sistemas complejos aparecieron en la década de 1940, clasificándose en dos grandes series. Por un lado los paradigmas globales de la complejidad, y por el otro una colección de algoritmos que permiten modelar los procesos emergentes [79].

Finalmente tenemos la teoría de catástrofes, una rama cualitativa de las matemáticas que estudia las singularidades o procesos de ruptura y crisis. Las ideas originales de este paradigma fueron desarrolladas por René Thom en la década del 60 y están sustentadas en el estudio de las topologías formales de distintos tipos de fenómenos, pero la aplicación antropológica más relevante que encontramos es el estudio del colapso de la civilización maya hecho por Colin Renfrew. Una característica esencial del estudio de sistemas complejos es la aparición de conceptos generales independientes del contexto. El resultado es que hay campos del saber que tienen el potencial de ser significativamente reformulados y transformados por la disponibilidad de estos nuevos conceptos.

El comportamiento autosimilar es otra propiedad típica de los sistemas que se hallan en una situación de complejidad. La autosimilaridad implica que no importa cuánto se modifiquen las magnitudes escalares de un sistema físico, biológico o social, siempre el comportamiento del mismo mostrará la misma pauta autoorganizativa. Para Vallée, el primer aspecto de la complejidad se haya asociado a la relación entre un sujeto, consciente y actuante, y un objeto en interacción con él; de esta surge el sentimiento eventual de la complejidad;

la complejidad de un mismo objeto es relativa al sujeto con el cual él está en interacción, y a las capacidades de conocimiento y de acción de ese sujeto; en consecuencia la complejidad es una relación. Otro aspecto de la complejidad es el conjunto de los estados posibles de los objetos, sobre el cual puede ser, en algunos casos, definida una densidad de probabilidad de ocurrencia. Se considera que un sistema tal, es tanto más complejo, en la medida que su estado es menos especificado [80].

### 2.2.2 Tipos de Complejidad

Para el estudio de la complejidad, se hace insoslayable el análisis histórico, pues, lamentablemente, muchas premisas y antecedentes científicos y filosóficos de las actuales teorías y enfoque sobre la complejidad, han sido olvidados, ignorados o subestimados e incluso, tergiversados y simplificados. Desde la antigüedad las ideas sobre la complejidad se expresaban en enfoques espontáneos a través de aforismas, metáforas e ingeniosas sentencias mezcladas con ideas míticas y acertijos [81]. A continuación se describen los tipos de complejidad, ya que son varias las formas en que se pueden caracterizar:

- Complejidad por cantidad de variables. Ejemplo de esto son: el cerebro, la guerra, una galaxia, etc.
- Complejidad por riqueza de interacciones. En este tipo, aparte de la cantidad de variables, las interacciones son muchas y muy diferentes. Son ejemplos: el cerebro humano, los problemas de las grandes ciudades, los problemas ambientales, etc.
- Complejidad por auto organización. Existe una gran cantidad de fenómenos en donde la suma de las partes y los efectos a distancia entre las mismas, no se pueden explicar, a menos que se asuma que existen propiedades de los fenómenos que sólo aparecen bajo ciertas condiciones de interacción o fenómenos colectivos. Casos clásicos de auto organización son: el fenómeno de láser en Física, los fenómenos de procesamiento de información en el cerebro humano, los fenómenos de tipo colectivo en Ciencias Sociales o los fenómenos de manadas en Biología. Interacciones cercanas, como son la interacción entre partículas, células en el corazón; interacciones remotas como es en el cerebro. Interacciones o interacciones lejanas, como son los efectos climáticos que se dan como el fenómeno conocido como “el niño” (técnicamente conocidas como “teleconexiones”). Otro ejemplo de esta categoría son los fenómenos tan complicados como la gravedad.
- Complejidad algorítmica. Desde un punto de vista matemático y computacional, existen fenómenos que a pesar de ser simples (con pocos elementos), su solución es sumamente difícil de lograr. A ella pertenecen cierta clase de problemas matemáticos, en donde se puede demostrar que

no se tiene solución analítica, o que su solución requiere de cantidades extraordinarias de recursos computacionales.

- Complejidad por construcción matemática. La complejidad algorítmica ha dado como consecuencia este tipo de complejidad, en donde las estructuras artificiales realizadas en matemáticas crean ciertos problemas de extraordinaria complejidad de análisis. Este tipo de problemas se aleja mucho de la matemática axiomática y sabemos que su solución no se puede dar ni por procedimientos analíticos ni por simulación en computadora, sino por la experimentación (en el sentido estricto de las ciencias naturales), como tiene que estudiarse el comportamiento de estos sistemas numéricos o matemáticos (matemática experimental) [82,83].

El estudio de la complejidad equivale a establecer dos cosas diferentes, pero contemporáneas y paralelas entre sí:

- a) Se trata de determinar la complejidad de un sistema complejo siempre relativamente a otro u otros sistemas complejos; y, en estrecha relación con esto,
- b) El estudio de la complejidad es, en realidad, la determinación de la complejidad máxima de un sistema.

El rasgo común a ambos planos es el rechazo a procedimientos meramente descriptivos, fenomenológicos acaso. La complejidad de un sistema determinado se conoce como la dinámica del sistema, y esta consiste en los cambios que presenta un sistema determinado, cambios mediante los cuales, sin embargo, el sistema sigue siendo el mismo. El título físico en el que se condensan estos cambios es el de transiciones de fase, y éstas son dinámicas colectivas que tienen lugar al interior del sistema en consideración, o bien que son propios del sistema mismo [84].

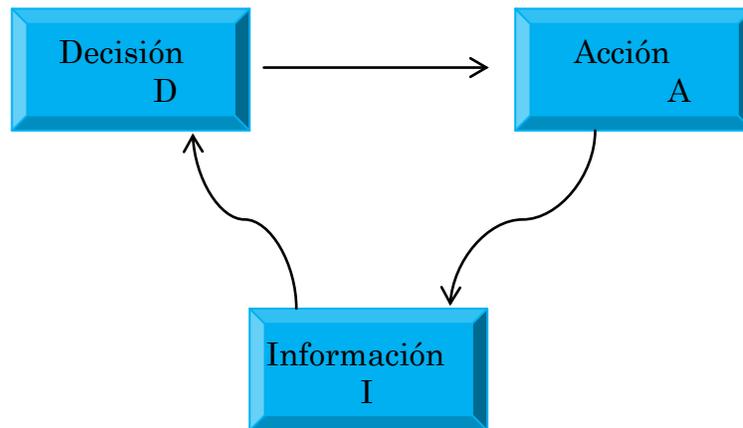
### 2.2.3 Dinámica de los Sistemas Complejos

La denominación dinámica de sistemas, se refiere al comportamiento dinámico que se pueden presentar en los sistemas, tomando como elemento básico su análisis a la estructura de realimentación negativa, como el de la Figura 2.2.

Los sistemas complejos son sistemas abiertos: carecen de límites bien definidos y realizan intercambios con el medio externo, cuando las condiciones de contorno sufren sólo pequeñas variaciones con respecto a un valor medio, el sistema se mantiene estacionario, es decir, la relación entre sus elementos fluctúan, sin que se transforme su estructura. Deben distinguirse dos tipos bien diferenciados de estados estacionarios: aquellos que corresponden a situaciones

de equilibrio (como, por ejemplo, el equilibrio termodinámico de un sistema aislado), y aquellos que, alejados del estado de equilibrio, se mantienen estacionarios por la acción de los intercambios con el medio [76]; y en el paso de un nivel a otro existe un estado de inestabilidad, llamados puntos de bifurcación. Es pertinente señalar la coincidencia entre los puntos de bifurcación y las estructuras cerebrales que se denominan capas ocultas y donde pueden emerger propiedades no directamente deducibles de los componentes o variables controladas [85].

Los sistemas dinámicos constituyen hoy en día una fuente para el modelaje de fenómenos en muchas ramas de la ciencia como la biología, la economía, química, ciencias sociales, etc. Los fractales se han encontrado en muchos procesos como por ejemplo la turbulencia, los terremotos, el clima, la actividad cerebral entre otros.



*Figura 2.2.* Estructura de realimentación negativa en el proceso básico de toma de decisión [86]

#### 2.2.4 Fractales

Un fractal es un objeto o proceso que muestra similares características a diferentes escalas, por consiguiente, es invariante al cambio de escala. Muchos fenómenos naturales son fractales y una consecuencia importante de dicha fractalidad es que se puede obtener información a una determinada escala [87].

En 1986, Mandelbrot dio una definición bastante intuitiva de conjunto fractal: “un conjunto en que las partes son similares al total, en algún sentido”. La definición más aceptada entre los matemáticos: “un conjunto que tiene dimensión topológica menor que su dimensión de Hausdorff”, no aclara mucho para aquellos interesados en la geometría fractal que no posean una buena base matemática. Lo más generalizado es considerar que un fractal es un conjunto que tiene una o varias de las siguientes propiedades:

- Tiene detalles a todas las escalas
- Es autosemejante
- Tiene definición algorítmica sencilla
- Tiene dimensión topológica menor que su dimensión de Hausdorff.

El término fractal, procedente del latín “fractus” (fragmentado, irregular), fue introducido por Mandelbrot para designar estos conjuntos que no tenían ningún nombre concreto y desde entonces se conoce esta rama de las matemáticas como geometría fractal, el verbo latino correspondiente, FRANGERE, significa romper, crear fragmentos irregulares. Se puede decir que la geometría fractal es el lenguaje de la naturaleza [88, 89].

Existen dos categorías de fractales: los fractales geométricos, que repiten continuamente un patrón idéntico, y los fractales aleatorios. Las principales propiedades que caracterizan a los fractales son:

- ✓ El auto semejanza que consiste en que cada pequeña porción del fractal puede ser vista como una réplica de todo el fractal en una escala menor.
- ✓ La complejidad infinita que se relacionada con el hecho de que el proceso generador de los fractales es recursivo, teniendo un número infinito de iteraciones.
- ✓ La dimensión de los fractales que, al contrario de lo que sucede en la geometría euclidiana, no es necesariamente un número entero, de hecho, es un número fraccionario. La dimensión de un fractal representa el grado de ocupación de éste en el espacio, y tiene que ver con su grado de irregularidad.

#### **2.2.4.1 Geometría Fractal**

Los Fractales son los objetos matemáticos que constituyen la Geometría de la Teoría del Caos, aunque es importante destacar que no todos los fractales son caóticos. Los objetos fractales fueron creados mucho antes de haberse desarrollado formalmente la Geometría Fractal o la Teoría del Caos. Se pueden encontrar y reconocer figuras con características fractales como la del triángulo de Sierpinski (es un fractal muy autosimilar), hallamos pues una dimensión fractal comprendida entre 1 y 2 que no es entera, ver Figura 2.3, en grabados de tela de hace varias décadas atrás, hasta en los años de 1400 se hallaron grabados japoneses con estas estructuras. La Geometría Fractal, llamada también "Geometría de la Naturaleza", es un conjunto de estructuras irregulares y complejas descritas a través de algoritmos matemáticos y computacionales; los cuales reemplazan a los puntos, rectas, circunferencias y demás figuras provenientes de la matemática tradicional. Estos objetos tienen como características fundamental las propiedades de Autosimilitud y la de

convivir en extraños paisajes formados por dimensiones fraccionarias [90]. La geometría euclidiana describe por medio de formula, asigna dimensiones entera a los objetos y es adecuada para describir objetos hechos por el hombre. En contraparte, le geometría fractal describe por medio de algoritmos, permite dimensiones fraccionarias y es adecuada para describir formas naturales. Matemáticamente, un fractal es un subconjunto de un espacio métrico para el cual su dimensión de Hausdorff-Besicovitch,  $D_{H-B}$  es estrictamente mayor que su dimensión topológica,  $D_T$ . La dimensión de Hausdorff-Besicovitch no está restringida a tomar valores enteros. Esta definición, sin embargo, excluye algunos conjuntos que son considerados fractales. Los fractales generalmente poseen algún tipo de autosimilitud, puede decirse que están formados por partes pequeñas que se parecen a todo. Esta similitud puede ser geoméricamente estricta o bien puede ser solamente aproximada o estadística [91].

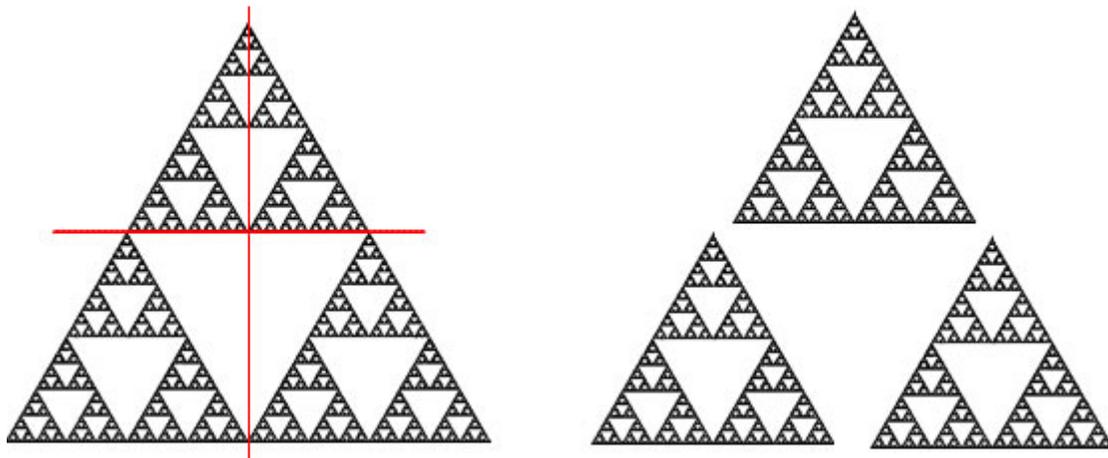


Figura 2.3. Triangulo Sierpinski Fractal auto similar [91]

#### 2.2.4.2 Propiedad de los Fractales:

- Dimensión no entera. La dimensión de un fractal no es un número entero sino un número generalmente irracional.
- Compleja estructura a cualquier escala. Los fractales muestran estructuras muy complejas independientemente de la escala a la cual lo observemos.
- Infinitud. Se consideran infinitos ya que a medida que aumentamos la precisión del instrumento de medición observamos que el fractal aumenta en longitud o perímetro.
- Autosimilitud en algunos casos. Existen fractales plenamente autosimilares de manera que el todo está formado por pequeños fragmentos parecidos al todo [91].

Los Fractales tienen dos características fundamentales, ellas son:

- Autosimilitud
- Dimensión Fractal

Definición de Autosimilitud: característica que presentan determinados objetos en los cuales los detalles más pequeños que lo componen tienen alguna relación estadística con sus propiedades globales, repitiéndose tales detalles de una manera infinita. Cuatro propiedades que se encuentran ocultas en esa definición [92,93]:

- 1) Existen dos tipos bien definidos de fractales. Los LINEALES y los NO LINEALES. Los primeros fractales son justamente los lineales y se generan a través de algoritmos conocidos por la matemática euclidiana, el Conjunto de Mandelbrot se genera a través de números complejos, y tiene una dificultad mucho mayor.
- 2) Los Fractales pueden ser generados a partir de elementos de la matemática tradicional (fractales lineales), o a través de números complejos. el Conjunto de Mandelbrot, al igual que los demás fractales no lineales tienen su origen en los números complejos. Los fractales matemáticos perfectos y teóricos tienen un número infinito de iteraciones y detalles.
- 3) Las iteraciones. Es repetir y volver sobre sí mismo una cierta cantidad de veces mediante algoritmos. En el caso de los fractales lo que iteramos son fórmulas o ecuaciones como la que recién hemos visto para generar el Conjunto de Mandelbrot.
- 4) Todos los fractales deben tener una dimensión fractal, pero no todos los fractales son autosimilares.

#### **2.2.4.3 Dimensión Fractal**

Para entender el concepto de dimensión fractal es conveniente primero darnos cuenta que, existe una gran cantidad de fenómenos y ecuaciones que tienen como uno de sus parámetros la dimensión de lo que modelan [94]. La noción de dimensión fractal provee una forma de medir la rugosidad de una curva. Normalmente se consideran a las líneas como de dimensión 1. Sin embargo, una curva rugosa que recorra una superficie, en el extremo puede ser tan rugosa que efectivamente llene la superficie en la cual se encuentra, en cuyo caso tendría dimensión 2, como por ejemplo la curva de Hilbert.

## **i. Tipos de Fractales**

Hemos dicho que la característica de los fractales es su auto-similaridad y la dimensión fractal, de modo que existen dos tipos de fractales que son los lineales y los no lineales. Los fractales lineales son aquellos que se construyen con un simple cambio en la variación de sus escalas. Esto implica algo muy importante, los fractales lineales son exactamente idénticos en todas sus escalas hasta el infinito. El triángulo y la alfombra de Sierpinski y la curva de Koch son ejemplos de fractales lineales.

Los fractales no lineales, en cambio, son aquellos que se generan a partir de distorsiones complejas o justamente como lo dice su nombre, y usando un término proveniente de la matemática Caótica, distorsiones no lineales. La mayoría de los objetos fractales puramente matemáticos y naturales son no lineales. Ejemplos de ellos son: el súper conocido Conjunto de Mandelbrot o el Conjunto de Julia [95].

## **ii. Exponente de Hurst**

El primero en estudiar las series fractales fue el científico británico Harold Edwin Hurst (1880-1978). Posteriormente, sus ideas fueron retomadas por Mandelbrot quien colocó su trabajo en un contexto más general bajo el nombre de Análisis de Rango Reescalado (R/S). El R/S es un método estadístico utilizado para evaluar la ocurrencia de eventos poco comunes y es una herramienta ideal para procesos físicos y financieros, aunque no se limita solamente a este tipo de eventos. El parámetro que resulta de un análisis (R/S), el coeficiente o exponente Hurst, es una medida de independencia de las series de tiempo y una manera de distinguir series fractales. [96].

Por otra parte Hurst estaba enterado del trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano. Este último había encontrado que la distancia que una partícula errática suspendida en un fluido cubre se incrementa con la raíz cuadrada del tiempo, si escribimos esto en forma de ecuación tenemos que:

$$R = T^{0.5} \quad (2.1)$$

Donde  $R$  es la distancia y  $T$  es el tiempo. La ecuación anterior es conocida como regla de un medio y es utilizada principalmente en estadística.

Para aplicar este concepto a series de tiempo que no sean movimientos brownianos, como el de la partícula errática de Einstein, se deberá considerar una ecuación que tome en consideración que los componentes de las series de tiempo no son independientes. Hurst al resolver su problema relacionado con la capacidad de la presa encontró la siguiente ecuación que generaliza la idea

anterior que solo era aplicable a movimientos brownianos (Mandelbrot y Wallis lo probaron en 1969):

$$(R/S)_n = cn^H \quad (2.2)$$

Donde  $(R/S)$  se le conoce como el estadístico Rango Reescalado.

$c$  = constante

$n$  = indicador del valor de la serie de tiempo

$H$  = exponente o coeficiente Hurst

### iii. Rango Reescalado $(R/S)$

$(R/S)$  Tiene media cero y se expresa en términos de la desviación estándar. En general, los valores de  $R/S$  se incrementan con  $n$ , por el valor de la ley de potencias igual al exponente Hurst, esta es la primera conexión del fenómeno Hurst y la geometría Fractal. Hay que mencionar además que el método  $R/S$  es un análisis no paramétrico que no requiere de una distribución específica. Para que una serie pueda ser considerada como fractal, el requisito clave que debe de cumplir es una escala de ley de potencia.

El exponente de Hurst se determina por medio de una regresión lineal de los puntos de  $\ln(R/S)_n$  contra  $\ln(n)$ , como se muestra en la siguiente ecuación

$$\ln(R/S)_n = \log(c) + H \log(n) \quad (2.3)$$

Si el sistema tuviera la característica de independencia entonces  $H = 0.5$ . Sin embargo, como resultado de su investigación de la presa del río Nilo encontró un coeficiente de  $H = 0.91$ . Si comparamos el ejemplo de la partícula errática de Einstein con un  $H = 0.91$  entonces esta última partícula cubriría una distancia mayor que otra con un proceso aleatorio en el mismo periodo. Mandelbrot demostró empíricamente que en series de tiempo cuyas observaciones son independientes el estadístico  $(R/S)$  son asintóticamente proporcionales a la raíz cuadrada, es decir si  $H = 0.5$  resulta un evento aleatorio puro. Hurst supone como hipótesis nula que el comportamiento de fenómeno sea de una caminata aleatoria o un movimiento browniano, si este fuera el caso la ecuación del rango reescalado estaría dado por [96]:

$$\log(R/S)_n = 0.5 \left( \log n + \log \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.4)$$

## 2.3 Teoría de Estructuras

### 2.3.1 Introducción

La estructura puede comprenderse como un subsistema dentro del sistema principal constituido por la obra global. Su función es absorber sollicitaciones (Carga muerta y cargas vivas) que se derivan del buen funcionamiento de la construcción [97]. Bajo el concepto de Teoría de las estructuras o Mecánica de las estructuras se comprende, el estudio de las fuerzas soportadas por las estructuras y por cada uno de los miembros de las mismas. En la mayoría de los casos, es una aplicación de los principios de la Estática, pero la complejidad de una estructura o la indeterminación de las condiciones de la carga, se oponen a un análisis matemático exacto de las fuerzas y se hace necesario hacer algunas hipótesis que deben ser comprobadas experimentalmente o basadas en la experiencia de la práctica [98].

La palabra estructura cuenta con varios significados, de modo que por estructuras de ingeniería se entiende por algo que este edificado o construido. Las principales estructuras con que trabaja un ingeniero civil son: puentes, edificios, muros, presas, torres y cáscaras. Dichas estructuras se hayan compuestas de uno o más elementos resistentes de modo que sean capaces de mantenerse sin cambios apreciables en su geometría durante la carga y la descarga [99].

En el diseño de las estructuras se toman muchas consideraciones, entre las cuales los objetivos principales que se deben lograr:

- Cumplir los requisitos de funcionalidad, requiere que las deflexiones sean pequeñas, que las fisuras si existen, se mantengan en límites tolerables y que las vibraciones se minimicen [98].
- Soportar las cargas en condiciones seguras, es decir que la resistencia de la estructura sea la adecuada para todas las cargas que pueden llegar a actuar sobre ella. [98].

El objetivo de la teoría de la estructura es el análisis de esfuerzos con referencia ocasional a las cargas. Lo más importante de la teoría de estructuras radica en los fundamentos y no en los detalles de diseño [99].

La teoría de las estructura, está estrechamente enlazada con la resistencia de materiales y la resistencia de materiales se le define como el estudio de la distribución interna de esfuerzos que produce un sistema de fuerzas exteriores aplicadas. Como se observa en la siguiente Figura 2.4 [100].

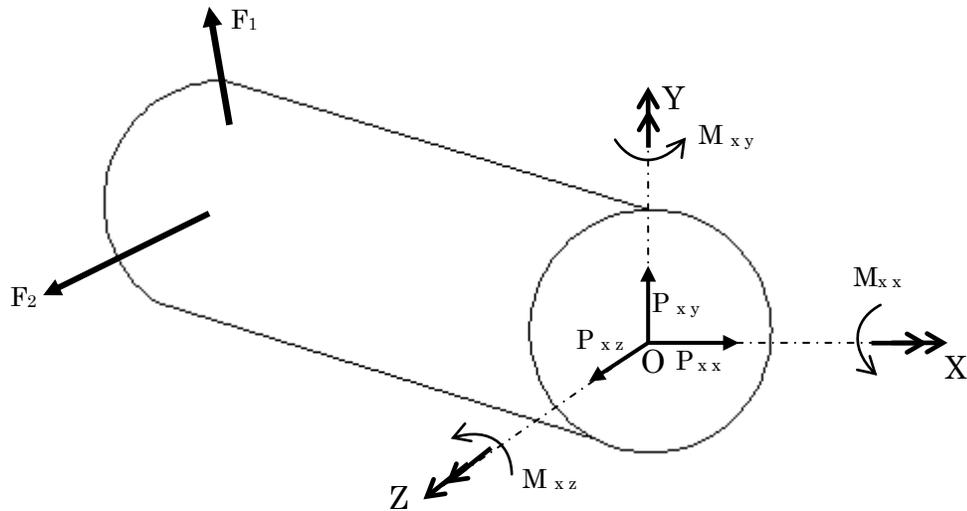


Figura 2.4. Componentes de Fuerzas internas [100].

### 2.3.2 Esfuerzos y deformaciones

Siempre que una carga es aplicado a una estructura desarrollara esfuerzos en el material y sucederán deformaciones. Cuyo significado es, cualquier cambio de la forma de alguna parte de la estructura, en la Figura 2.5, se muestra tal cambio de forma estructural [101].

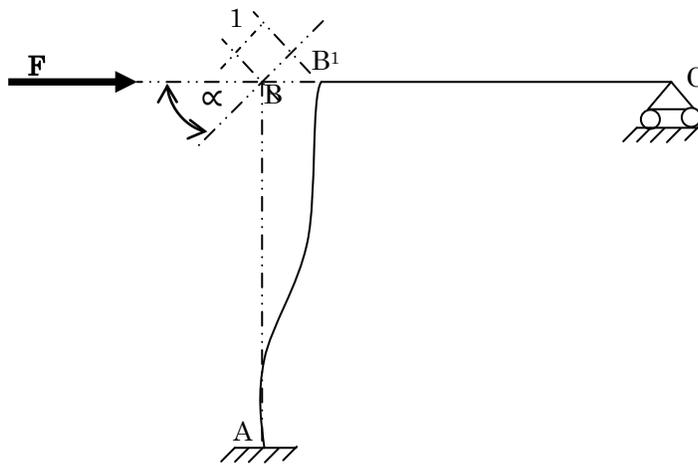


Figura 2.5. Deformación axial [101]

Los principales tipos de deformación existentes en elemento estructurales son: deformaciones axiales, deformación por flexión, por cortante y torsión.

Estas se producen por resultantes de esfuerzos en la forma de axiales, pares de flexión, pares de torsión y fuerzas cortantes [101].

Al suponerse que las deformaciones son muy pequeñas y que el material es linealmente elástico (ley de Hooke). De acuerdo a estas condiciones, los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones unitarias en el material, utilizándose así el principio de superposición para la combinación de esfuerzos, deformaciones unitarias y deformaciones debidas a varios sistemas de carga.

### 2.3.3 Principio de superposición

El principio de superposición, supone que ciertas acciones y desplazamientos están impuestas en la estructura, causando otras acciones y desplazamientos, generando relaciones lineales entre las acciones y los desplazamientos. En general, los efectos producidos por varias causas pueden obtenerse combinando los efectos debidos a las causas individuales, la Figura 2.6, da a conocer este principio [102, 103].

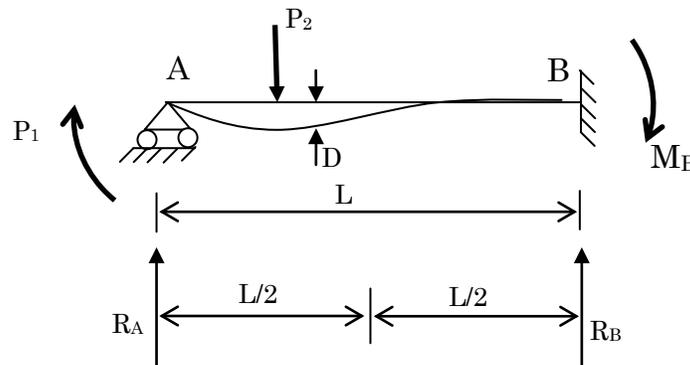


Figura 2.6. Principio de superposición [103]

Esta viga está sujeta a cargas  $p_1$  y  $p_2$ , que producen varias acciones y desplazamientos en toda la estructura. Las reacciones  $R_A$ ,  $R_B$  y el momento  $M_B$  se desarrollan en los apoyos, y se producen en el centro del claro un desplazamiento  $D$ . En la Figura 2.7 y 2.8, se muestran los efectos de las acciones de las cargas  $p_1$  y  $p_2$ .

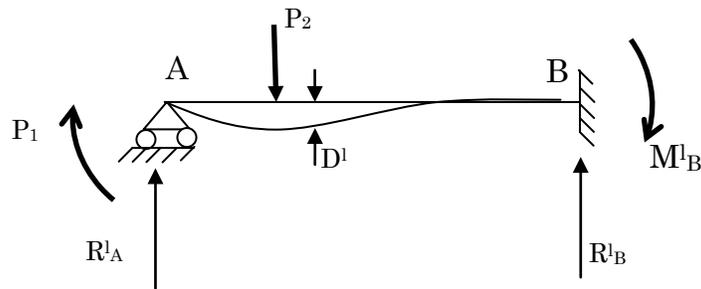


Figura 2.7. Acciones de las cargas aplicadas [103]

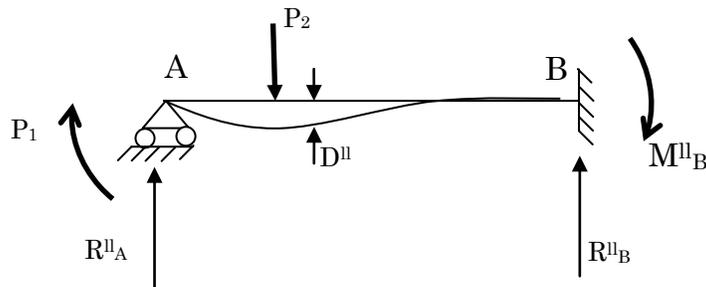


Figura 2.8. Acciones de las cargas aplicadas [103]

De acuerdo al principio de superposición, se pueden combinar para obtener las siguientes ecuaciones de superposición [103].

$$\begin{aligned}
 R_A &= R_A^I + R_A^{II} \\
 R_B &= R_B^I + R_B^{II} \\
 M_B &= M_B^I + M_B^{II} \\
 D &= D^I + D^{II}
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

### 2.3.4 Teoría de elasticidad

Un cuerpo perfectamente elástico, es aquel que recupera su forma después de retirar las fuerzas que actúan sobre él. En caso contrario, se inducen en el cuerpo del fenómeno de plasticidad.

La elasticidad puede ser de tipo lineal o no lineal, dependiendo si se cumple o no el principio de superposición, es decir, si hay proporcionalidad entre las tensiones y las deformaciones (o ley de Hooke) [104].

### 2.3.4.1 Estados de tensiones y deformaciones

El análisis estructural de un elemento (ver, Figura 2.5) nos permite determinar su respuesta estructural cuando esta se ve afectada a las diferentes acciones, durante su vida útil. Por respuesta estructural se entiende, que es la determinación de los estados de tensiones y deformaciones a lo que la estructura está sometido por efecto de los diferentes estados de cargas [104].

Las fuerzas que surgen entre las diversas partes de un cuerpo deformado se llaman fuerzas interiores o esfuerzos, a diferencia de las fuerzas exteriores. Las leyes que relacionan las fuerzas y las deformaciones son, en general, muy complejas, no sólo porque unas y otras están distribuidas de manera bastante compleja en las diferentes partes del cuerpo, sino también, porque habitualmente la relación entre las fuerzas y las deformaciones no es univoca y depende de la magnitud y la naturaleza de las variaciones de las fuerzas [103].

Las tensiones y deformaciones unitarias están relacionadas entre sí. Al fijar la sollicitación exterior o fuerza exterior, es evidente la deformación que se origina, y en consecuencia, la tensión creada en el sólido elástico depende de la fuerza de tracción molecular, es decir de la estructura interna del material. Estas fuerzas causan en el interior del material un estado de tensiones que se suponen uniforme sobre cualquier sección recta. La tensión normal  $\sigma$  está relacionada con la fuerza  $P$  mediante la siguiente ecuación y en donde es el área de la sección del material, ver la Figura 2.9 [104].

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.6)$$

Esta sección, debido al esfuerzo, se alarga. A este alargamiento se le nombra unitario  $\varepsilon$  en el sentido longitudinal. Generando aumento en la fuerza  $P$  y llevando los valores  $\sigma$  y  $\varepsilon$  a un grafico, en donde sus ordenadas miden en tensión ( $\sigma$ ) y el de las abscisas deformaciones unitarias ( $\varepsilon$ ), como se muestra en la Figura 2.10.

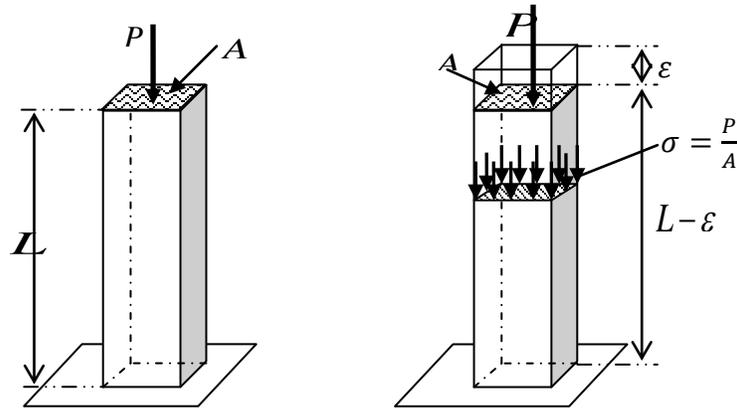


Figura 2.9. Esfuerzo interno [104].

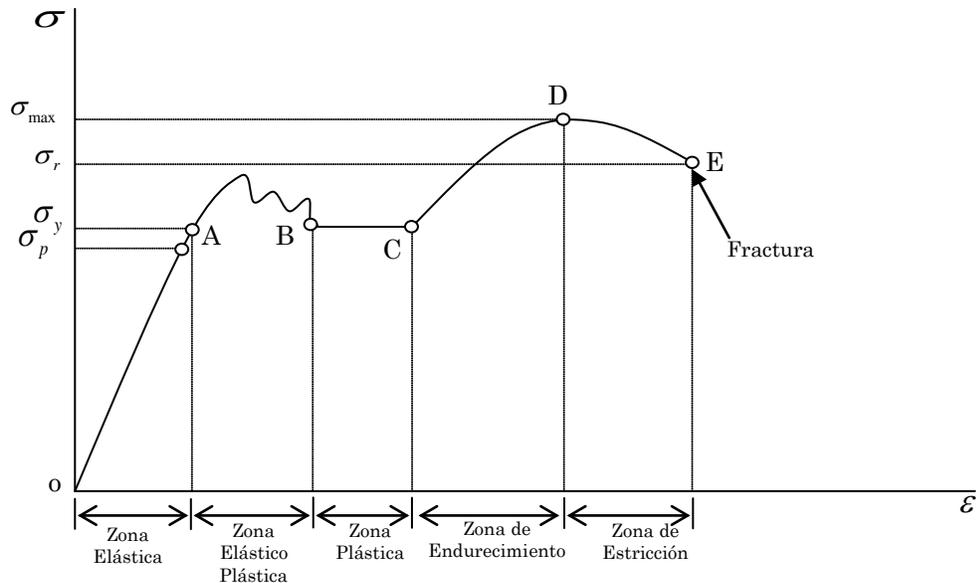


Figura 2.10. Diagrama de tensión y deformación para el acero dulce [105].

Siendo así, que, para esfuerzos pequeños la tensión  $\sigma$  y la deformación  $\varepsilon$  son proporcionales entre sí, la zona de los valores pequeños de las deformaciones y tensiones que corresponden al sector  $0-\sigma_c$  de la curva tensión y deformación, constituye el dominio de las deformaciones elásticas del material en cuestión, del acero [106], del dominio de  $0-\sigma_p$  existe proporcionalidad con la deformaciones unitarias [105], entre los valores de  $\sigma_p-\sigma_c$  se haya el punto correspondiente al límite de elasticidad. Un cuerpo solamente es elástico para las deformaciones en las cuales no se alcanza el

límite de elasticidad del material en cuestión. Solo en la zona de las deformaciones elásticas, o simplemente, en la zona elástica, las tensiones y deformaciones guardan relación univoca [106].

### 2.3.4.2 Campo de Deformaciones

En cada punto del sólido existe una deformación unitaria como se muestra en la Figura 2.11 y así mismo se define un vector  $\Delta$  que contiene las deformaciones del sólido en la dirección de las fuerzas aplicadas, consideradas como escalares. Cuyas componentes son funciones de las coordenadas del punto  $(x, y, z)$  [107,108].

$$u = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad \Delta = \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix} \quad (2.7)$$

De modo que de acuerdo a la teoría de la elasticidad, el vector de deformación en un nodo está definido por seis componentes [107]:

$$\varepsilon = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T \quad (2.8)$$

Donde

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.9)$$

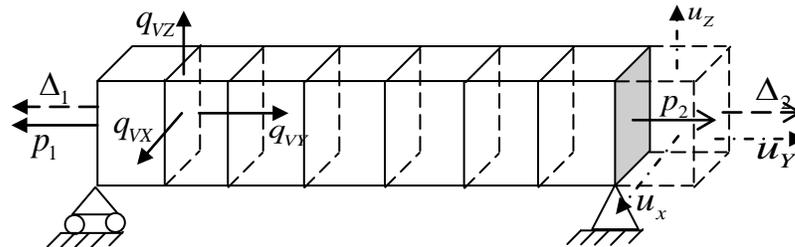


Figura 2.11. Fuerzas distribuidas sobre el volumen [109].

### 2.3.4.3 Densidad de Energía Elástica

El cambio dimensional de un cuerpo, se llama energía de deformación y a la energía de deformación por unidad de volumen se le denomina densidad de energía. La relación entre la energía de deformación y la densidad de la energía, está dado por la siguiente expresión:

$$U = \int_v U_0 dV \quad (2.10)$$

Donde  $U$  es la energía de deformación,  $U_0$  densidad de energía de deformación y  $V$  es el volumen del cuerpo. La densidad de energía de deformación, es el área bajo la curva que aparece en la Figura 2.12, del cual se obtiene la siguiente ecuación. [110,111]:

$$U_0 = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2.11)$$

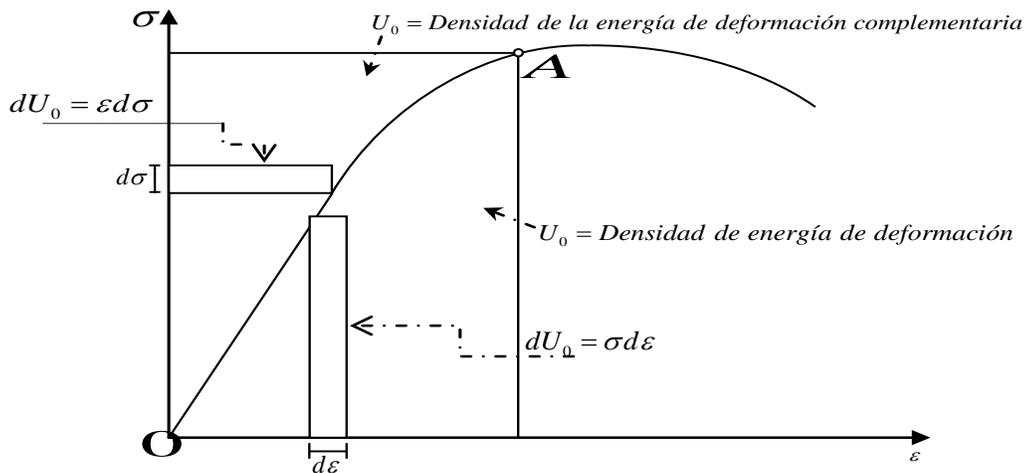


Figura 2.12. Densidad de energía [110, 111]

De igual modo. La densidad de la energía de deformación en el punto de fluencia se llama modulo de resiliencia (o de recuperación de elasticidad), así mismo la densidad de energía de deformación en ruptura se llama módulo de tenacidad.

El modulo de resiliencia es una medida de la energía recuperable (elástica) por unidad de volumen que puede almacenarse en un material, es por eso que

en un material entre mayor sea su módulo de resiliencia, mas energía podrá almacenar.

El módulo de tenacidad es una medida de la energía por unidad de volumen que un material puede absorber sin romperse. Siendo este módulo importante en la resistencia a la fisuración y en la propagación de fisuras [110, 111].

#### 2.3.4.4 Ecuaciones de compatibilidad

Las ecuaciones de compatibilidad, se obtienen de las ecuaciones de deformación con términos de desplazamientos, así mismo la relación de las deformaciones angulares con las lineales [112].

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} &= \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2}\end{aligned}\tag{2.12}$$

#### 2.3.4.5 Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Si un cuerpo se encuentra en estado de equilibrio, cada punto de él debe estar en equilibrio. En la Figura 2.13, se muestra el estado de esfuerzo y las ecuaciones de equilibrio se obtienen haciendo la sumatoria de las fuerzas en las direcciones x1, x2 y x3 iguales a cero ya que el punto O está en equilibrio, obteniéndose las ecuaciones [113, 114]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} + b_1 &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_3} + b_2 &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + b_3 &= 0\end{aligned}\tag{2.13}$$

Y del tensor de deformaciones es:

$$\varepsilon^t = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6\} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}\}\tag{2.14}$$

Estos tensores se hayan relacionados entre sí, a través de las leyes constitutivas que dependen de la naturaleza del material. Al ser considerado el comportamiento como elástico lineal, cada componente del esfuerzo está

relacionada linealmente, con todas las deformaciones a través de la Ley de Hooke generalizada que tiene la forma:

$$\sigma = C_e \varepsilon \quad (2.15)$$

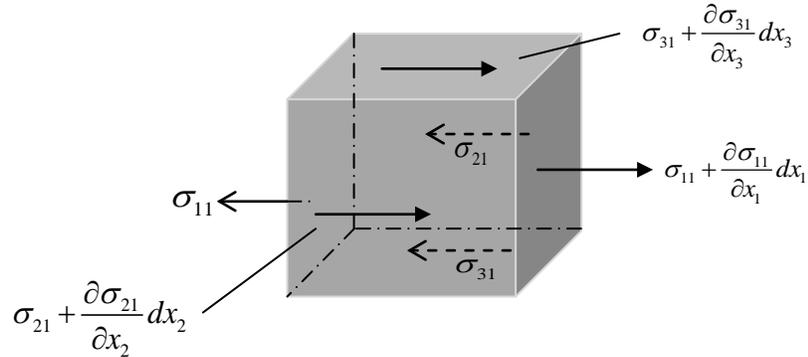


Figura 2.13. Estado de esfuerzos [113]

Donde los coeficientes  $C$  son las constantes elásticas del material, cuyos componentes son los coeficientes de elasticidad [114].

#### 2.3.4.6 Relación esfuerzo deformación

Las relaciones entre las componentes de esfuerzo y deformaciones, dependen del tipo de material. Al suponerse que el material de un cuerpo es lineal, elástico y homogéneo de allí que sus propiedades elásticas sean completamente identificadas a través de las siguientes constantes mutuamente independientes: módulo de Young  $E$  y relación de Poisson  $\nu$ . La linealidad implica que si el cuerpo se somete a un esfuerzo entonces la deformación en la dirección del mismo es directamente proporcional a los esfuerzos aplicados, esto significa que se cumple la Ley de Hooke. Si el tamaño y forma del cuerpo regresa exactamente a su estado original una vez que los esfuerzos se anulan, se dice que el cuerpo tiene un comportamiento perfectamente elástico. Finalmente, la homogeneidad significa que el material de un cuerpo está distribuido uniformemente a través del volumen del mismo y que las propiedades elásticas son las mismas en todos los puntos del cuerpo.

Esto quiere decir que para pequeñas deformaciones se puede suponer que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones, lo anterior es conocido como la ley de Hooke equivalente [101, 114, 115].

La generalización de estas ecuaciones en función de sus seis componentes del esfuerzo y las seis deformaciones en un punto del cuerpo queda expresado como:

$$\{\sigma\}=[C]\{\varepsilon\} \quad (2.16)$$

De forma explícita al expresar las deformaciones en función de los esfuerzos esto es del siguiente modo:

$$\{\varepsilon\}=[C]\{\sigma\} \quad (2.17)$$

De forma explícita es:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

O bien, invirtiendo ha  $C$ , se obtiene:

$$\{\sigma\}=[C]^{-1}\{\varepsilon\} \quad (2.19)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.20)$$

Ver ejemplo de aplicación de deformación en el Apéndice A, Método de las Rigideces.

### 2.3.5 Análisis de Esfuerzos

La razón práctica de conocer los esfuerzos que se ejercen en el interior de un miembro sometido a cargas, es predecir si dicho miembro va a deformarse excesivamente o a producir una fractura que se desarrolla brusca o progresivamente. El análisis de esfuerzos es un cálculo estático a través del cual se obtiene el estado de esfuerzos de un cuerpo considerado. Este análisis es independiente de las propiedades del material del cuerpo, que puede ser elástico, plástico, viscoso o cualquier otro tipo.

### 2.3.5.1 Definición de Esfuerzos

En general un cuerpo de materia continua puede estar sujeto a 2 tipos de fuerzas: fuerzas de volumen y fuerzas de superficie. Las fuerzas de volumen son producidas sin que exista ningún contacto físico con otros cuerpos. Ejemplos de este tipo de fuerzas son las gravitatorias, las magnéticas y las fuerzas internas. Por otro lado, las fuerzas de superficie son causadas por el contacto físico con otros cuerpos. Estas pueden ser fuerzas concentradas o no.

Los esfuerzos que se ejerce en el interior de un miembro sometido a cargas, deforman progresivamente o excesivamente a un sólido, hasta producir su fractura [113]. El análisis estructural como el diseño, requieren de la determinación de esfuerzos y deformaciones [116]. El esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área. En la Figura 2.14, se puede observar una fuerza externa  $p$  actuando sobre el sólido.

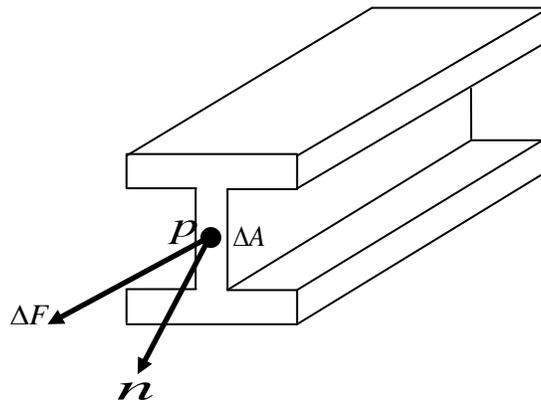


Figura 2.14. Esfuerzos en un punto [116].

En la mecánica de sólido, es de importancia determinar la intensidad de estas fuerzas, pues la resistencia a la deformación y a las fuerzas, depende de estas intensidades [117]. Un cuerpo debería de ser capaz de soportar la intensidad de una fuerza interna, de no ser así el cuerpo puede fracturarse o deformarse excesivamente [118].

Así mismo la fuerza necesaria para causar la fractura se le denomina carga última, ver Figura 2.10. Algunos materiales se corroen seriamente y otros se deforman plásticamente bajo una carga sostenida, fenómeno llamado flujo plástico, que con el paso del tiempo este fenómeno puede producir grandes deformaciones que no es posible tolerar [118]. Además uno puede asumir que la deformación plástica ocurre cuando el máximo esfuerzo cortante alcanza un cierto valor [101].

### 2.3.5.2 Esfuerzos axiales en armaduras de plataformas marinas

Las estructuras de plataformas marinas de tipo jactt son estructura formada por perfiles tubulares de acero conectados entres si, formando una armadura tipo tridimensional, a excepción las plataformas de gravedad. Las plataformas de armaduras tridimensionales, se hallan sometidos a esfuerzos axiales debido a las cargas actuantes en ella [103].

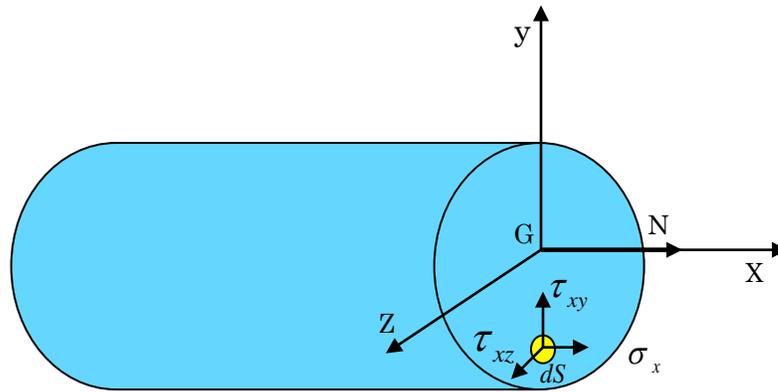


Figura 2.15. Esfuerzo axial [103]

$$\begin{aligned}
 N &= \int_S \sigma_x dS; \quad T_y = \int_S \tau_{xy} dS = 0; \quad T_z = \int_S \tau_{xz} dS = 0 \\
 M_t &= \int_S (\tau_{xz} y - \tau_{xy} z) dS \\
 M_y &= \int_S \sigma_x z dS = 0; \quad M_z = -\int_S \sigma_x y dS = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

Los perfil tubulares, se hallan sometidos a tracción o compresión cuando en sus secciones actúan los esfuerzos axiales, es decir, fuerzas normales a las secciones aplicadas en su respectivo centro de gravedad, en la Figura 2.15, se da a conocer dicho esfuerzo axial. Las consideraciones que se toman en cuenta son positivas cuando son esfuerzos axiales de atracción y negativas cuando son de compresión [103]:

### 2.3.5.3 Concentración de Esfuerzos en nodos de plataformas marinas

Siempre que ocurre la falla del material en una estructura, es casi seguro el fenómeno de concentración de esfuerzos, este término de concentración de

esfuerzo es aplicado a la condición en la que se produce altos esfuerzos en forma localizada como resultado de la geometría (forma) de la estructura, tales esfuerzos pueden ser determinados por las siguientes ecuaciones [119]:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx}(x, y) &= \frac{E}{ab(1 + \nu^2)} \left[ b(u_1 - u_3) + a\nu(u_2 - u_8) + x\nu(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8) + (-u_1 + u_3 - u_5 + u_7) \right] \\ \sigma_{yy}(x, y) &= \frac{E}{ab(1 + \nu^2)} \left[ b\nu(u_1 - u_3) + a(u_2 - u_8) + x(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8) + y\nu(-u_1 + u_3 - u_5 + u_7) \right] \quad (2.22) \\ \sigma_{xy}(x, y) &= \frac{E}{2ab(1 + \nu)} \left[ b(u_2 - u_4) + a(u_1 - u_7) + x(-u_1 + u_3 - u_5 + u_7) + y(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8) \right]\end{aligned}$$

### 2.3.5.4 Esfuerzos críticos

El esfuerzo critico, es considerado a través de la carga crítica que soporta el elemento en cuestión, siendo este el esfuerzo promedio de compresión sobre la sección transversal en el instante que la carga alcanza su valor crítico. Este esfuerzo, tiene la misma trayectoria de la función de esbeltez y la curva generada de Euler, como se observa en la Figura 2.16 [120].

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \quad (2.23)$$

En donde,  $L$  es la longitud del elemento en cuestión,  $r$  es el radio de giro de la sección transversal,  $E$  es el modulo de elasticidad y  $\sigma_{cr}$  es el esfuerzo critico, de acuerdo a la siguiente ecuación [120]

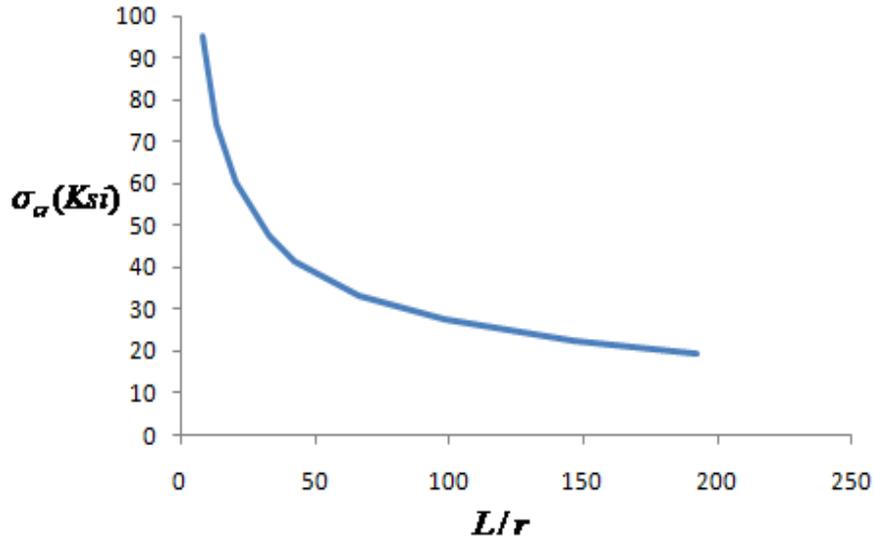


Figura 2.16. Gráfica de la curva de Euler [120]

La dispersión de datos en el rango elástico se puede ajustar para una ecuación de tipo.

$$\sigma_{cr} = \frac{K_c E}{D/t} \quad (2.24)$$

Donde  $D/t$  es la relación diámetro-espesor [121]. La constante  $K_c$  tiene un valor teórico 1.2 [122].

### 2.3.5.5 Esfuerzos residuales

La acumulación de esfuerzo o tensiones, provocan deformación y la pérdida de la estabilidad dimensional.

Una pequeña proporción del esfuerzo aplicado, quizás un 10%, se almacena en forma de esfuerzos residuales o esfuerzos internos, dentro de la estructura, en forma de dislocaciones. La presencia de dislocaciones aumenta la energía total de la estructura. Cuanto mayor sea la cantidad de trabajo en frío, mayor será la cantidad de energía interna del material [123].

Los esfuerzos residuales o esfuerzos remanentes son los que existe en un miembro de acero antes de la aplicación de las cargas externas, relacionándose con la deformación plástica que ocurre durante el proceso de fabricación, estos esfuerzos podrían deberse al enfriamiento desigual a temperatura ambiente de los perfiles después de laminarlos en caliente o soldarlos; también puede

deberse a operaciones como endurecimiento en frío mediante rotación o calibración; o puede derivarse de operaciones de fabricación, como corte con flama, curvado en frío.

### 2.3.5.6 Esfuerzos Críticos en Cilindros a Compresión

Considerando un cilindro sujeto a una carga de compresión axial P, la suposición siguiente se aplica

$$N_x = \frac{P}{2\pi r}, \quad N_{x\theta} = N_\theta = 0 \quad (2.25)$$

La introducción de estos valores en la ecuación 2.26

$$\nabla_w^8 = \frac{\nabla^4}{D} \left( N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{2}{r} N_{x\theta} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} N_\theta \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - \frac{Et}{Dr^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (2.26)$$

da como resultado

$$D\nabla^8 w + \frac{Et}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^4} + \frac{P}{2\pi r} \nabla^4 \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (2.27)$$

La solución de la ecuación (2.26) toma la forma de

$$w = \delta \left( \frac{\sin m\pi x}{L} \right) \sin n\theta \quad (2.28)$$

Donde m es el número de ondas de mitad en la dirección longitudinal y n es el número de ondas enteras en la dirección circunferencial para el esfuerzo crítico ( $\sigma_{cr}$ ).

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t}{L} \right)^2 \left[ \frac{m^2 + \bar{n}^2}{m^2} + \frac{12z^2}{\pi^4} \frac{m^2}{(m^2 + \bar{n}^2)^2} \right] \quad (2.29)$$

Donde z es el parámetro de Batdorf [124].

$$Z = \frac{L^2}{rt} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad (2.20)$$

y

$$\bar{n} = \frac{nL}{\pi r} \quad (2.31)$$

Para los cilindros de longitud intermedia, una estimación cercana de la carga crítica más pequeña puede ser obtenida por la minimización analítica de la ecuación (2.29) con respecto a

$$\left( \frac{m^2 + \bar{n}^2}{m} \right)^2 \quad (2.32)$$

Entonces,

$$\left( \frac{m^2 + \bar{n}^2}{m} \right)^2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi^2} Z \quad (2.33)$$

de la cual (2.29) se obtiene el esfuerzo crítico

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12} \left( \frac{t}{L} \right)^2 \frac{4\sqrt{3}}{\pi^2} \frac{L^2}{rt} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad (2.34)$$

Resolviendo la ecuación (2.34), se tiene que la ecuación del esfuerzo crítico (el cual ha sido mostrado para un cilindro razonablemente largo ( $L/R > 1$ )) está dada por [125].

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \frac{t}{r} \quad (2.35)$$

Para el módulo de Poisson  $\nu$  del acero es de 0.3, por lo que sustituyendo el valor en la ecuación (2.35), se tiene que el esfuerzo crítico es

$$\sigma_{cr} = 0.6 E \frac{t}{r} \quad (2.36)$$

Finalmente, dado que  $D=2r$ , por lo consiguiente

$$\sigma_{cr} = 2(0.6) E \frac{t}{D} = 1.2 \frac{Et}{D} \quad (2.37)$$

A partir de la ecuación de Donnell (ecuación (2.37) del esfuerzo crítico), se puede tomar como base para definir los esfuerzos por pandeo que presentan los elementos estructurales de la plataforma marina).

### **2.3.6 Teoría de la Plasticidad**

La teoría de plasticidad, se ocupa del cálculo de los esfuerzos y las deformaciones en un cuerpo en el cual se producen deformaciones permanentes como consecuencia de las cargas aplicadas. La teoría, se basa en observaciones experimentales del comportamiento de los materiales sometidos a estados de esfuerzos combinados. Los resultados observados son idealizados en formulaciones matemáticas para describir el comportamiento de materiales sujetos a esfuerzos complejos, la deformación que se produce en un sólido plástico se determina a partir de la historia completa de sollicitaciones.

En muchos procesos de trabajo con materiales se producen grandes deformaciones plásticas. Mientras que las deformaciones elásticas pueden ser ignoradas en estos casos, en el tratamiento teórico se debe considerar el cambio continuo en la geometría de la pieza. En numerosos problemas estructurales en los cuales las cargas son aumentadas más allá del límite elástico, se producen situaciones en las cuales las deformaciones elásticas y plásticas son similares en magnitud [126].

#### **2.3.6.1 Esfuerzo plástico**

La deformación plástica de los metales intriga a la humanidad por milenios, se fue aprendiendo empíricamente a utilizarlos en diferentes condiciones, sin embargo nadie sabía de que dependían sus propiedades hasta principios del siglo XX. Después de 1912 con el descubrimiento de Von Laue de la difracción de rayos X en los materiales cristalinos. Se entendió que dichos materiales están compuestos de átomos arreglados en redes geométricas tridimensionales. Conforme transcurrió el tiempo fue cada vez más claro que se requería desarrollar un nuevo concepto (radicalmente diferente) para explicar la deformación plástica y el endurecimiento por deformación a bajas temperaturas; Con el surgimiento del concepto de dislocación se pudo tener idea del comportamiento físico de dicha deformación plástica. En materiales sometidos a esfuerzos, primero se deforma elásticamente y posteriormente el esfuerzo aplicado de manera creciente, comienza a abombar las dislocaciones sujetas entre obstáculos naturales. Que en un material puro son otras dislocaciones. Esta deformación por abombamiento de las dislocaciones es inelástica [127].

Las características de un material que experimenta deformaciones unitarias inelásticas, más allá del límite elástico, se conocen como plasticidad, de modo que cuando un material presenta excedencia de deformación se dice que ha experimentado una deformación plástica [128,129]. La deformación plástica es descrita por la ecuación de Hollomon, en el comportamiento plástico de un acero al carbón, la ecuación es:

$$\sigma = \sigma_o \varepsilon^m \quad (2.38)$$

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo real;  $\sigma_o$  y  $m$  son el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente; y  $\varepsilon$  es la deformación real.

Las variables  $\sigma$  y  $\varepsilon$ , definen a cada uno de los puntos de la curva esfuerzo deformación real del material. El coeficiente  $\sigma_o$  es el esfuerzo real para producir una deformación real unitaria y el exponente es una medida de la capacidad de endurecimiento por deformación del material. De modo que la excedencia de desplazamiento, generalmente se le nombra como deformación plástica, y es denotado por:

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \frac{\sigma_c}{E} \quad (2.39)$$

Donde  $\varepsilon^p$ , representa la deformación plástica,  $\varepsilon$  la deformación elástica,  $\sigma_c$  el esfuerzo crítico y  $E$  la elasticidad del material.

Un material, que no tiene región plástica podría ser considerado un material ideal, mediante la región plástica se estudia y se analiza sus propiedades de tensión. Semejante a un material en tener una completa relación de tensión de esfuerzo que pueden ser caracterizados por dos líneas rectas de intersección, uno para la región elástica y uno para la región plástica [129, 1.30].

Tal material podría tener una curva similar a la primera etiqueta  $I$  de la Figura 2.17. Sin embargo más materiales de ingeniería tienen una curva de esfuerzo de tensión similar que se parece a la curva  $O$ . Solamente unos pocos materiales tienen similar esfuerzo de tensión a  $U$ . Los rasgos característicos de estos tipos de materiales es que aparece debajo de su esfuerzo de fluencia; siendo esto debajo de su valor ideal [130].

En contraste, las deformaciones plásticas son causadas en forma primaria por los esfuerzos cortantes [120].

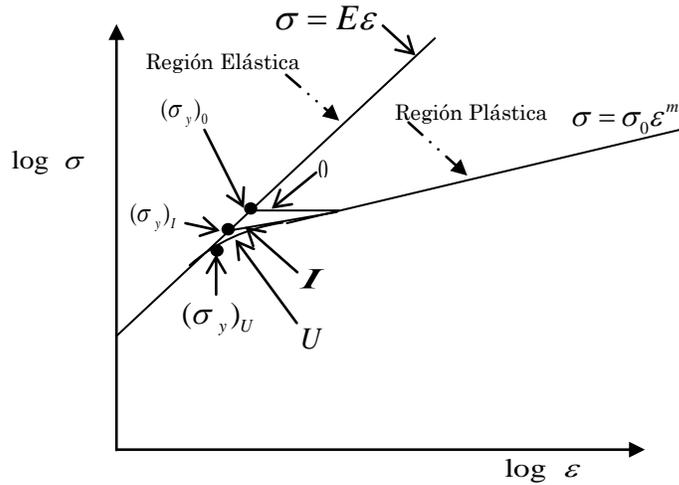


Figura 2.17. Representación esquemática de los tres tipos de curvas de esfuerzos. *I* Es la curva ideal y de *O* y *U* son dos tipos real de curva [130]

### 2.3.6.2 Criterio de Plastificación

El concepto de criterio de plastificación, sirve para generalizar el caso multiaxial la idea del límite elástico. La superficie de fluencia es el lugar geométrico de los puntos (en el espacio de tensiones) en que se considera que el material empezaría a plastificarse (ver Figura 2.17). Los criterios más usados para determinar la superficie de fluencia son Von Mises y el de Tresca, dado por la siguiente ecuación:

$$f(\sigma) = k \quad (2.40)$$

Donde  $k$  es un valor característico del material, cuyo valor puede evolucionar en función del endurecimiento acumulado en el proceso de deformación plástica. Y donde  $f(\sigma)$  sería el invariante cuadrático del tensor desviador de tensiones, en el caso de Von Mises, o la tensión tangencial máxima en el caso de Tresca. Ambos criterios establecen que las tensiones tangenciales principales deben alcanzar un cierto valor característico par que se produzca la plastificación; de modo que el vector de tensión viene dado por:

$$Q^2 = |\sigma|^2 = g_{ij} \sigma^i \sigma^j \quad (2.41)$$

Donde se usa el convenio de la suma de Einstein,  $g_{ij}$  son las componentes del tensor métrico del espacio y  $\sigma^i$  las componentes del vector de tensión  $\sigma$ .

Siendo que el vector de tensión  $\sigma$  el tensor de tensiones, por lo que el criterio de plastificación toma la forma de [131].

$$Q = |\sigma| = \sqrt{g_{ij}\sigma^i\sigma^j} = k \quad (2.42)$$

Cuando los metales son deformados elastoplasticamente, una fracción de la energía de deformación (aproximadamente 5%) es retenida internamente; el resto es disipado en forma de calor. La mayor proporción de esta energía almacenada lo es en forma de energía de deformación asociada con dislocaciones [131, 132, 133, 134].

### 2.3.6.3 Regla de Endurecimiento

La regla de endurecimiento describe la modificación de la superficie de fluencia conforme aumenta la deformación plástica. La forma más sencilla en la que la superficie de plastificación puede variar es simplemente aumentando su tamaño, sin cambiar de forma. En la ecuación (2.44) la variable  $k$  estaría en función de algún parámetro que mida la deformación plástica acumulada. Normalmente se utiliza como medida de la deformación plástica acumulada la longitud de la trayectoria de deformación plástica. De modo que la longitud de la trayectoria de deformación plástica, llamada en la literatura deformación plástica total equivalente se calculara de la siguiente forma [135, 136]:

$$\lambda = \int \sqrt{d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p} \quad (2.43)$$

Donde la integral se toma a lo largo de la trayectoria de deformación. Entonces la regla de endurecimiento se escribe

$$f(\sigma) = k\lambda \quad (2.44)$$

### 2.3.6.4 Articulación plástica y mecanismo de colapso plástico

De acuerdo a la teoría plástica, el momento flexionante máximo que puede soportar una viga es el momento plástico resistente total del miembro  $M_p$ . Cuando se ha alcanzado este valor del momento flexionante, la curvatura de la viga en esta sección puede crecer indefinidamente mientras que el momento flexionante se conserva constante en el valor  $M_p$ . La viga se comporta articulada en la sección plástica y se dice que existe una articulación plástica en la viga, en la Figura 2.18 se da a conocer dicha articulación plástica [137, 138].

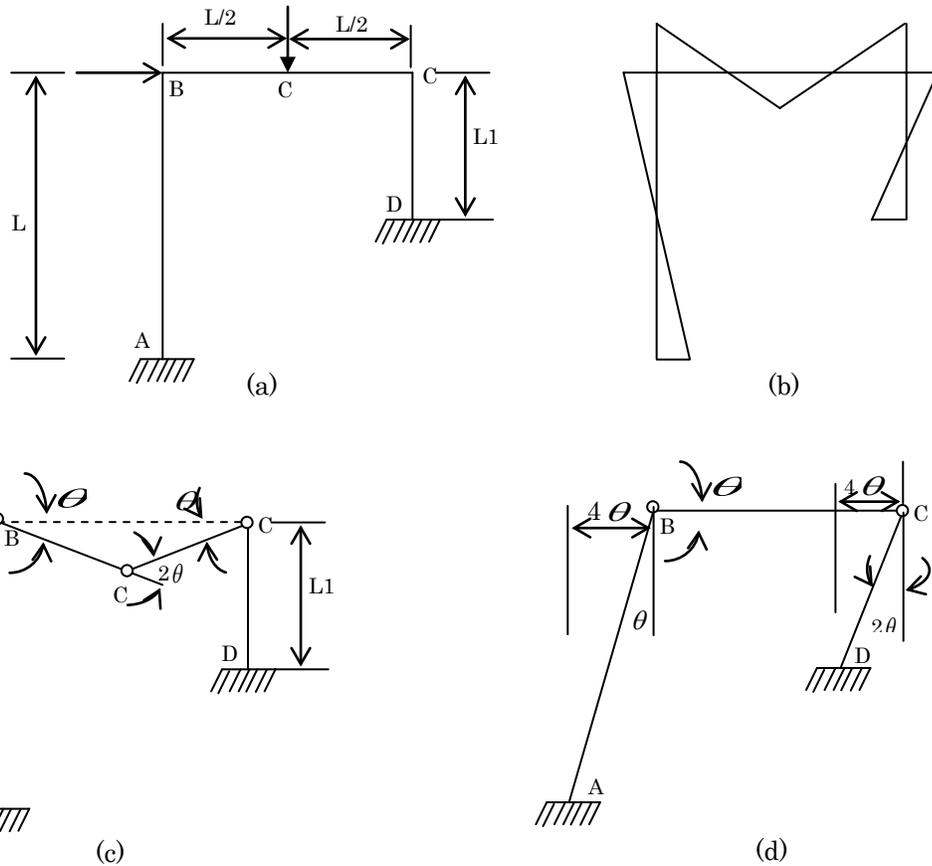


Figura 2.18. Mecanismo de colapso para el marco [139]

Si la carga es tal que produce un momento flexionante a la mitad del claro de la viga igual al momento plástico resistente total de la sección  $M_p$ , entonces existe una articulación plástica bajo la carga y la viga se comportara como un mecanismo. La carga aplicada que produce esta condición es la carga de “colapso”  $W_c$ . Ya que la viga se encuentra a punto de colapso y no acepta ningún incremento de carga.

### 2.3.6.5 Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas

Los elementos estructurales y procesos de conformado de metales, alcanzan deformaciones superiores al esfuerzo de fluencia y para ello es necesario conocer los parámetros de la expresión matemática que describen la fluencia del mismo; el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación y del endurecimiento que experimenta el acero, es de suma importancia en diferentes aspectos del estudio elástico-plástico, debido a la zona plástica de la curva que depende de los parámetros que predicen los mecanismos de deformación del material [140, 141, 142, 143]. Así mismo, en cualquier lugar

donde halla concentración de esfuerzos, resultarán deformaciones plásticas locales como una relajación de los esfuerzos, es por ello que la concentración de esfuerzos debe descubrirse y reducirse todo lo posible; la concentración de esfuerzos puede dar un punto de partida para una grieta, con resultados catastróficos, además que la conexión tubular de estructuras costa fuera están sujetos a fatiga. Las discontinuadas físicas del esfuerzo están representadas por los cambios discontinuos de la función de esfuerzos en la superficies de nodos estructurales [144], como se ve en la Figura 2.19, el esfuerzo por tensión aunado a los parámetros geométricos del nodo estructural K-T [145, 146].

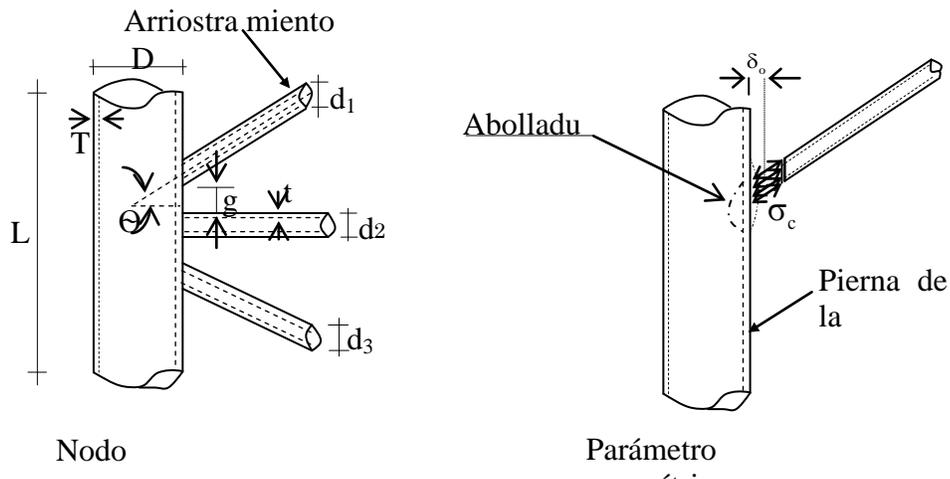


Fig. 2.19. Junta estructural tipo K-T [147, 148]

Por lo que la relación de dimensiones entre las diagonales o montantes (arriostramiento) y el cordón de soldadura correspondiente esta dado por los siguientes parámetros geométricos.

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3D} \quad (2.45)$$

$$\tau = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{T} \quad (2.46)$$

La separación (g) entre elementos tubulares, esta dado por lo siguiente:

$$g \geq t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.47)$$

Los esfuerzos se obtienen de:

$$\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad \sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad (2.48)$$

Introduciendo el radio de curvatura debido a la fuerza de compresión y la relación  $\beta$ , se tiene:

$$\frac{1}{R} = \frac{4(1-\nu^2)\sigma_c}{\pi E \beta} \quad (2.49)$$

$$\sigma_c = \frac{\pi E \beta}{\frac{D}{2} 4(1-\nu^2)} \quad (2.50)$$

La excedencia de desplazamiento, generalmente se le nombra como deformación plástica, y se denota por:

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \frac{\sigma_c}{E} \quad (2.51)$$

Tenemos que la deformación plástica en la superficie de contacto del arriostramiento esta dado por:

$$\varepsilon^p = \frac{\Delta \sigma_c}{E} \left( \frac{t^2}{2} \right) - \frac{\frac{\pi E \beta}{\frac{D}{2} (1-\nu^2)}}{E} \quad (2.52)$$

### 2.3.7 Esfuerzo Térmicos

Cuando un material se calienta tiende a expandirse y luego que se enfría tiende a contraerse. Si se permite, que las deformaciones térmicas ocurran sin restricción, no se producirían esfuerzos. Estos esfuerzos se llaman esfuerzos térmicos, de modo que la transferencia de energía de disipación ocurre a través del nodo.

Aunado a esto, la termofluencia es un fenómeno de la deformación plástica que ocurre en materiales de forma irreversible, haciéndole al material adquirir nuevas propiedades [120], de modo que cuando a los materiales se les imponen cargas durante periodos largos, desarrollan deformaciones unitarias adicionales y se dice que presentan termofluencia. Este fenómeno se manifiesta de diversas maneras, al cargarse una barra mediante una fuerza  $P$  produce un alargamiento  $\delta_0$  como se muestra en la Figura 2.19a, este alargamiento se

manifiesta en un intervalo de tiempo  $t_o$  como se nota en la Figura 2.20a, después del tiempo  $t_o$  la carga permanece constante. Otro modo de termofluencia es cuando un alambre es sometido a tensión, tal que tiene un esfuerzo de tensión inicial  $\sigma_o$ , con el paso del tiempo el esfuerzo en el alambre disminuye de manera gradual y termina alcanzando un valor constante, a este proceso se le nombre relajación del material ver Figura 2.20b [121].

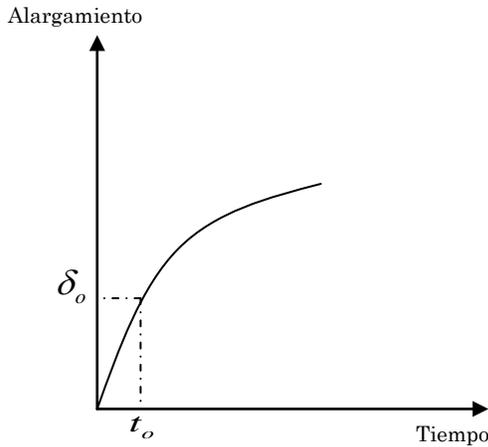


Figura 2.20a. Termofluencia de una barra [121]

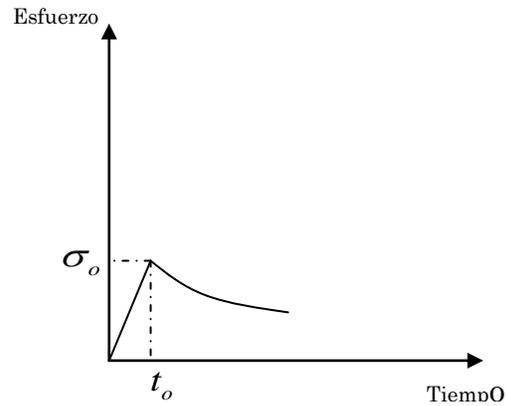


Figura 2.20b. Relajación de esfuerzo [121]

Las deformaciones inducidas térmicamente, pueden ocurrir en falla por fatiga. La deformación por termofluencia debido a tensión, puede definir una viscosidad a tensión como:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}} \tag{2.53}$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad de corte,  $\sigma$  es el esfuerzo de tensión y  $\dot{\varepsilon}$  razón de cambio de deformación por tensión [136]. Las fuentes energéticas del crecimiento, en condiciones de termofluencia, están asociadas al esfuerzo de tensión [137]. El movimiento de las moléculas en los sólidos amorfos (termofluencia viscosa) constituye un proceso de difusión favorecido por el incremento de la temperatura del que se le conoce como un proceso activado térmicamente y, está dada por la siguiente ecuación de Arrhenius.

$$\dot{\varepsilon} = A e^{\frac{-Q}{RT}} \tag{2.54}$$

En cuanto se aplica la carga de esfuerzo de tensión, el material se deforma elásticamente en pequeña cantidad, como se observa en la Figura 2.21 [149, 150]. Siendo que la rapidez de la termofluencia esta dado por:

$$\text{Rapidez de termofluencia} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} \quad (2.55)$$

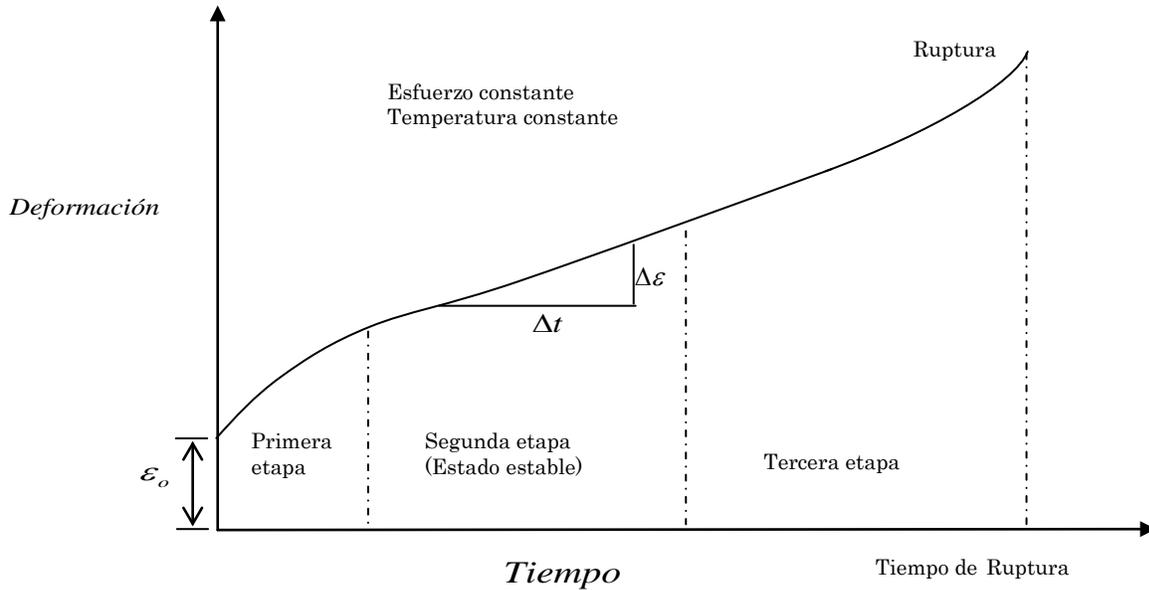


Figura 2.21. Curva típica de deformación producida en función de tiempo para esfuerzo y temperatura constante [150]

Cuando se estudia el comportamiento de fluencia de los materiales metálicos, una de las ecuaciones más utilizadas, es la ecuación de Garofalo, que posibilita prever el comportamiento del material en un amplio rango de temperaturas, velocidades generalizadas de deformación y tensiones.

$$\varepsilon = A' [\sinh(\alpha \sigma)]^n e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (2.56)$$

Siendo  $A''$  (área de números de átomos) una constante del material y  $\alpha$  la tensión inversa que marca el cambio de comportamiento de potencial a exponencial,  $\sigma$  es el esfuerzo de tensión [151]. Los valores del exponente  $n$  son próximos a 5, que es el valor correspondiente a una deformación regida por el movimiento de dislocaciones [152, 153].

### 2.3.7.1 Deformación elástica, plástica y térmica (EPT) en nodos estructurales tubulares

Se ha hallado que la zona con mayores esfuerzos son las conexiones, dicho en otro modo que las fuerzas y cargas al que se halla sometida dicha estructura costa fuera repercutirá en los nodos [154, 155].

La deformación elastoplástica, se debe al movimiento de un gran número de átomos en respuesta a la tensión aplicada, correspondiente al movimiento de dislocaciones, a este movimiento se le denomina deslizamiento, las dislocaciones son importantes con respecto a las propiedades mecánicas de los metales.

Los defectos internos e irregularidades superficiales en los nodos, tales como ralladuras y muescas, actúan como concentradores de tensiones, facilitando así la formación de dislocaciones durante la deformación elastoplástica. [156]

La elastoplasticatermica (EPT), es cuando un material es sometido a cargas que exceden su elasticidad y después de retirar la carga aplicada no regresa a su forma original, debido a que un sólido cuando es deformado aumenta su energía interna, este aumento de energía en el material ocasiona cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica. [157, 158, 159].

Al suponerse, que el sólido sufre un cambio térmico a partir de un estado indeformado libre de tensiones. Considerando el estado correspondiente, en el contexto del método de elemento finito. Sea el cambio térmico definido, a partir de los cambios de temperatura en cada nodo  $\Delta t^l$ . Dentro de cada elemento se puede suponer la siguiente variación de temperatura.

$$\Delta t(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n \phi^l \Delta t^l \quad (2.57)$$

Suponiendo un estado inicial de bloqueo esto da lugar a un estado inicial de deformaciones restringidas de valor

$$\varepsilon_{ii}^0 = -\alpha \Delta t \quad (2.58)$$

Y a un estado de esfuerzo en tensión de bloqueo no equilibrado

$$\sigma_{ii}^0 = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} \quad (2.59)$$

$$\sigma^0 = \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^0 \\ \sigma_{22}^0 \\ \sigma_{33}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma_{nn}^0 \end{Bmatrix} = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n \end{Bmatrix} \quad (2.60)$$

El estado de tensión completo, resulta de sumar este estado inicial más las tensiones debido a las deformaciones calculadas a partir de los desplazamientos

$$\sigma = \sigma^0 + C\varepsilon \quad (2.61)$$

Para un estado plano de de tensión, hay que liberar entonces la deformación en la dirección  $x_n$ , de tal forma anular la tensión  $\sigma_{nn}^0$ :

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{Bmatrix} = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} + \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} \quad (2.62)$$

La energía interna de deformación, de un elemento resulta en este caso:

$$W_e = h \int_A \left( \frac{1}{2} \varepsilon^T C \varepsilon - \frac{E\alpha\Delta t}{(1-\nu)} \varepsilon^T \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \right) dA \quad (2.63)$$

En donde el primer termino de la integral, es la energía interna de deformación y el segundo termino corresponde a los esfuerzo de tensiones iníciales. Reemplazado  $\varepsilon^T$  por la siguiente ecuación:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} -b^1 & b^2 & -b^3 \\ a^1 & a^2 & a^3 \\ a^1 & b^1 & a^2 b^2 & a^3 & -b^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_2^2 \\ u_1^3 \\ u_2^3 \end{Bmatrix} \quad (2.64)$$

Siendo  $u$ , el campo de desplazamiento, al ser reemplazado  $\varepsilon^T$  por la ecuación anterior se nota que en la integral el único término que no es constante es  $\Delta t$  de la cual resulta

$$\int_A \Delta t dA = \int_A (\xi^1 \Delta t^1 + \xi^2 \Delta t^2, \dots, \xi^n \Delta t^n) dA \quad (2.65)$$

$$\frac{A}{n} (\Delta t^1 + \Delta t^2, \dots, \Delta t^n) = A \Delta t^M$$

Donde hemos definido, el cambio térmico medio dentro del elemento como

$$\Delta t^M = (\Delta t^1 + \Delta t^2 + \Delta t^3, \dots, \Delta t^n) \quad (2.66)$$

Por lo que, la matriz de rigidez elemental esta dado por

$$K_e = \frac{h}{4A} \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} -b^1 & a^1 \\ & a^1 & -b^1 \\ -b^2 & a^2 \\ & a^2 & -b^2 \\ -b^3 & a^3 \\ & a^3 & -b^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (2.67)$$

En donde  $h$ , es el espesor del cilindro y además que los desplazamientos están dado por

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\xi) & 0 & \xi & 0 \\ 0 & (1-\xi) & 0 & \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_1^2 \\ u_2^2 \end{bmatrix} \quad (2.68)$$

Donde  $L1$  es la longitud del primer tramo  $L1 = x1 - x2$ , y la coordenada  $x$  se mide desde el extremo izquierdo del tramo. Por lo que es denominando por,  $\xi = (x1/x2)/L1$  con  $\xi = [0,1]$

Reemplazando en la expresión (2.63), de la energía interna de deformación se tiene finamente:

$$W_e = \frac{h}{2} u_e^T B^T C B u_e \int_A dA - \frac{Eh\alpha}{(1-\nu)} u_e^T B^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \int_A \Delta t dA \quad (2.69)$$

$$W_e = \frac{1}{2} u_e^T u_e K_e - u_e^T \begin{bmatrix} -b^1 \\ a^1 \\ -b^2 \\ a^2 \\ -b^3 \\ a^3 \end{bmatrix} \frac{Eh\alpha\Delta t^M}{2(1-\nu)} \quad (2.70)$$

Se distingue, por un lado la energía interna de deformación debida al incremento de tensiones, que resulta en una forma cuadrática idéntica al caso sin cambios térmicos, y por otro lado una energía interna de deformación proveniente de las tensiones iniciales, que resulta lineal en los desplazamientos. Al derivar, la energía interna de deformación para obtener las ecuaciones de equilibrio, el segundo término, al ser lineal pasará a formar parte del término independiente como si fuese una carga a equilibrar. Notar que la suma de las componentes de este vector de pseudo-cargas es cero en ambas direcciones.

Así mismo, muchas dislocaciones ascienden venciendo obstáculos, se deslizan y contribuyen a la deformación. La rapidez con que las dislocaciones esquivan obstáculos es igual a la velocidad que las dislocaciones son bloqueadas por otras imperfecciones; llevando a una segunda etapa, de termofluencia en estado estable, la pendiente de la porción estable de la curva de termofluencia es la rapidez de termofluencia  $R_d$  en relación al incremento de deformación  $\Delta_d$  y el incremento del tiempo  $\Delta t$  [160].

$$R_d = \frac{\Delta_d}{\Delta_t} \quad (2.71)$$

Tomando en cuenta la deformación plástica, se tiene que la energía interna de deformación debido a la excitación de la carga lleva a tener una deformación elastoplásticatérmica en los nodos tipo K-T como se muestra en la Figura 2.22.

$$\varepsilon^{EPT} = \left( \left( -\frac{\Delta\sigma_c t^2}{E} \right) - \frac{\frac{\pi E \beta}{2} 4(1-\nu^2)}{E} \right) \frac{Et\alpha\Delta T^M}{2(1-\nu)} \quad (2.72)$$

En donde:

$\sigma_c$  = Esfuerzo crítico en kg/cm<sup>2</sup>

E = Módulo de elasticidad del acero, 2.1 x 10<sup>6</sup> kg/cm<sup>2</sup>

t = Espesor del cilindro en cm

D = Diámetro del cilindro en cm

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3D}$  = Parámetro geométrico de la sección

$\Delta T^M$  = Cambio térmico medio en Kelvin

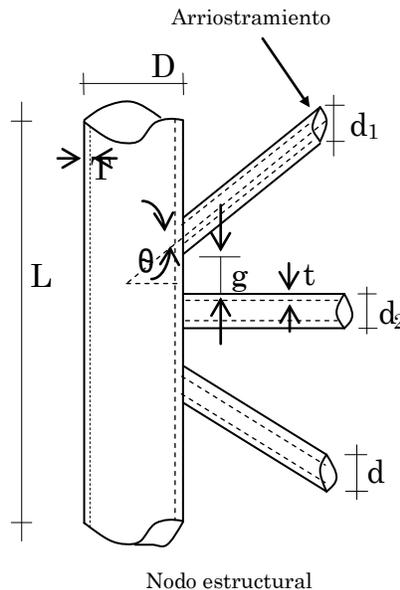


Figura 2.22. Junta estructural tipo K-T [161, 162]

### 2.3.7.2 Fatiga

Los elementos estructurales están frecuentemente sujetos a cargas repetitivas sobre un largo periodo de tiempo. La fatiga depende fundamentalmente de la variación del esfuerzo. Muchas repeticiones de un

ciclo de carga pueden ocasionar fractura del material aunque el valor máximo del esfuerzo este por debajo del esfuerzo ultimo, ver Figura 2.10. Esta falla se le denomina falla por fatiga. Inicialmente se produce micro fractura en un punto de esfuerzo elevado. La fractura se propaga bajo la acción de las cargas fluctuante hasta que el material sea insuficiente de soportar las cargas. La falla o ruptura por fatiga se explica mediante la teoría de los esfuerzos localizados basados en la concentración de esfuerzos que se producen en el interior del material, debido a discontinuidades en su estructura interna o bien en la superficie debido a cambios bruscos de la sección, como se muestra en la Figura 2.23 [163, 164, 165].

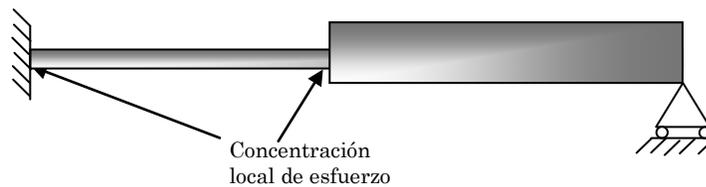


Figura 2.23. Concentración de esfuerzo [163]

La concentración de esfuerzos no son demasiados peligrosos cuando un material dúctil es sometido a esfuerzos estáticos, pero cuando la carga se aplica de forma alternada o repetida, Figura 2.24, se producen grietas microscópicas que crecen a cada aplicación hasta que el elemento estructural se fracture bruscamente.

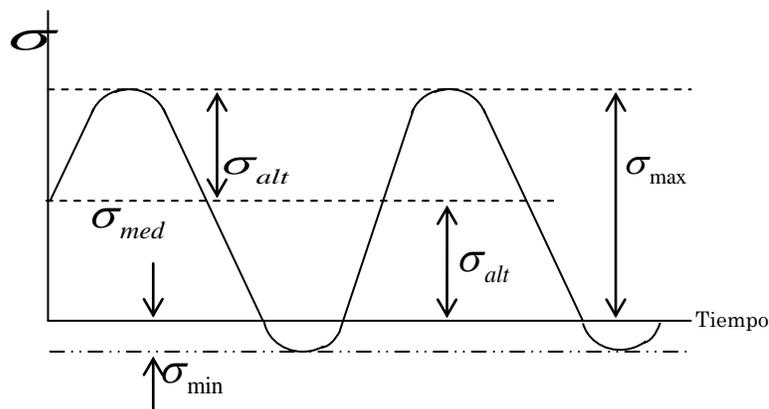


Figura 2.24. Alternando esfuerzo por fatiga [163]

### 2.3.7.3 Concentración de esfuerzos

El concepto de concentración de esfuerzo, se refiere al estado macroscópico de esfuerzos, y tiene un significado único para problemas en el plano que involucran la definición de esfuerzo promedio. Las discontinuidades se les denominan elevadores de esfuerzos. La concentración de esfuerzos aparecen también en los puntos de carga, ver Figura 2.25.

Los esfuerzos que existen en las concentraciones de esfuerzos pueden establecerse por métodos experimentales o métodos avanzados de análisis, incluidos el método del elemento finito [131, 136, 138, 140].

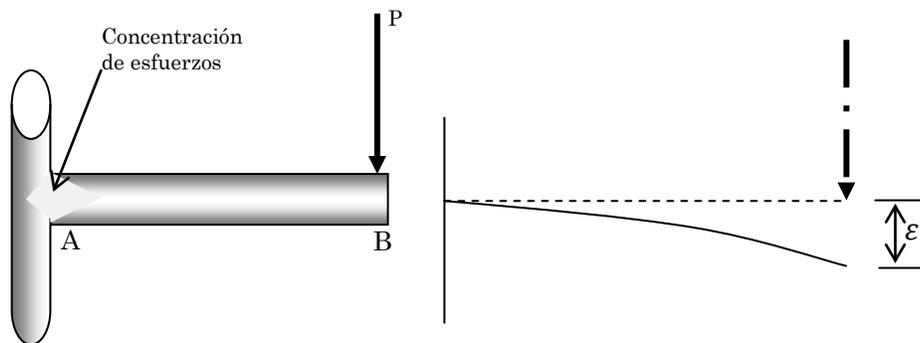


Figura 2.25. Concentración de esfuerzos en nodos [131]

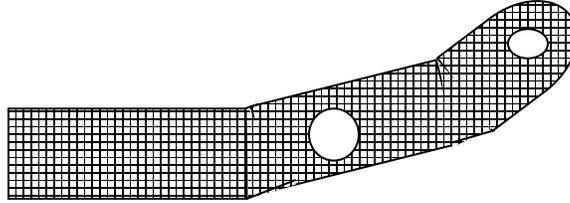
### 2.3.8 Elemento Finito (EF)

El método del elemento finito (MEF), es una herramienta muy poderosa en la solución numérica de problemas de ingeniería. Las aplicaciones van, desde el análisis por deformaciones y los esfuerzos de todos los tipos de estructuras y del análisis de los campos de flujo de calor, de fluidos, magnético, filtraciones y hasta otros problemas de flujo, además cuya área donde se originó el método del elemento finito es en el sólido y estructuras bajo el enfoque de la energía potencial y de Galerkin.

#### 2.3.8.1 Discretización del continuo

La solución de problemas continuos es dividida en subdominios simples llamados elementos, ver Figura 2.26. En problemas de dimensiones el dominio se divide en triángulos o paralelogramos de lados rectos, o bien triángulos o cuadriláteros de lados curvos y en problemas de tres dimensiones el dominio es

discretizado con elemento de forma de tetraedros, cubos, o elementos con superficie curva, los puntos marcados en cada elemento se le denomina nodos.



*Figura 2.26.* Discretización del continuo

### 2.3.8.2 Funciones de forma

Para cada elemento se selecciona una aproximación de la función. La función buscada puede ser los esfuerzos en nodos estructurales, campos de desplazamientos en elasticidad y deformaciones, solo los valores de la función en nodos,  $u_i^e$ , son tomados como variables, la aproximación para el elemento bidimensional  $e$  con  $n$  nodos tiene la forma:

$$u^e(x, y) = \sum_{i=1}^n u_i^e N_i^{(e)}(x, y) \quad (2.73)$$

Donde  $n$  es el número de nodos en el elemento.

### 2.3.8.3 Ensamble y solución

El MEF utiliza la formulación variacional del problema, esto es, una expresión matemática equivalente a la ecuación diferencial que gobierna el problema. Al sustituir la ecuación (22) en la formulación variacional, obtenemos un sistema lineal de ecuaciones de la forma:

$$[K^e] \{u^e\} = \{b^e\} \quad (2.74)$$

Donde  $[K]$  es la matriz de rigidez y  $\{b\}$  es el vector de fuerzas; el vector de incógnitas  $\{u\}$  son las variables nodales y contienen el valor de la función en los puntos nodales (esfuerzos, desplazamientos, etc.).

$$\begin{bmatrix} K_{11}^{(1)} & K_{12}^{(1)} & 0 \\ K_{12}^{(1)} & K_{22}^{(1)} + K_{11}^{(2)} & K_{12}^{(2)} \\ 0 & K_{21}^{(2)} & K_{22}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{Bmatrix} \quad (2.75)$$

En el Apéndice B, se halla una aplicación completa del método del elemento finito, a un marco estructural [119, 166, 167, 168, 169]

## 2.4 Teoría de seguridad estructural

El estudio de la seguridad estructural puede ser realizado mediante el análisis de diversos aspectos que afectan la estabilidad de las estructuras. Entre estos aspectos se encuentran: la acumulación de microdefectos en los materiales, la propagación de grietas macroscópicas, la aceleración en el colapso debido al efecto de localización de deformaciones, las inestabilidades geométricas como el pandeo en vigas, placas y sólidos tridimensionales, los efectos de la fatiga mecánica, etc. Para el estudio de los aspectos antes mencionados se hace uso de las disciplina tales como la teoría de elasticidad y plasticidad, la mecánica de la fractura, la teoría de daño, la teoría de localización, la mecánica computacional y las deformaciones térmicas, entre otras, misma que durante muchos años se ha asumido en el diseño de sistemas estructurales que todas las cargas y fuerzas son deterministas. Los esfuerzos de un elemento son determinados a manera de exceder la carga con un cierto margen. El radio entre el esfuerzo y la carga es denotado por el factor de seguridad. Siendo este número considerado como una medida de la confiabilidad de la estructura. En los códigos prácticos para evaluar las cargas de los sistemas estructurales, esfuerzo y los factores de seguridad están prescritos. [120]

La seguridad, como preocupación de diseño tiene precedencia sobre todas las otras consideraciones de diseño. La "seguridad" de cualquier estructura depende, naturalmente, de las cargas subsiguientes.

En el desarrollo histórico de la ingeniería y en particular de la estructura se han utilizado distintos métodos de diseño, donde han cambiado en lo fundamental la forma de introducir la seguridad en el mismo, siendo los siguientes [170]:

- Método de Esfuerzos Permisibles. (ASD)
- Método del diseño Plástico.
- Método de Diseño por Factor de Carga y Resistencia. (LRFD)

Hasta hace algunos años las estructuras de acero se diseñaban en México y Estados Unidos casi exclusivamente por Método de Esfuerzos Permisibles o

ASD (Allowable Stress Design). Este criterio de diseño establece que los esfuerzos actuantes, calculados a partir de combinaciones de las fuerzas internas máximas (cargas axiales, momentos, cortantes, etc.), no deben exceder a un cierto esfuerzo permisible para poder lograr una seguridad estructural adecuada de un miembro. Este método ASD fue el único método de diseño avalado por las especificaciones del AISI (American Iron and Steel Institute) desde 1946 a 1986.

Por otro lado, las especificaciones del AISC (American Institute of Steel Construction) para perfiles laminados en caliente incorporaron hace ya más de dos décadas un criterio alternativo a ASD conocido como Diseño Plástico. Sin embargo, este criterio no tuvo mucha aceptación entre los diseñadores, ya que no producía diseños más económicos que los obtenidos por ASD y se complicaba considerablemente el análisis estructural. Sin embargo, resultó ser un avance considerable desde el punto de vista racional, ya que permitió incorporar por primera vez de manera explícita el comportamiento inelástico de las estructuras en las ecuaciones de diseño. El AISI consideró innecesario incorporar el Diseño Plástico a sus especificaciones, debido que la gran mayoría de los perfiles laminados en frío son de pared delgada, rara vez alcanzan a desarrollar la plastificación de sus secciones, ya que fallan normalmente primero por inestabilidad.

El ASD asume un comportamiento elástico bajo cargas y aparentemente desprecia la capacidad de reserva inelástica del acero, aunque en realidad cuando el caso así lo requiere, la capacidad de reserva inelástica ha sido incorporada de manera implícita en las ecuaciones de diseño de ASD. Además, los factores de seguridad de ASD tienen orígenes empíricos y son universales. O sea, para una condición de diseño dada, el factor de seguridad es el mismo siempre, independientemente del tipo de carga aplicada, la siguiente ecuación describe tal método.

$$R_a = \frac{R_n}{f_s} \quad (2.76)$$

Donde:

$R_a$  = Resistencia Permissible de Diseño.

$R_n$  = Resistencia Nominal.

$f$  = Factor de Seguridad.

El objetivo del factor de seguridad es el de compensar por las incertidumbres inherentes en los valores de las propiedades mecánicas y geométricas de los elementos estructurales, en la precisión de los modelos teóricos y/o experimentales que describen la resistencia nominal, así como en la estimación

de valores y distribución de las cargas aplicadas. Los valores de los factores de seguridad para las diversas resistencias requeridas se encuentran prescritos en las especificaciones de diseño. La experiencia dicta que el uso de dichos factores de seguridad resulta en diseños satisfactorios.

De acuerdo al AISI, un diseño satisface los requisitos de la especificación cuando el valor de la resistencia permisible,  $R_a$ , de cada componente estructural es mayor o igual a la resistencia requerida,  $R$ , determinada en base a las cargas nominales, para todas las combinaciones de carga aplicables, esto es,

$$R_a \geq R \quad (2.77)$$

En 1978, se sentaron las bases de un nuevo criterio de diseño denominado Diseño por Factor de Carga y Resistencia o LRFD (Load and Resistance Factor Design). En esencia, LRFD es muy parecido conceptualmente al Diseño por Resistencia Última incorporado en las especificaciones del Instituto Americano del Concreto o ACI (por sus siglas del inglés: “American Concrete Institute”) para el diseño de estructuras de concreto reforzado. En LRFD se abandona el concepto del cálculo de esfuerzos actuantes y se substituye por el cálculo de resistencias nominales (cargas axiales, momentos, cortantes). Los factores de seguridad desaparecen dando paso a los factores de carga y de resistencia. En LRFD la seguridad estructural se comprueba al lograr que las resistencias actuantes debidas a las combinaciones de cargas gobernantes (amplificadas por los factores de carga correspondientes) sean menores o iguales a las resistencias nominales (reducidas por los factores de resistencia correspondientes).

El método LRFD está basado en el criterio de estados límites, de hecho, a éste método se le conoce también como método de diseño por estados límites o LSD (Limit States Design). Un estado límite define la condición ante la cual un elemento o miembro estructural bajo carga se ve afectado a tal grado que deja de ser seguro para los ocupantes de la estructura. El método LRFD establece dos tipos de estados límites:

1. Estados Límites de Resistencia: Define el alcance de la resistencia de un elemento estructural bajo cargas extremas.
2. Estados Límites de Servicio: Define el alcance del límite de la habilidad de un elemento estructural a desarrollar la función para la cual fue diseñado.

El método LRFD emplea diversos factores de carga y de resistencia que logran un refinamiento en el diseño al tomar en cuenta los diversos grados de incertidumbre y variabilidad en las propiedades de los materiales, en la estimación de cargas y en los procedimientos de análisis. La ecuación

fundamental del método LRFD que define el estado límite de resistencia y que satisface los requisitos de seguridad estructural de las especificaciones del AISI es la siguiente:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (2.78)$$

Donde:

$R_n$  = Resistencia nominal

$Q_i$  = Efectos de carga

$\phi$  = Factor de resistencia correspondiente a  $R_n$

$\gamma_i$  = Factor de carga correspondiente a  $Q_i$

$\phi R_n$  = Resistencia de diseño

$\sum \gamma_i Q_i$  = Resistencia requerida para las cargas factorizadas

La resistencia nominal  $R_n$  es la resistencia de un elemento o miembro para un estado límite dado, El factor de resistencia  $\phi$  toma en cuenta la incertidumbre y variabilidad inherente en  $R_n$  y es usualmente menor que la unidad. Los efectos de carga  $Q_i$  son los elementos mecánicos (momentos flexionantes, fuerzas axiales y cortantes) determinados a partir de las cargas nominales mediante procedimientos conocidos del análisis estructural y  $\gamma_i$  son los factores de carga correspondientes que toman en cuenta la incertidumbre y variabilidad inherente en la estimación de las cargas y/o sus efectos.

La seguridad estructural se comprueba al comparar resistencias nominales  $R$  con los efectos de cargas nominales  $Q$  y constatar que  $R \geq Q$ ; un estado límite se alcanza sí  $R = Q$ . Por consiguiente, si  $R$  y  $Q$  son variables deterministas, es decir si su valor puede ser establecido con precisión en cualquier momento, el problema de la seguridad estructural se resuelve al establecer un valor para  $R$  solo ligeramente mayor que  $Q$ , evitando así alcanzar un estado límite.

No obstante, consecuencia de las incertidumbres existentes en todas las construcciones no existe estructura que sea absolutamente segura. Siempre es posible la presencia de lluvias torrenciales, nevadas excepcionales, vientos huracanados o sismos que generan cargas superiores a las previstas. Por otro lado las propiedades resistentes adjudicadas a la estructura pueden desviarse de las pronosticadas por las causas siguientes:

- Características resistentes diferentes a las previstas.
- Dimensiones reales de las piezas no ajustadas suficientemente a las teóricas.
- Deterioro de la estructura debido a cargas repetidas.
- Corrosiones
- Inadecuado control de calidad
- Análisis de la estructura no ajustado debidamente a su comportamiento.
- Errores e imperfecciones de los trabajos realizados en taller y en el montaje.

De lo anterior se desprende que tanto las sollicitaciones que provocan las cargas, con valores a partir de los cuales se presentan las fallas de la estructura en conjunto o en algunas de sus partes, y que, en definitiva, se asocian a la capacidades límites resistentes [171, 172, 173]. De modo que las fallas que se presentan en las plataforma marinas se generan de dos tipos, las de a nivel global, y se distinguen en: insuficiencia de la capacidad de carga de la cimentación, colapso por formación de articulaciones plásticas; y las de a nivel local se conocen como: Fluencia excesiva en tensión o compresión, inestabilidad elástica del elemento estructural, penetración en juntas u uniones, pandeo local, fatiga y colapso hidrostático [174, 175].

# CAPITULO III. METODOLOGIA DE INVESTIGACION

---

---

## 3.1 Justificación del modelo y Metodología

Se ha planteado en el **CAPITULO 2**, y especialmente en las secciones 2.3 y 2.4, las teoría de estructuras (mecánica de las estructuras) y teoría de seguridad estructural, que han sido estrechamente entrelazado con la resistencia de materiales misma que es un gran aporte a la ciencia que más tarde se le llamara “resistencia de materiales”, misma que constituye la integridad estructural.

La teoría de la resistencia de materiales y del cálculo de estructuras es hoy una teoría altamente elaborada, contrastada experimentalmente en sus aplicaciones, con un alto nivel de coherencia interna, y de gran utilidad práctica.

En su formulación se utilizan expresiones formales (matemáticas) que ligan entre sí gran número de términos teóricos, unos correspondientes a comportamientos observables experimentalmente, otros sólo determinables a través de los efectos que, siempre según la teoría, pueden producir (fuerza o momento).

Para ello han sido de gran utilidad los importantísimos textos existentes de historia de las teorías de la elasticidad y de la resistencia de los materiales, de autores de innegable categoría del cual se indica la deuda a las extraordinarias aportaciones históricas de Saint-Venant ("Historique Abrégé", en la edición de 1864 del "Résumé des Lecons données a l'Ecole des Ponts et Chaussées" de Navier), de Todhunter y K.Pearson ("A History of the theory of elasticity and the strength of materials from Galilei to the present time". Cambridge, 1886-1893) y de Stephen Timoshenko ("History of the Strength of materials", New York 1953) entre las obras clásicas.

Con la publicación de Charles Ravaisson-Mollien en la última década del siglo pasado sobre los manuscritos de Leonardo da Vinci conservados en la Biblioteca del Instituto (Paris), en edición facsimil con transcripción del italiano y traducción al francés, que más tarde llevaría a cabo una edición similar del Códice Atlántico (Hay ed. facsimil posterior, Florencia, 1975), publicándose finalmente los códices de Madrid en 1974. (Madrid, Taurus,

1974). Gracias a ello es posible acceder con cierta facilidad al trabajo del hombre que, por su posición intelectual y su desbordante pluma puede mostrar el estado del conocimiento en la más alta cota científica de su época, y en todos los terrenos de la ciencia, los importantes progresos que, desde su posición genial, infundió sobre dichos conocimientos.

Leonardo escribe de aritmética y geometría, de pintura y perspectiva, de arquitectura, estática y mecánica, guerra, fortificaciones, venenos, del vuelo de pájaros y hombres y la natación, del movimiento de las aguas y la caída de los graves, de medicina anatomía y óptica, astronomía, y en el terreno que nos ocupa, de resistencia de ménsulas y vigas, de arcos y cimentaciones, de soportes, de deformación. Proponiendo en todo caso experiencias y modelos mentales con los que aborda la descripción de los fenómenos observados.

Leonardo es modélico en esta nueva forma de pensar, adelantándose en un siglo a las primeras manifestaciones sistemáticas de la nueva ciencia que tan bien encarnarán Galileo, Wallis, Descartes, y tantos otros.

De modo que toda ciencia emerge de la convergencia de un creciente interés en alguna clase de problemas y del desarrollo de métodos, técnicas e instrumentos científicos adecuados para resolver esos problemas. Por lo que la investigación de operaciones no es excepción a esta regla. Sus raíces son tan antiguas como la misma ciencia, aunque se nombra en 1940. Su desarrollo estuvo lugar en el Reino Unido durante la segunda guerra mundial en el terreno militar, extendiéndose rápidamente en Estados Unidos.

La metodología de la ingeniería de sistemas requiere el uso de conceptos económicos, administrativos, sociales, técnicos, etc. El significado de análisis de sistemas, teoría de sistemas, ciencias de sistemas, filosóficos, et., son consecuencias de la naturaleza interdisciplinarias de la ingeniería de sistemas. La definición popular dentro de círculos académicos considera la ingeniería de sistemas como un grupo de conceptos y técnicas matemáticas que incluyen probabilidad estadística, teoría de sistemas, teoría de optimización y algoritmos en general.

Como consecuencia de la necesidad de planificar, operar y diseñar sistemas cada día más complejos que solucionen los grandes problemas socio técnico en los medios industriales, ha surgido una nueva filosofía o metodología llamada Ingeniería de Sistemas. Se utiliza la palabra “ingeniería” porque su énfasis está en la aplicación de conceptos cuantitativos a problemas concretos, mientras que la palabra “sistema” describe su tendencia a analizar problemas desde un punto de vista global; en este último caso se presenta una atención especial a la interacción entre diferentes componentes (o subsistema) del problema.

Utilizando modelos matemáticos que describen las interacciones entre componentes del sistema. Este modelo representa una descripción concisa del problema y enfatiza los aspectos más importantes del mismo. En general la ingeniería de sistemas es entonces una forma de resolver el problema de la seguridad estructural de las plataformas marinas.

La metodología de la ingeniería de sistemas se puede conceptualizar utilizando una serie de etapas conocidas como el ciclo básico de un sistema, que consiste en satisfacer la necesidad durante un periodo de tiempo. Cada etapa se caracteriza por una serie de actividades fundamentales que reciben el nombre de procesos básicos de decisión [176, 177].

Estas etapas metodológicas fueron descritas por Churchman, Ackoff y Arnoff, consistiendo en 1957 la publicación de la Introducción a la Investigación de Operaciones de C.W. Churchman y R.I. Ackoff que contiene uno de los primeros esfuerzos sistemáticos más relevantes sobre la metodología de sistemas. Churchman y Ackoff con su formación en filosofía de la ciencia, su posición filosófica pragmática y sus experiencias prácticas, reconocen la necesidad de definir explícita, sistemática y sistémicamente el método de la Investigación de Operaciones.

Su mismo concepto de ciencia lo enfocan sistémicamente, estableciendo la necesidad de mantener la interacción de esa actividad con las otras actividades filosóficas del hombre. Su concepto de ciencia y de su método, son conceptos amplios y plenos de posibilidades. De esta metodología deriva el método de la Investigación de Operaciones, considerando sus fases como componentes de un sistema para indagar y enfrentar los problemas de objetos de estudio ya existentes o a diseñar. Consideran esos mismos objetos como sistemas en los que interactúan hombres y máquinas. También plantean la necesidad de que ese proceso de indagación, se lleve a cabo por grupos interdisciplinarios.

Las fases de esta metodología establecidas como interactuantes por Churchman y Ackoff son [178, 179]:

1. Planteamiento del problema.
2. Construcción del modelo.
3. Deducción de una solución.
4. Prueba del modelo y evaluación de la solución.
5. Ejecución y control de la solución.

**Planteamiento de problema:** se refiere en la formulación del problema hay que especificar una medida de eficacia y su adecuación al problema y como así también debe identificarse también el ámbito de personas afectadas por las decisiones en estudio y deben descubrirse sus objetivos y cursos de acción.

**Construcción de un modelo:** Churchman y Ackoff explicitan la posibilidad de la utilización de diferentes tipos de modelos, no sólo los matemáticos. En el método que proponen, en sus fases interactuantes, se encuentra una consideración balanceada entre método, técnicas y herramientas en la búsqueda de una solución del problema considerando todo como sistema.

**Deducción de una solución:** en esta existen dos tipos de procedimientos para deducir una solución óptima a partir de un modelo: el analítico y el numérico. El procedimiento analítico consiste en la utilización de la deducción matemática, lo que implica la aplicación de diversas ramas de las matemáticas, de modo que las soluciones analíticas se obtienen en “abstracto”, es decir, que la sustitución de símbolos por números se realiza en general después de obtener la solución.

Los procedimientos numéricos consisten esencialmente en ensayar en el modelo diversos valores de la variable controlada, tal procedimiento varía desde la simple prueba y error hasta la compleja iteración. Un procedimiento iterativo, es aquel en que se intenta llegar a la solución óptima a través de pruebas sucesivas.

**Prueba del modelo y evaluación de la solución:** un modelo puede predecir con exactitud el efecto de los cambios sufridos por el sistema sobre la efectividad general de este. El modelo puede comprobarse determinando el grado de bondad con que predice el efecto de estos cambios. La solución puede evaluarse comparando los resultados obtenidos sin aplicar la solución con los resultados obtenidos aplicándola. Estas evaluaciones pueden hacerse, por el uso de datos pasados o por el método de ensayos o pruebas previas. Estas pruebas requieren un análisis cuidadoso de los datos que son válidos y de los que no lo son.

**Ejecución y control de la solución:** la solución deducida de un modelo sigue siendo una solución sólo que las variables no controladas mantengan sus valores y se mantenga constante la relación entre las variables del modelo. La misma solución se escapa del control en el momento en que cambia notablemente el valor de una o más variables no controladas (cargas) o más relaciones entre variables..

De modo que los aspectos metodológicos y los contenidos fundamentales del trabajo del Análisis Estructural Sistemático, pueden sintetizarse en dos órdenes de objetivos. En el orden metodológico, mostrar los procedimientos de trabajo empleados, una reflexión sobre la necesidad del diseño y la comprobación estructural y las implicaciones de otros conocimientos en el Análisis Estructural. En el orden de los contenidos (teorías, técnicas y aplicaciones), exponer el proceso de concertación del modelo, su puesta en práctica y sus capacidades para abarcar la comprobación de estructuras [178].

El método de sistema antes descrito, representa una muestra de la variedad de métodos que pueden definirse. Ante ésta situación Churchman publicó en su libro *Diseño de Sistemas de Indagación* retornando y actualizando su trabajo con Ackoff que presenta su análisis de la filosofía y la naturaleza del método científico. Churchman insiste en la importancia de la metodología de sistemas y de su relación con los procesos de indagar, vistos éstos como sistemas, y de éstos con la filosofía.

Las cinco corrientes que presenta Churchman son: el racionalismo, el empirismo, el criticismo, la dialéctica y el pragmatismo experimental de Singer. Churchman considera que esa última corriente filosófica sintetiza las cuatro primeras, resultando por tanto, la posición más comprensiva y plena de posibilidades, pero no niega la posibilidad de que existan situaciones en que alguna de las otras corrientes sea la más apropiada para aplicarse, La Figura 3.1, muestra la aplicación metodológica sistemática de Churchman y Ackoff

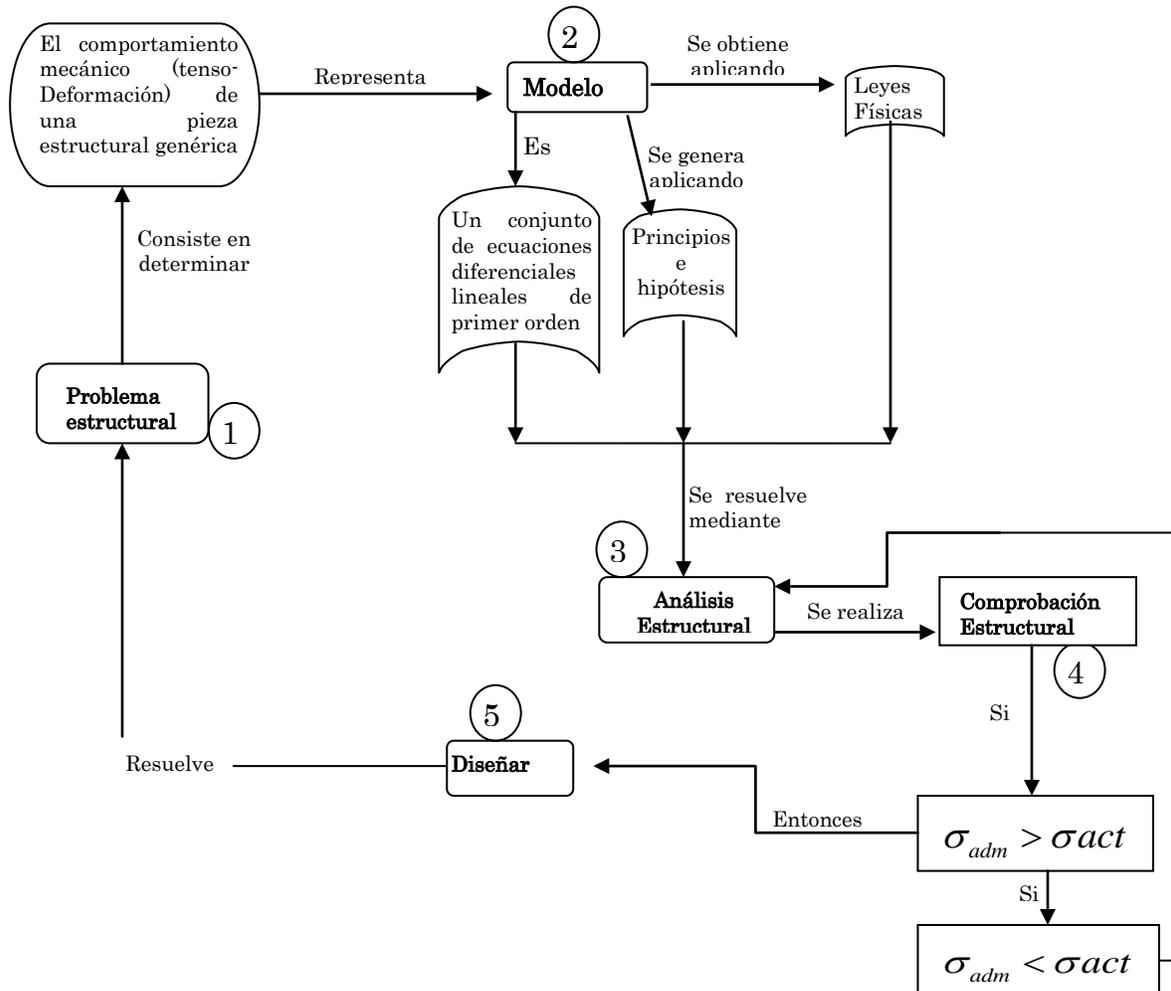


Figura 3.1. Diagrama de flujo de Análisis Estructural Sistemático, Churchman y Ackoff [180]

Misma metodología es aplicada al Análisis de Integridad Estructural considerando como mecanismo predominante los esfuerzos en nodos estructurales.

### 3.2 Cargas involucradas en la integridad estructural y propiedades del material

Para el proceso de análisis estructural de una plataforma marina fija, se consideran todos los tipos de cargas posibles así como sus combinaciones más desfavorables, que experimenta la estructura en todas sus etapas durante su vida útil, así como también las propiedades físicas del material, en las siguientes tablas se muestran dichos propiedades y cargas.

La Tabla 3.1, muestra las siguientes propiedades físicas del material, así como también en la tabla 3.2 y 3.3 se da a conocer las cargas involucradas en el análisis estructural de plataformas marinas, que cuya carga muerta se consideran como variables y las cargas vivas, están normalmente divididas en dos componentes como son: cargas estáticas y cargas dinámicas. Para este estudio la componente estática de la carga viva, se debe a la carga en áreas no ocupadas por equipos fijos, pasillos, escaleras, mezanines, piso de perforación, habitacional, helipuerto y así como también la fuerza de viento y fuerza de oleaje, siendo estas carga de naturaleza aleatoria, por lo que se considera también como variable aleatoria.

Aplicando estas cargas, a la plataforma marinas, se determinan los esfuerzos, elásticos, plásticos y térmicos de los 8306 nodos estructurales, para el análisis de la integridad estructural.

Tabla 3.1. *Propiedades físicas del material* [181]

Características del material	Valor numérico
ASTM A-36	API-2H Grado 50
Resistencia a la tracción	4200.00kg/cm <sup>2</sup> a 5600.00 kg/cm <sup>2</sup>
Módulo de elasticidad del acero (E)	2.1 x 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Modulo de Poisson (ν)	0.30
Esfuerzo de fluencia G.B. (σ)	2500.00 kg/cm <sup>2</sup>
Densidad del acero (ρ)	7.85 kg/cm <sup>3</sup>

En las tablas 3.2 y 3.3 se muestran los valores numéricos de las cargas gravitacionales consideradas para el análisis de integridad estructural.

Tabla 3.2 *Cargas gravitacionales* – Nivel + 19.100 m (ver Figura. 3.2)

Características de las cargas	Valor
Carga muerta (se consideró una carga muerta uniformemente distribuída)	160 kg/m <sup>2</sup>
Carga viva (áreas no ocupadas por equipos fijos, pasillos, escaleras, mezanines)	500 kg/m <sup>2</sup>
Carga de equipo (se consideró una carga uniformemente distribuída)	225 kg/m <sup>2</sup>

Tabla 3.3 *Cargas gravitacionales* – Nivel + 27.939 m (ver Fig. 3.2)

Características de las cargas	Valor
Carga muerta (se consideró una carga muerta uniformemente distribuida)	160 kg/m <sup>2</sup>
Carga viva (piso de perforación)	500 kg/m <sup>2</sup>
Carga viva (área del nivel superior de los módulos de bombas, almacenamiento de químicos, máquinas)	2450 kg/m <sup>2</sup> (operación) 1750 kg/m <sup>2</sup> (tormenta)
Carga viva (los dos niveles del módulo habitacional y el helipuerto)	500 kg/m <sup>2</sup>
Carga viva (pasillos, escaleras y mezanines)	500 kg/m <sup>2</sup>
Carga de equipo (equipo de perforación)	55 x 106 kg

Y por otra parte las cargas ambientales son cargas que se generan a consecuencia de los fenómenos meteorológicos (viento), oceanográficos (Corriente y oleaje) y sísmico. Así como también las cargas por agentes naturales también incluyen la variación de presión hidrostática y la flotación

en los miembros causada por cambios en el nivel de agua debido a los efectos de oleaje y mareas.

De modo que las fuerzas de oleaje son de acuerdo a la ecuación de Morison (API-RP-2A, 2000) para las siguientes direcciones 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315° tanto para operación como para tormenta. Los coeficientes que se utilizaron para la ecuación de Morison son las de los coeficientes de inercia ( $C_m$ ) y el coeficiente de arrastre ( $C_d$ ). En las Tablas 3.4 y 3.5 se muestran los parámetros meteorológicos y oceanográficos considerados en este análisis [182].

Tabla 3.4 *Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Operación* [211]

Parámetros	Diseño	Unidades
Periodo de retorno de referencia	10	Años
Altura máxima de ola	8.7	m
Altura de ola significativa	4.68	m
Periodo de la ola	11.08	s
Altura de marea astronómica	0.76	m
Altura de marea de tormenta	0.35	m
Velocidades máximas del viento a 10 m sobre el NMM para 1 hr.	15.80	m/s
Velocidad de corriente para 0 % de profundidad	43	cm/s
Velocidad de corriente para 50 % de profundidad	36	cm/s
Velocidad de corriente para 95 % de profundidad	11	cm/s

Tabla 3.5. *Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Tormenta* [182]

Parámetros	Diseño	Unidades
Periodo de retorno de referencia	171	Años
Altura de ola máxima	16.7	m
Periodo de la ola	11.74	s
Altura de marea astronómica	0.76	m
Altura de marea de tormenta	1.01	m
Velocidades máximas del viento a 10 m sobre el NMM para 1 hr.	38.96	m/s
Velocidad de corriente para 0 % de profundidad	131	cm/s
Velocidad de corriente para 50 % de profundidad	100	cm/s
Velocidad de corriente para 95 % de profundidad	46	cm/s

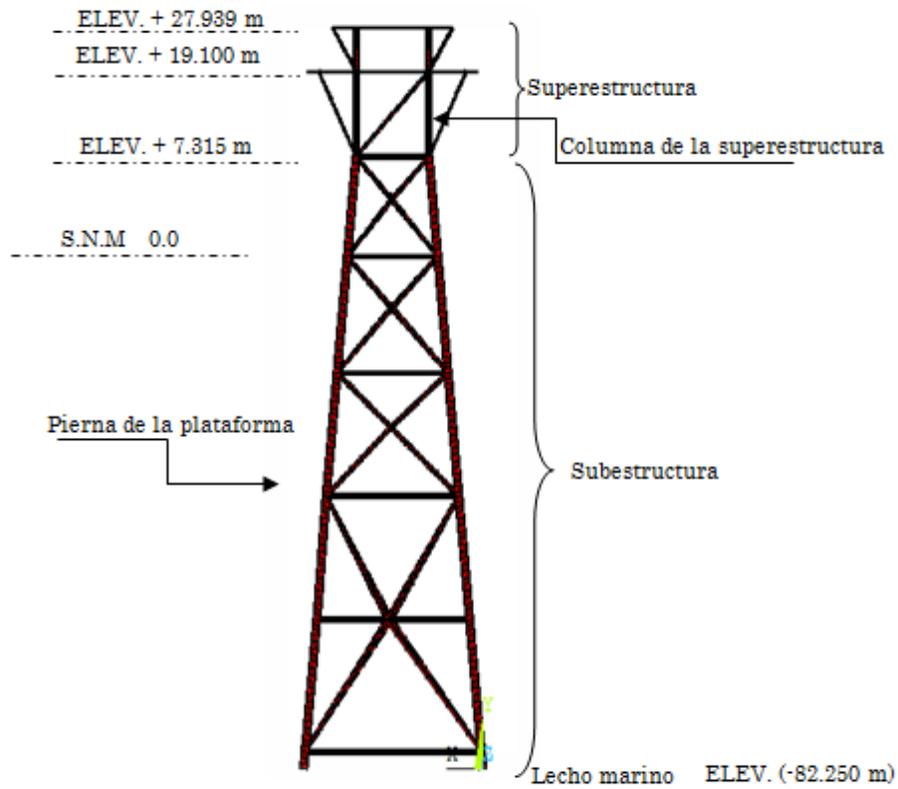


Figura 3.2. Marco estructural de una plataforma

### 3.3 Factores correctores de distribución de esfuerzos

La distribución de los esfuerzos en los nodos sometidos a cargas estáticas de diseño, teniendo en consideración la variación de algunos parámetros geométricos, del cual se busca el espesor menor del elemento arriostrado y sobre ella se aplica la carga, obteniendo el esfuerzo de los nodos ( $\sigma_{nodo}$ ) se aplica los siguientes factores correctores.

$$\sigma_{nodo} \leq \sigma_{Sadm} = \nu \nu_2 \sigma_{adm} / F.S \quad (3.1)$$

$\sigma_{nodo}$  = Esfuerzo del nodo

$\nu$  = Factor por el tipo de nodo

$\nu_2$  = Factor por la calidad de la unión

$\sigma_{adm}$  = Esfuerzo de fluencia del material base

$\sigma_{Sadm}$  = Esfuerzo admisible de la unión

$F.S$  = Factor de seguridad

### 3.4 Integridad estructural

La integridad estructural, es el proceso para demostrar la rigidez de una estructura y sobre todo su vida útil. Siendo este un proceso racional para la gestión de los efectos de la degradación, daños, cambios en la carga, sobre cargas accidentales y cambios en el uso. La integridad estructural da la oportunidad de adoptar los principios de riesgo para el desarrollo de la estrategia de integridad estructural. La falla estructural incide en la integridad de la misma siendo suficiente para hacer que una estructura sea inoperable. La consecuencia de las falas incluye la posibilidad de la pérdida de la vida útil, la contaminación ambiental, reparaciones, limpieza, reemplazo, restauración local y los costos económicos de la producción.

Un enfoque basado en riesgo reconoce que las plataformas con una mayor falla estructural podrían presentarse más frecuentemente en la no inspección. Durante el desarrollo de la estrategia de inspección, la categoría de riesgo puede utilizarse para establecer intervalos de sondeo y ámbitos de trabajo como parte de una estrategia basada en riesgo a la integridad estructural.

### 3.5 Estrategia para la integridad estructural de plataformas marinas

En el diseño de ingeniería no es posible garantizar la seguridad absoluta de una estructura debido a la impredecibilidad de futuras condiciones de cargas; a la incapacidad de obtener y expresar con exactitud en un lugar específico las

propiedades del material; al uso de consideraciones simplificadas en la predicción del comportamiento de la estructura debido a las consideraciones bajo cargas, constituyendo así el riesgo estructural.

La integridad estructural se logra por: la inspección y la aplicación de la disposición integral del Diseño y Reglamento de Construcciones (DCR), evaluación de todos los casos de seguridad para el diseño y la primera operación para asegurar un tratamiento adecuado de la integridad estructural y el establecimiento de normas de funcionamiento apropiadas, investigar todos los informes de una amenaza significativa a la integridad en virtud del DCR, estableciendo programa de mantenimiento, asistencia y influencia en el desarrollo de los nuevos estándares internacionales para estructuras de plataformas marinas. Por lo que en el desarrollo de la estrategia se muestra en la Figura 3.3.

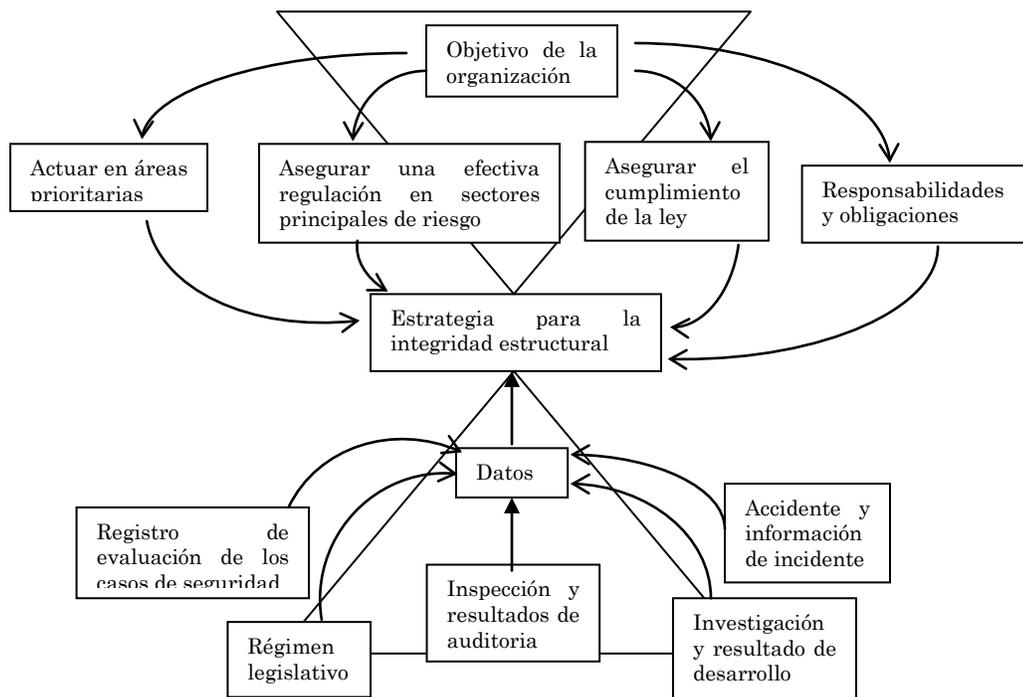


Figura 3.3. Enfoque estratégico de integridad estructural

La ciencia de la integridad estructural propende por la caracterización temprana de daños y la predicción de la vida remanente de componentes de maquinaria y estructuras civiles en servicio. Se fundamenta en la solución de problemas inversos, en los cuales mediciones experimentales (de deformación, distribución de temperatura, etc.), realizadas sobre los componentes mecánicos en servicio, son utilizadas para determinar matemáticamente la existencia de

daños y sus características en términos de posición, orientación, tamaño y la predicción del tiempo de vida remanente antes que una falla catastrófica ocurra.

De modo, que este enfoque estratégico de integridad estructural proporciona la pauta para la evaluación de la concentración de los esfuerzos que se producen en los nodos estructurales, cuya concentración de esfuerzos en nodos estructurales se determinan utilizando para ello el método del elemento finito (MEF), el cual se ejecuto con el software ANSYS.

La presencia de esfuerzos locales en los nodos implica un grave riesgo para la integridad estructural de los mismos. Durante la vida en servicio de la estructura, estos esfuerzos se producen por cargas cíclicas (fatiga) y estáticas.

### 3.6 Variabilidad de la resistencia estructural

El esfuerzo resistente está en función de la variabilidad de las cargas que la tradicional medida determinística de la excedencia de los estados límites a saber el factor de seguridad y el factor de carga y está definido como:

$$R_R = \mu_R (1 - K_R V_R) \quad (3.2)$$

Donde  $R_R$  es la característica de la resistencia,  $\mu_R$  es la resistencia media,  $V_R$  es el coeficiente de variación de la  $R$  y  $K_R$  una constante.

### 3.7 Relajación de esfuerzo en tiempo fractal

La geometría fractal, una teoría matemática moderna que se aparta radicalmente de la geometría euclí-diana tradicional, describe objetos geométricos que son autosemejantes o simétricos en escala. La geometría fractal es un nuevo lenguaje cuyos elementos son algoritmos que computacionalmente pueden expresarse en formas y estructuras.

En un material de acero estructural, los átomos o moléculas que lo constituyen se encuentran distribuidos en posiciones aleatorias, y no ordenadamente, como en un cristal. Esto hace que el sistema esté lleno de defectos en donde los enlaces entre partículas se encuentran distorsionados y bajo tensión. Cuando este material es sujeto a la acción de algún esfuerzo que lo deforma y luego se le libera, los defectos que hay en él se desplazan a lo largo del sistema y se dice que el material se relaja. Cada defecto, para moverse, necesita tener energía suficiente para vencer la barrera que siempre se opone a ello. El tamaño de esta barrera de energía no es el mismo para todos los

defectos y normalmente depende de su posición en el material y de su naturaleza. Al iniciarse la relajación, los defectos cuya barrera energética es pequeña se desplazan sin problema. Otros tardan más tiempo, y otros mucho más. El hecho es que la relajación se da en tiempo fractal, pues mientras algunos movimientos tardan años en darse, en ese intervalo ya se produjeron relajamientos en todas las escalas de tiempo (desde picosegundos en adelante).

Esto ha resultado muy útil para comprender el envejecimiento de algunas estructuras o, cómo responden a la acción de esfuerzos externos, por qué se fracturan o quiebran. El suponer la presencia de relajamientos que se dan a toda escala en el tiempo, ha permitido generar modelos comunes para todos estos fenómenos y simplificar su análisis. Todo esto con sólo pensar en la posibilidad de esta multiplicación interminable de tiempos [183].

### 3.8 Generación de modelo en Ansys

En la actualidad existen numerosos programas de análisis de elemento finito, tales como el ABAQUS, COSMOS, PATRAN, NASTRAN, STRUDL, CAEPIPE, etc.; de entre todos ellos, se ha elegido ANSYS por tratarse de una herramienta versátil de análisis por elemento finito, teniendo en cuenta la relación entre la calidad del producto y su costo, hasta la fecha de hoy.

Una vez inicializado el software ANSYS, se elige la opción de análisis estructural, el mismo programa nos solicita datos de entrada, como se muestra en la Figura 3.4, que en nuestro caso es la opción (Structural).

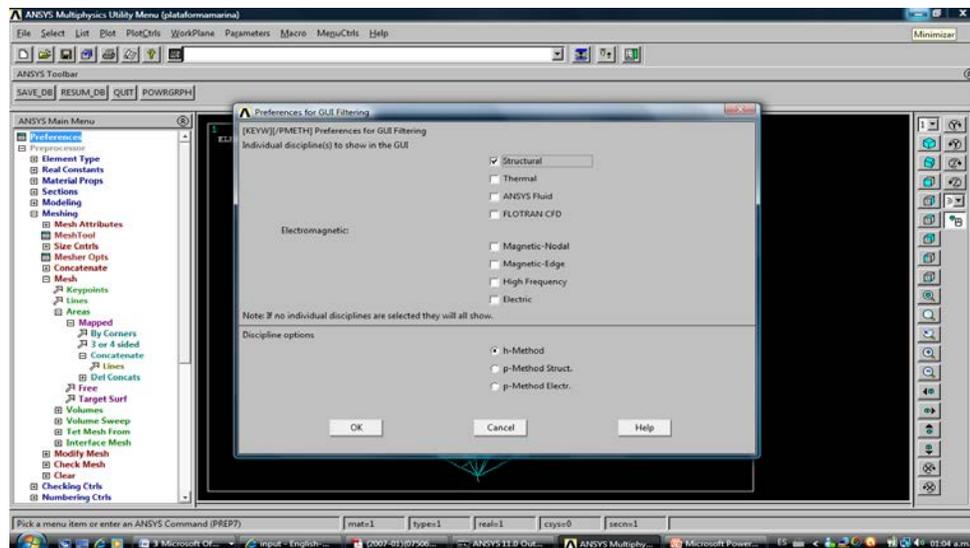


Figura 3.4. Opción de análisis

En la Figura 3.5, se muestra la definición de los tipos de elementos, en nuestro caso se definió (pipe elastic straight16).

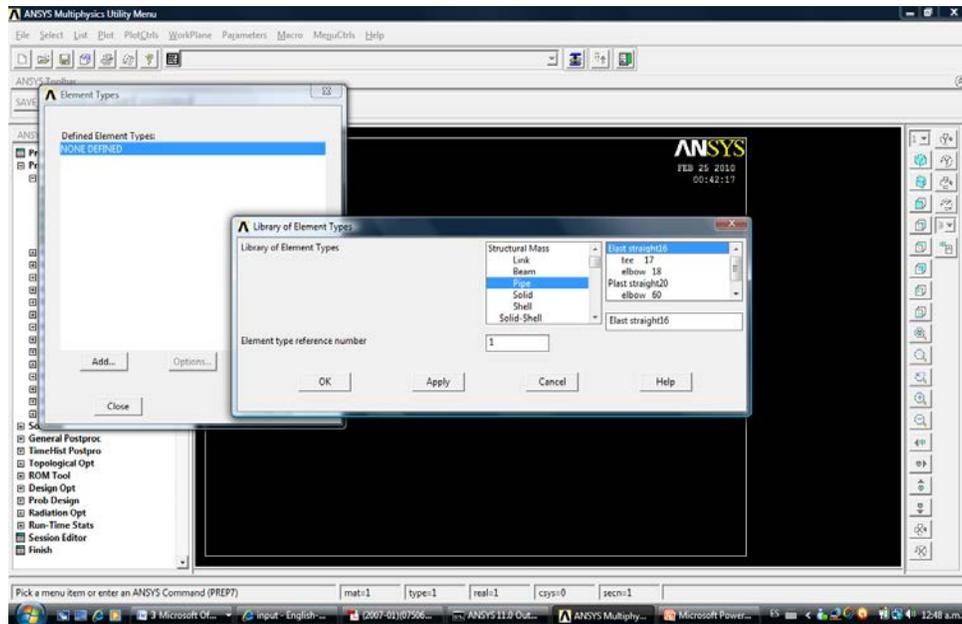


Figura 3.5. Definición del tipo de elemento

En la Figura 3.6, se definen las propiedades del material, como son Elasticidad y el modulo de Poisson, el cual nos permitirá conocer la forma en que el material soporta fuerzas aplicadas, incluyendo fuerzas de tensión, compresión, impacto, cíclicas o de fatiga, o fuerzas a altas temperaturas.

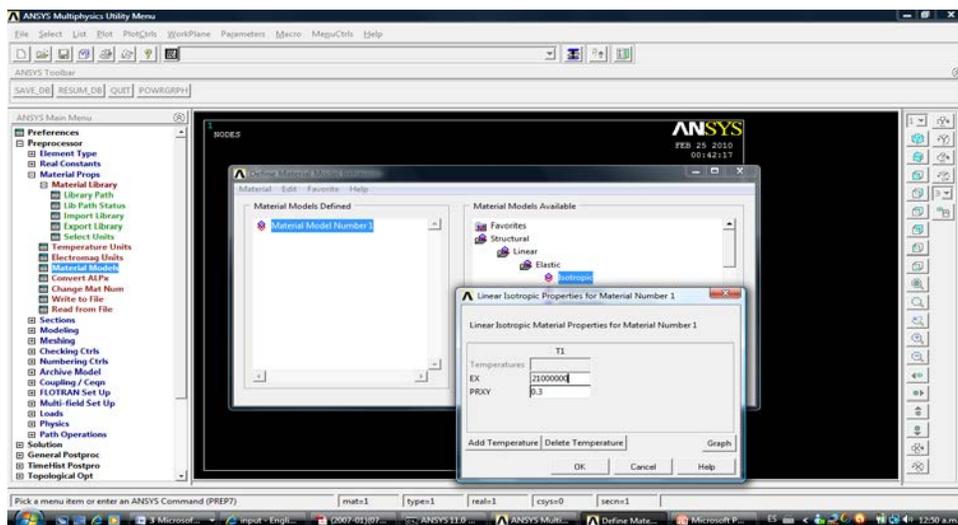


Figura 3.6. Definición de las propiedades del material

En la Figura 3.7, se definen los nodos estructurales, mismos que formaran los elementos estructurales, constituyendo la geometría entre lazada entre sí.

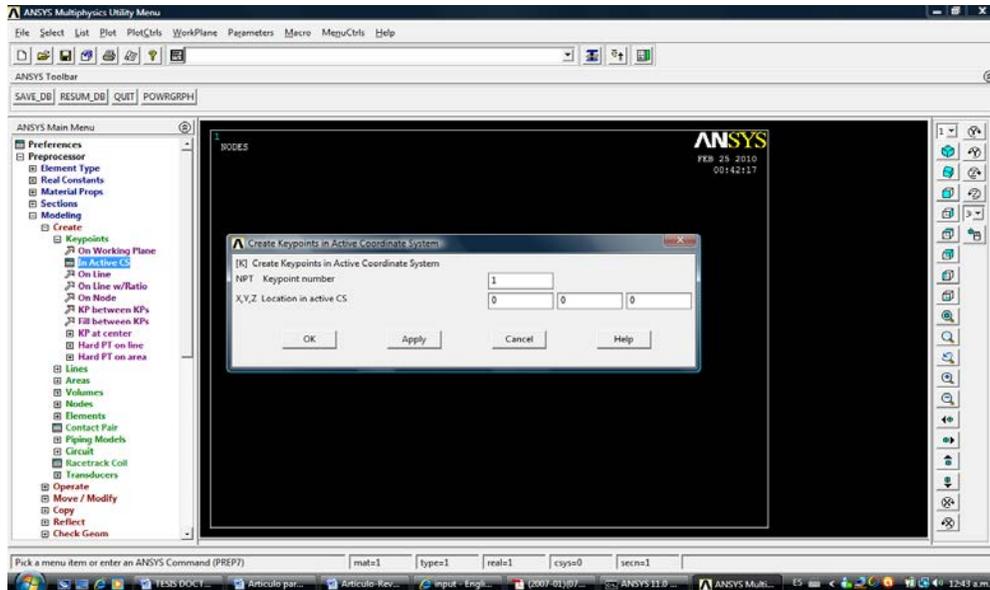


Figura 3.7. Definición de los nodos

En la Figura 3.8, se muestra la generación del modelo estructural tridimensional (3D) de una plataforma marina, que cuyos elementos se hallan constituidos por nodos y elementos estructurales.

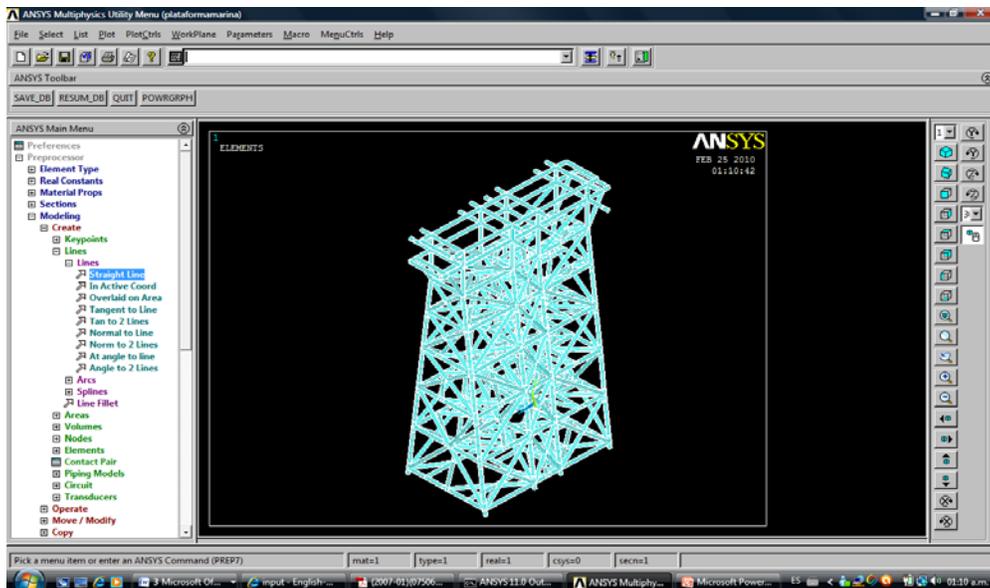


Figura 3.8. Generación del modelo en 3D

### 3.9 Una aplicación práctica del Ansys

En la **deducción** de la solución estructural existen métodos, como es el caso del método de flexibilidad, en el que se liberan fuerzas para que la estructura sea estáticamente determinada; las incógnitas son las fuerzas. Estas se hallan asumiendo que la estructura liberada experimenta deformaciones irregulares que se corrigen aplicando las fuerzas adicionales que convenga.

En otro caso el método de rigidez, en el que se restringe la deformación para impedir el movimiento de las uniones, determinándose las fuerzas necesarias para originar la restricción; entonces se permite que se produzcan desplazamientos en las uniones hasta que hayan desaparecido las restricciones ficticias. Una vez que se conocen los desplazamientos, se hallan las fuerzas presentes en la estructura por superposición de los efectos de los desplazamientos separados.

Para el caso problema del esfuerzo elástico, plástico térmico; el método del elemento finito es apto para el análisis de nodos estructurales. Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de nodos situados en sus fronteras. Los desplazamientos de estos nodos son las incógnitas fundamentales del problema.

Estas funciones de desplazamiento definen el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, en conjunto con las propiedades constitutivas del material, del que se definen el estado de esfuerzo en todo el elemento y consecuentemente, en sus fronteras.

La solución de la ecuación que integra a todo el sistema permite obtener los desplazamientos nodales, siendo esta una solución analítica consistiendo en la utilización de la deducción matemática, de modo que las soluciones analíticas se obtienen en “abstracto”, es decir, que la sustitución de símbolos por números se realiza en general después de obtener la solución.

En la prueba del modelo y evaluación de la solución, esto es, una vez que se haya generado el código, comienza la prueba del programa. La prueba se enfoca sobre la lógica interna del software, asegurando que todas las sentencias se han probado, y sobre las funciones externas, esto es, realizando pruebas para asegurar que la entrada definida producirá los resultados que realmente se requieren, comprobándose así el grado de bondad con que el efecto de estos cambios. De modo que evaluar dichas soluciones al compararse los resultados obtenidos con datos anteriores, estableciendo así un parámetro matemático de formas directas como se da a conocer en la Figura 3.9 y 3.10, en la ecuación (3.3) y (3.4) para la evaluación de dicha solución.

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{(100N)(500mm)^3}{3(70000Mpa)(\frac{1}{4}\pi(12.5mm)^4 - (10.5mm)^4)} = 6.18 \quad (3.3)$$

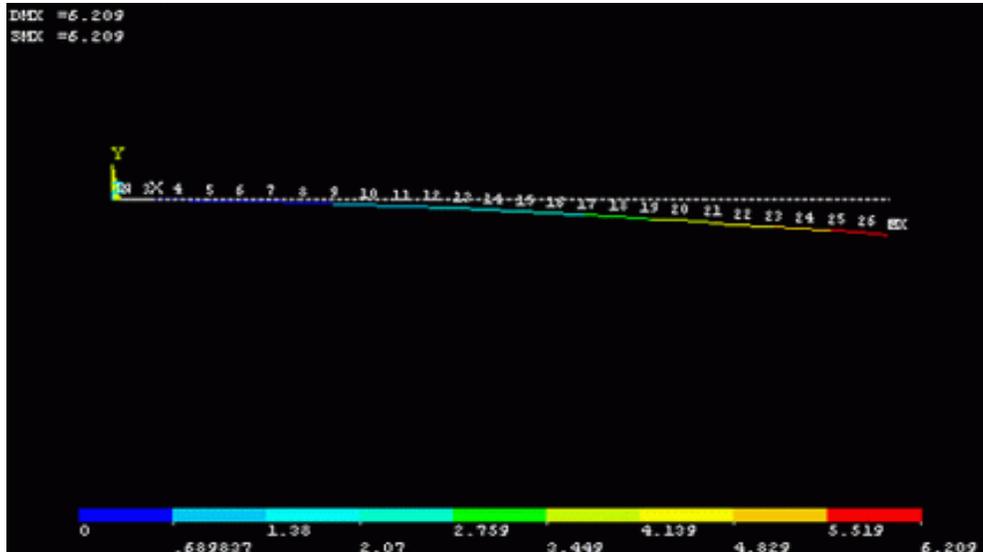


Figura 3.9. Deflexión

$$\sigma = \frac{My}{I} = \frac{(100N)(500mm)}{(1/4\pi((12.5mm)^4 - (10.5mm)^4))} = 64.9Mpa \quad (3.4)$$

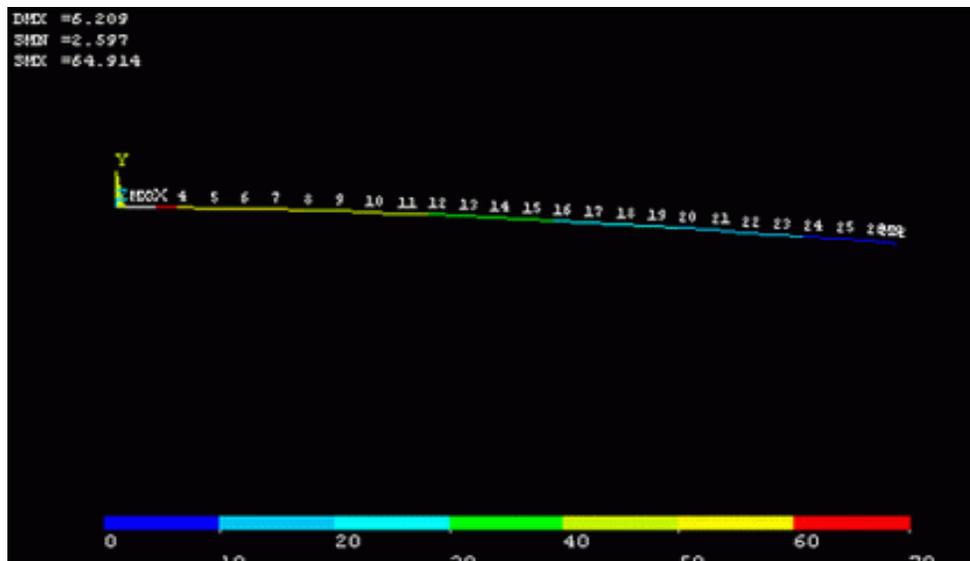


Figura 3.10. Esfuerzo

Las variables no controladas como las cargas vivas, sismo, viento, que afectan el estado límite de servicio del modelo estructural, estas deberán de mantener sus valores y se mantenga constante con la relación del variable de modelo con la que fue modelado, no obstante, la misma solución se pone fuera de control, en el momento que el momento en que cambia notablemente el valor de una o más variables no controladas anteriormente dichas o más relaciones entre estas variables.

### 3.10 Breve historia de la investigación operativa

En 1957 C.W.Churchman ,R.L., Ackoff y E.L. Arnoff escriben el primer libro de Investigación Operativa , su título es "Introduction to Operations Research", (Introducción a la Investigación de Operaciones), en él resumen las ideas de la época considerando que la Investigación de Operaciones u Operativa es la aplicación por grupos interdisciplinarios del método científico a problemas relacionados con el control de las organizaciones o sistemas (hombre - máquina) a fin de que se produzcan soluciones que mejor sirvan a los objetivos de toda organización. Se simboliza con la sigla I.O y en inglés O.R. (Operational Research /Operations Research).

Estos grupos interdisciplinarios nacen en Gran Bretaña y Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial a fin de resolver problemas concretos de logística, táctica y estrategia. Por ejemplo:

- La dieta de costo mínimo que se provee a los soldados
- La forma en que se ubican los radares para reducir el riesgo de ataque.
- La secuencia y recorrido de los barcos para que su destrucción fuese mínima por parte del enemigo.

Estos temas generaron algoritmos buscando minimizar los gastos o maximizar los beneficios, es decir optimizar costos. Estos desarrollos eran estrictamente matemáticos, a pesar que en estos grupos participaban profesionales del área humanística que permitían una mejor comprensión del problema. En la década del 50, la I.O. se centra en los problemas empresariales y se asocia a la I.O. con la administración científica (Management Science). La sigla que aparece entonces es OR / MS. Los temas clásicos de esa época eran Programación Matemática, que muchos nombraban como Optimización (problemas de dietas, mezclas, plan de producción de la empresa, distribución de carga o personas, asignación de personal), Fenómenos de Espera o Teoría de las colas (tiempo de espera en la línea de producción, puntos de atención para minimiza el tiempo de espera). Este hecho hizo que poco a poco se fuera perdiendo el concepto de grupo interdisciplinario, pues los especialistas en investigación operativa ocupaban puestos en la línea staff de las empresas públicas ó privada, y se incrementa el sesgo matemático, apoyado por el uso de las computadoras.

En la década del 60 comienza un debate activo pues se nota que la I.O. se debe ocupar de la “estructura del problema”, en lugar de dedicarse sólo a la búsqueda de algoritmos de resolución de problemas. Esta discusión se puede resumir en la definición que da la Sociedad Británica de Investigación Operativa: “Investigación Operativa es el ataque del método científico moderno a los problemas complejos que se presentan en la dirección y gobierno de los grandes sistemas de hombres, máquinas, materiales y dinero en la industria, negocios, gobierno y defensa. Lo característico de este enfoque es la construcción de un modelo matemático del sistema, incorporando medidas de factores como el riesgo y la incertidumbre, con los que predecir y comparar los resultados de las diversas decisiones, estrategias o controles. El propósito es ayudar a la dirección a determinar su política y acciones científicamente”. Es decir a partir de los 60 la I. O. se centra en los problemas políticos – sociales nacionales e internacionales en contraste con las épocas anteriores [184].

# CAPITULO IV. INSPECCION ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS

---

---

## 4.1. Introducción

El propósito de la inspección no destructiva en estructuras de acero, es la detección de discontinuidades que pueden afectar su vida útil, a sí mismo determinar sus características físico-matemático o para determinar el daño al que está sometido; estos no deben tener discontinuidades que puedan ser la causa para el retiro de alguno de sus elemento en servicio y menos aún que desarrollen cargas que hagan que falle. Normalmente a la falla de un elemento estructural o de una estructura completa son pocos comunes, se les atribuye generalmente a defectos preexistentes de manufactura y al daño inducido durante el servicio. El primero resulta fundamentalmente, de la negligencia, la ignorancia o los errores humanos de alguno de los procesos de diseño, selección de materiales, manufactura o control de calidad. En cambio, la segunda causa de falla estructural, que es más difícil prevenir por presentarse en nuevos diseños o nuevos materiales, se debe a comportamientos desconocidos o condiciones que no pudieron ser anticipadas o preverse durante el diseño. Estas fallas son factibles de superarlas al utilizar el criterio de diseño de tolerancia al daño y la adecuada aplicación e interpretación de la evaluación no destructiva.

El criterio de diseño con tolerancia al daño, es un concepto relativamente reciente; se refiere a la habilidad de una estructura o un elemento estructural en resistir la presencia de defectos o grietas preexistentes durante un tiempo determinado. Esto es, la capacidad para seguir operando mientras una grieta o defecto sea menor a cierto tamaño crítico, sin que su integridad estructural sea afectada y la evaluación no destructiva proporciona información actualizada de la situación en que se encuentra un componente en determinado momento; de manera que identifica la presencia de una o varias grietas.

En función de la información de presencia de defectos y del análisis de las condiciones de operación, se establecen que tan críticas son las grietas, y en caso de no serlo, predecir su comportamiento y estimar el tiempo que transcurrirá para que lo sea. De este modo, definir el tiempo de vida útil de la estructura o establecer un periodo de inspección que permita dar seguimiento a los defectos hallados y fijar el programa de mantenimiento.

En respuesta a ésta necesidad, se han desarrollado técnicas cada vez más sofisticadas en campos de aplicación de los ENDs (Evaluaciones no destructivas) de las cuales son muy variadas e ideados para evaluar discontinuidades de distintos materiales, de distintas características y distintas formas de discontinuidades.

La evaluación no destructiva proporciona el primer paso para asegurar la integridad estructural mediante la identificación de elementos dañados que deben ser reparados o sustituidos. Como en toda técnica de inspección se presentan ciertas limitaciones y posiblemente exista un número de grietas o defectos no pueden ser detectados, es precisamente aquí es donde juega un papel muy importante, el criterio de diseño de tolerancia al daño, convirtiéndose en línea de defensa contra dichas fallas catastróficas, al incluir configuraciones y materiales resistentes a esas grietas indetectables. De modo que la tolerancia al daño se considera también como la medida o calificación del grado de protección de una estructura ante situaciones o condiciones de falla no anticipadas, que pudieran resultar catastróficas.

Existen ejemplos de fallas catastróficas, y uno de ellos son: el de los buques Liberty construidos durante la Segunda Guerra Mundial y el otro más reciente es el del trasbordador espacial Challenger, Un ejemplo claro de un buen diseño con tolerancia al daño es el de un bombardero B-17F que en una misión en África durante la Segunda Guerra Mundial, después de chocar con otro avión, y sufrir un daño significativo en su fuselaje; fue capaz de volar 90 minutos en esas condiciones y llegar a su base, ver Figura 4.1 [176].



*Figura 4.1.* Bombardero B-17F en vuelo después de una colisión en el aire [176]

## 4.2. Evaluación no destructiva (END)

El ensayo no destructivo, también llamado evaluación no destructiva (END), se le define como el proceso de inspección y análisis de un componente o elemento estructural para determinar su integridad. Por lo que el ensayo no destructivo, es cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altera su forma, sus propiedades físicas, químicas, mecánicas, dimensionales o magnéticas.

Así, la END no sólo comprende el proceso de inspección no destructivo, sino que también el análisis de los resultados de esta inspección para calificar la condición estructural del componente evaluado. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo.

Los diferentes métodos de ensayos no destructivos, están basados en la aplicación de fenómenos físicos tales como: ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

Es importante distinguir los conceptos de evaluación no destructiva (END) e inspección no destructiva (IND); ya que el primero es un proceso más complejo que incluye al segundo.

En toda, END se deben de tener en consideración dos aspectos fundamentales: la capacidad de técnica para la IND, y el fundamento teórico de la ciencia de los materiales e ingeniería mecánica estructural.

Las técnicas no destructivas más comunes son: inspección visual; radiografía; ultrasonido; corrientes parásitas; partículas magnéticas y líquidos penetrantes; de las cuales, aunque limitada pues sólo permite identificar defectos superficiales, la inspección visual es la más utilizada de todas.

Para detectar defectos internos en los materiales se emplea la radiación X o gamma (radiografía), o la energía acústica (ultrasonido). Cuando al tratarse de defectos superficiales pequeños, que al no detectarse con una inspección visual, se pueden identificar midiendo cambios de conductividad eléctrica, o examinando los cambios en las corrientes inducidas por campos magnéticos.

Para los resultados obtenidos durante una inspección no destructiva, es necesario conocer algunas definiciones [177,178]:

- Falsa: Indicación no existente en la realidad para el ensayo, resultado de un proceso inapropiado o a un procedimiento incorrecto.
- No relevante: Indicación que no tiene relación con la discontinuidad que es considerada como defecto en la parte que está siendo inspeccionada.

- **Discontinuidad:** Interrupción, intencional o no en la configuración de una pieza.
- **Indicación:** Observación de una discontinuidad que requiere interpretación. Por ejemplo: grietas, inclusiones, etc.
- **Interpretación:** Determinación de si una indicación es no relevante, relevante o falsa.
- **Evaluación:** Valoración de una indicación relevante. Para determinar si las especificaciones de servicio son descubiertas.
- **Defecto:** Una o varias discontinuidades que no presentan especificaciones.

La aplicación de los métodos de ensayos no destructivos, en materiales se puede resumir en los siguientes tres grupos s:

1. **Defectología.** Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales, determinación de tensiones.
2. **Caracterización.** Evaluación de las características: químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales, propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas), transferencia de calor y trazado de isotermas.
3. **Metrología.** Control de espesores y medidas [179]

#### **4.3. Clasificación de END**

Los END, son de aplicación práctica del conocimiento técnico científico logrados en el campo de la física y de las demás ciencias naturales, para la detección y evaluación de discontinuidades y fallas de los materiales, también se puede llegar a estudiar, la composición y las variaciones mismas de la estructura de los materiales usados en ingeniería. Los END se pueden clasificar, por las discontinuidades a detectar de la siguiente manera [180, 181]:

- ✓ Según su Forma: planares y volumétricas
- ✓ Según su posición: Superficiales, Internas y Sub-superficiales

Los END pueden ser agrupados en función del campo de energía o medio de prueba utilizada, de la siguiente manera:

**A. Métodos basados en la aplicación de Radiaciones Penetrantes:**

- Radiografía (Rayos X)
- Xerografía
- Gammagrafía (Rayos Gamma)
- Neurografía

**B. Métodos basados en vibraciones mecánicas:**

- Ultrasonido
- Emisión acústica
- Análisis de vibraciones

**C. Métodos basados en electricidad y magnetismo**

- Partículas magnetizables
- Corrientes parásitas de Eddy
- Ensayos Eléctricos
- Magnetoscopia

**D. Métodos Ópticos**

- Examen visual (lentes, espejos, endoscopios)
- Transmisión de imágenes
- Réplicas

**E. Métodos basados en energía térmica**

- Termografía (lápices térmicos)
- Métodos infrarrojos

**F. Métodos basados en transporte de materia**

- Líquidos penetrantes
- Exudación de gases
- Partículas filtradas

**G. Métodos basados en energía mecánica**

- Dureza mecánica (resistencia)
- Rugosimetría
- Extensómetros eléctricos (medidores de deformación)
- Lacas frágiles
- Fotoelasticidad

#### **4.4. Tipos de ensayos no destructivos**

Los ensayos no destructivos pueden evaluar la calidad de la soldadura de elementos estructurales de acero, tales END son Inspección Visual, Ultrasonidos, Líquidos penetrantes y Partículas magnéticas [182, 183].

##### **4.4.1. Ensayo por Líquidos penetrantes**

La detección de grietas no visibles en materiales metálicos, se vienen practicando desde los años treinta, al extenderse la práctica llamada “petróleo y cal”; práctica que en algunos talleres se realizaban, el cual consistía en mojar la superficie de la pieza que se quería inspeccionar con una mezcla de aceite mineral y petróleo. Después de un cierto tiempo da lugar a la completa impregnación de la pieza, ésta se secaba y se cubría con una lechada de cal o con polvos de tiza. Este material absorbente, chupaba los restos de aceite que se habían introducido en las posibles grietas del material y después de poco tiempo surgían unas manchas en la lechada, que reproducían la forma de los defectos superficiales del material. Desde entonces se han ido mejorando los materiales utilizados para realizar este tipo de inspección mediante la incorporación de productos con un elevado grado de penetración y el uso de reveladores con alto poder de absorción. La mejora de pigmentos para la coloración de los penetrantes y la aplicación de materiales fluorescentes detectables con luz negra, han aportado al método una mayor sensibilidad en la detección de defectos más pequeños. Este método se emplea generalmente para evidenciar discontinuidades superficiales sobre casi todos los materiales no porosos (o con excesiva rugosidad o escamado), característica que lo hace utilizable en innumerables campos de la construcción.

El método de líquidos penetrantes se introdujo en la industria aeronáutica en los años que precedieron la Segunda Guerra Mundial, la causa principal fue la necesidad de poder disponer de un control válido alternativo al de partículas magnetizables el cual requiere, para su aplicación, materiales con características ferromagnéticas.

La inspección por líquidos penetrantes (PT) es una técnica versátil y de simple aplicación para una gran variedad de materiales y diseños que permite localizar defectos o grietas superficiales. El método se basa en los principios básicos de la acción capilar, y la capacidad de humectación de un líquido de baja viscosidad, propiedades que permiten que éste penetre por hendiduras o grietas imperceptibles a la vista para resaltarlas y evidenciarlas. En general, la viscosidad, la capilaridad y la humectación están íntimamente relacionadas entre sí, y dependen de la tensión superficial del líquido y su capacidad para mojar la superficie de un material determinado. Una forma directa para medir

dicha capacidad es a través del ángulo que hay en el punto de contacto de una gota con una superficie sólida, y que entre más pequeños sean, es mejor la capacidad de humectación del líquido [184, 185], como se ve en la Figura 4.2.



*Figura 4.2. Ensayo por líquidos penetrante [186]*

#### **4.4.1.1. Procedimiento general de inspección PT**

La inspección con líquidos penetrantes consta de seis pasos, cuyo objeto es utilizar un líquido de alta capacidad de humectación que penetre y resalte a simple vista grietas, o defectos superficiales que inicialmente no son visibles.

- 1 Limpieza superficial: Quizás el más importante, ya que consiste en la limpieza de la superficie al que se va a inspeccionar, para que quede libre de impurezas como, polvo, pinturas, recubrimientos, residuos de material, grasas y cualquier otro tipo de sustancia o material que pudiera interferir en la evaluación enmascarando las grietas, o dando indicaciones falsas de grietas inexistentes. Esta etapa, puede ser manual o por medios mecánicos; en ambos casos, se debe tener especial cuidado para no “tapar” o “cerrar” las grietas.
- 2 Aplicación del líquido penetrante: Consiste en la aplicación del líquido en forma directa sobre la superficie que se desea evaluar. La dosificación se hace con una brocha, por inmersión o rociado, o por cualquier otro procedimiento que permita que el líquido cubra abundantemente y totalmente la superficie.

- 3 Infiltración: Una vez aplicado el líquido penetrante, es necesario darle tiempo para que se infiltre en las grietas e imperfecciones. El tiempo depende del tamaño de grieta que se espera detectar, del material de la pieza, la forma, el tipo de penetrante y la posición de la pieza respecto a la fuerza de gravedad. El tiempo típico de infiltración o penetración puede variar desde 5 min para discontinuidades relativamente grandes, hasta 3 h en discontinuidades muy pequeñas.
- 4 Remoción del líquido penetrante: Se procede a retirar o limpiar de la superficie de la pieza todo el excedente del líquido penetrante, para que quede sólo el que se infiltró por las grietas o defectos. La remoción debe ser antes de que el penetrante seque, pues de lo contrario no va actuar el revelador, volviéndose necesario reiniciar todo el proceso.
- 5 Aplicación del revelador: Al igual que el líquido penetrante, el revelador se aplica de muy diversas maneras: con brocha, por inmersión, etc. La función principal es reaccionar con el líquido penetrante (únicamente presente en las grietas o defectos) para colorear y resaltar las áreas en las que éste se encuentre, es decir, en las que hubo infiltración. Cualquiera que sea el revelador, se recomienda que permanezca sobre la superficie aproximadamente el mismo tiempo que se requirió para la infiltración; lo anterior con el fin de dar tiempo a que el revelador reaccione con el penetrante, y se obtenga una indicación de buena calidad. En cada caso, la mejor manera para establecer el tiempo óptimo para la inspección es mediante una serie de pruebas experimentales.
- 6 Magnificación: Por lo general, la zona afectada por la reacción líquido penetrante-revelador es mucho mayor que la ocupada por la grieta. Esto se debe a la difusión del penetrante en el revelador, permitiendo resaltar grietas muy pequeñas y aumentar la capacidad de resolución del método de inspección. Por ello, una adecuada selección de los líquidos penetrante-revelador es de fundamental importancia para una buena inspección.

Una vez concluida una inspección con líquidos penetrantes, es recomendable limpiar la superficie ya que éstos tienden a retener humedad, incrementando el riesgo de corrosión, o bien afectando el uso posterior de la pieza. Este paso final puede realizarse mediante un enjuague con agua a presión, por inmersión, o con solvente, según el método aplicado.

Al final del ensayo, pueden aparecerse indicaciones falsas que pueden llegar a ser confundidas con defectos reales. Esto puede ser debido, a una incorrecta ejecución de alguna o varias fases, a la utilización de productos contaminados o a la geometría y construcción de la pieza. En primer lugar se recomienda

realizar un estudio de la pieza o superficie a inspeccionar, ya que puede ocurrir que exista una junta en la zona a ensayar, la cual, como es lógico, el ensayo la detectará como una grieta. En segundo lugar, se recalca la importancia de inspeccionar las piezas una vez terminado el lavado, a fin de detectar restos visibles de penetrante que habrá de eliminar la segunda limpieza. Por último, cuando se desconfíe de la falsedad de alguna indicación, no debe dudarse en repetir el ensayo desde el principio poniendo el máximo cuidado, ya que si la indicación vuelve a aparecer, con toda seguridad se trata de un defecto real [187, 188].

#### **4.4.2. Ensayo por Partículas Magnéticas**

Las primeras referencias, sobre el uso de propiedades magnéticas del hierro para detectar discontinuidades superficiales se refieren a inspeccionar tubos de cañones alrededor del año 1868. La inspección consistía, en colgar una aguja magnetizada a lo largo del cañón y cuando esta aguja pasaba en las proximidades de las discontinuidades, ocurría un cambio en la posición de la misma. El método de la aguja magnetizada perduro por mucho tiempo, hasta que L.E. BENSON sugirió el uso de limaduras de hierro, muy finas, en suspensión en líquidos diversos, y por esto es considerado el inventor de la técnica húmeda del ensayo por partículas magnéticas. Cuando un material ferromagnético se magnetiza, aplicando a dos partes cualesquiera del mismo los polos de un imán, se convierte en otro imán con sus polos situados, antagonistamente en los puntos de contacto de los polos del imán original. Sus partículas se orientan y se crean en su interior unas líneas de fuerza que van desde un polo del imán inductor al otro, pasando por una zona inerte que se denomina línea neutra, ver figura 4.4. Podemos imaginarnos la corriente de un río que fluye según líneas paralelas si el cauce es homogéneo. Cuando existe alguna alteración en el interior del material, las líneas de fuerza desbordan por los lados al igual que las aguas cuando se encuentran con un obstáculo en el cauce, ver Figura 4.3 y 4.4.



Figura 4.3. Inspección de partículas magnéticas [181]

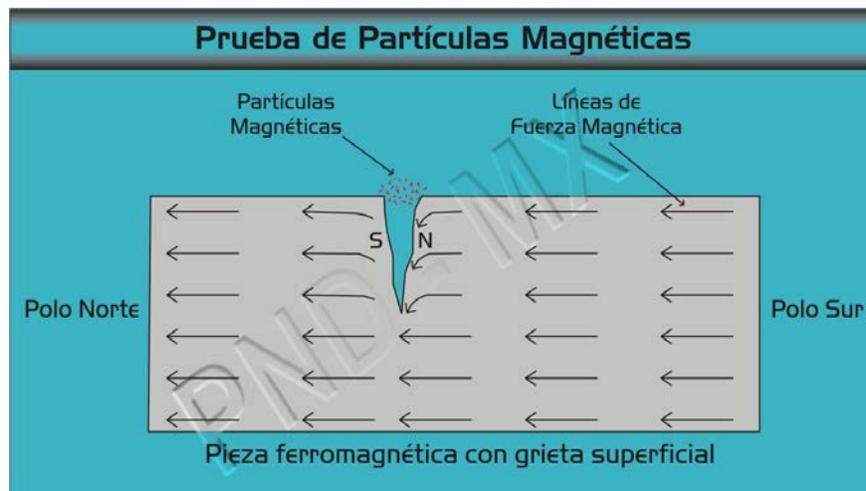


Figura 4.4. Línea de fuerzas magnéticas [182]

La técnica, de detección de defectos por medio de las partículas magnéticas, consiste, en someter la pieza que se va a inspeccionar a una magnetización adecuada y espolvorear sobre ella finas partículas de material ferromagnético. Estas se dispondrán sobre aquellas zonas en donde exista una variación del material capaz de producir una alteración del flujo magnético uniforme, reproduciendo sobre la superficie de la pieza imantada el trazado de las posibles alteraciones del material. La alteración del flujo magnético puede ser debida a una grieta superficial del material, pero también pueden alterar dicho flujo de fallos internos del material producidos por poros o rechupes e inclusiones de materias que tengan menor permeabilidad magnética que el material inspeccionado.

La experiencia demuestra que, con el método de las partículas magnéticas, las grietas superficiales se determinan de forma nítida, mientras que los defectos internos tales como porosidad, inclusiones, segregaciones o rechupes internos se detectan de forma menos concreta y dejan de dar indicaciones fiables cuando se encuentran a una distancia de la superficie superior a 6 mm.

Los defectos superficiales, son los más fácilmente de localizar con el método de inspección de partículas magnéticas, pero además son mucho más peligrosos que cualquier otro tipo de defecto. Este último punto es particularmente cierto, porque los esfuerzos son usualmente mayores en la superficie, de manera que cualquier interrupción de la superficie constituye una concentración del punto de esfuerzo. La naturaleza escarpada de la rajadura superficial la convierte en una causa de esfuerzos más importantes que la mayoría de los defectos subsuperficiales. La indicación producida por todas las rajaduras superficiales es más conclusiva y no deja dudas en cuanto a su presencia. Los defectos que corresponden a esta categoría, indicación que son casi siempre causa de rechazo [189].

#### **4.4.2.1. Procedimiento de Partículas Magnéticas**

La metodología de partículas magnéticas son cuatro, su objetivo principal es detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferromagnéticos y, son las siguientes [190, 191]:

1. Método continuo, que significa simplemente que la operación magnetizadora se conduce simultáneamente con la aplicación de las partículas de inspección.
2. Método residual en el cuál las partículas se aplican después que se ha desconectado la corriente magnetizadora.
3. Método repentino de magnetización, donde se fuerza a través de la pieza un aumento repentino momentáneo, extra alto, de la corriente, mientras que durante el resto del tiempo la corriente fluye a un valor más bajo.
4. Método de corriente alterna que requiere el uso de una corriente alterna.

#### **4.4.3. Ensayo Radiográfico**

La radiografía es un proceso de prueba no destructivo, proporciona un registro permanente de película visible, que muestra la condición interna de un producto, mediante el cual se puede determinar el grado de perfección de una pieza. La evidencia de este registro de película o radiografía puede sugerir

cómo pueden hacerse mejoras en un proceso. Este método de prueba no destructiva es superior a otros métodos por varios motivos. Cuando se emplea una inspección radiográfica para revisar una pieza, no se altera ni se daña o se destruye en ninguna forma la utilidad de la pieza. Se puede usar la radiografía para inspeccionar piezas fundidas, soldaduras y componentes montados. También se pueden inspeccionar mediante la radiografía diferentes metales ferrosos y no ferrosos, lo mismo que materiales no metálicos como piezas de cerámica y de materiales plásticos.

Los rayos X se producen cuando un flujo de electrones de alta velocidad impacta al material. Esto se debe a la detención o deflexión repentina originada por los átomos del material impactado. Por lo tanto, para producir rayos X se requiere tres requisitos básicos:

- 1) Se debe proveer una fuente alimentadora de electrones.
- 2) Debe haber una fuerza que les imprima a los electrones una alta velocidad.
- 3) Los electrones acelerados deben impactar o bombardear el material.

Los rayos X, se producen cuando los electrones impactan al material. Cuando la película se expone a la acción del rayo X, como se observa en la Figura 4.5, se produce la radiografía, siendo la indicación del defecto las diferentes sombras de color negro que se observan. Una característica distintiva de los rayos X es su corta longitud de onda, la cual es aproximadamente 1/10.000 de longitud de onda de la luz. Esta corta longitud de onda es lo que permite que el rayo X penetre en los materiales que absorben o reflejan la luz ordinaria. El poder de penetración o la energía de los rayos X, está en relación inversa a la longitud de onda. Mientras más corta es la longitud de onda, más alta es la energía; y mientras más larga es la longitud de onda, más baja es la energía.

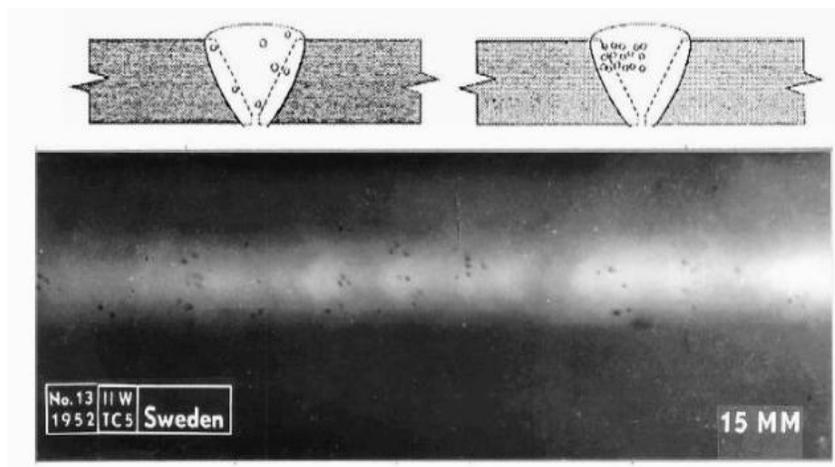


Figura 4.5. Defecto de porosidad presente en la radiografía [192]

Los rayos X tienen todas las propiedades de la luz visible. La luz visible es refractada por el vidrio y puede ser enfocada en instrumentos tales como cámaras, microscopios, telescopios y anteojos. Los rayos X también son refractados pero a un grado tan leve que, para descubrir esta refracción, se deben efectuar los experimentos más sutiles que a continuación se dan a conocer tales algunas de las propiedades de los rayos X que los hacen útiles para efectuar la inspección.

- 1) Son invisibles y pasan a través del espacio sin transferencia de materia.
- 2) Se propagan en línea recta.
- 3) No son afectados por los campos eléctricos ni magnéticos.
- 4) Se propagan con la velocidad de la luz.
- 5) Se componen de bandas anchas de longitudes de onda.
- 6) Se producen por el impacto de iones en la materia.
- 7) Se muestran en la película fotográfica por la densidad.
- 8) Pueden ionizar los gases y cambiar las propiedades eléctricas de los líquidos y los sólidos.
- 9) Son diferencialmente absorbidos.

Cuando se revelan las películas de radiografía, se hace visible la imagen invisible que se produce en la película por la exposición a los rayos X, a los rayos gama o a la luz. El revelado se lleva a cabo bajo una luz amortiguada de un color al cual la película es relativamente insensible. Primero se sumerge la película en una solución reveladora, que hace que las zonas expuestas a la radiación se vuelvan oscuras. El intérprete debe identificar y determinar el grado de cualquier imperfección que esté indica. La inspección visual de los materiales deberá proceder a la interpretación radiográfica, ya que las condiciones de la superficie se ven claramente en la radiografía. Si no se hace la

inspección visual, puede llegarse a la conclusión de que una imperfección indicada en la película es causada por un defecto interno cuando en realidad se debe a un defecto superficial.

Finalmente, uno de los requisitos más importantes para el laboratorio de pruebas no destructivas con rayos X o rayos gama, es que proporciona seguridad al personal. Si una persona se está preparando para usar equipo radiográfico, un experto adiestrado en radiación deberá comprobar la instalación radiográfica y las medidas de seguridad que se han adoptado. Cualquiera de los tejidos del cuerpo, pueden ser lesionados por la exposición excesiva a los rayos X o a los rayos gama. La sangre, la piel y algunos órganos internos son particularmente sensitivos a esta exposición excesiva. A menos que se mantenga al mínimo la cantidad de exposición a los rayos X o a los rayos gama, el efecto acumulativo de esta exposición puede causar lesiones al cuerpo. Las personas que trabajan en el departamento de radiografía deben protegerse siempre en forma adecuada contra la radiación. Antes de poner a funcionar el equipo, deberán adaptarse medidas protectoras para asegurarse de que no hay peligro para las personas que trabajan en zonas cercanas. Deberán tomarse medidas de seguridad especiales, cuando se hace la radiografía en el taller, y no en el departamento de radiografía protegido. La exposición del personal puede producirse por los rayos directos de la fuente generatriz y por los rayos esparcidos [182, 183, 193, 194, 195].

#### **4.4.4. Ensayo por Corrientes Parásitas**

El control de calidad de las estructuras y componentes metálicos, dan lugar a inspección no destructiva, utilizando equipos electrónicos de diseño especial, capaces de medir el valor de un flujo de corrientes eléctricas, de magnitudes muy pequeñas, denominadas “de Foucault” ó “Parásitas”.

La medición de estas corrientes, para cuyo efecto son inducidas por los equipos en los metales sometidos a prueba, permiten conocer la actual condición de servicio de la pieza en inspección, la condición de su tratamiento térmico, el tipo de metal o aleación, la dureza del metal etc., atendiendo a la conductividad eléctrica de dicho metal, su permeabilidad, homogeneidad y masa.

Las corrientes parásitas, son un flujo circular de electrones libres fluyendo en un conductor que se encuentra sometido a la influencia de un campo electromagnético. Cada electrón, tiene su propio campo magnético siendo este extremadamente débil. Mediante el uso de una bobina que forma parte de un equipo especialmente diseñado para tal efecto, se induce un campo electromagnético en un conductor, dicho campo obliga a los electrones libres del metal a entrar en una senda o camino perpendicular a él. Al circular estos

electrones en una misma dirección, el campo magnético de cada uno se combina para formar un campo magnético mayor alrededor de las corrientes parásitas (campo magnético secundario) que opone una cierta resistencia al campo magnético de la bobina probadora (campo magnético primario).

La resistencia que el campo magnético secundario opone al campo primario es detectada electrónicamente por un instrumento a través de sus circuitos, como un cambio en la impedancia de la bobina probadora.

La oscilación de la aguja del instrumento, muestra las variaciones del campo electromagnético generado por la bobina inductora. Como se muestra en la Figura 4.6, un patrón típico de corriente parásita que está deformado por la discontinuidad de un metal. La bobina de prueba y las líneas de flujo están ubicadas en una posición cercana al metal. El instrumento indicará, por medio de señales, como luces o un marcador, el efecto que es producido por la discontinuidad, proporcionando una cuidadosa medición de la cantidad de impedancia (resistencia al flujo de la corriente o resistividad) que produce en el circuito.

El personal inexperto no deberá tratar de interpretar los resultados que se obtienen al hacer la inspección con corriente parásita. La interpretación errónea puede hacer que se rechacen piezas servibles y que se acepten piezas defectuosas.

Esta técnica puede ser empleada para identificar una amplia variedad de condiciones físicas, estructurales y metalúrgicas en materiales metálicos ferromagnéticos y en materiales no metálicos que sean eléctricamente conductores, ver Figura 4.6.

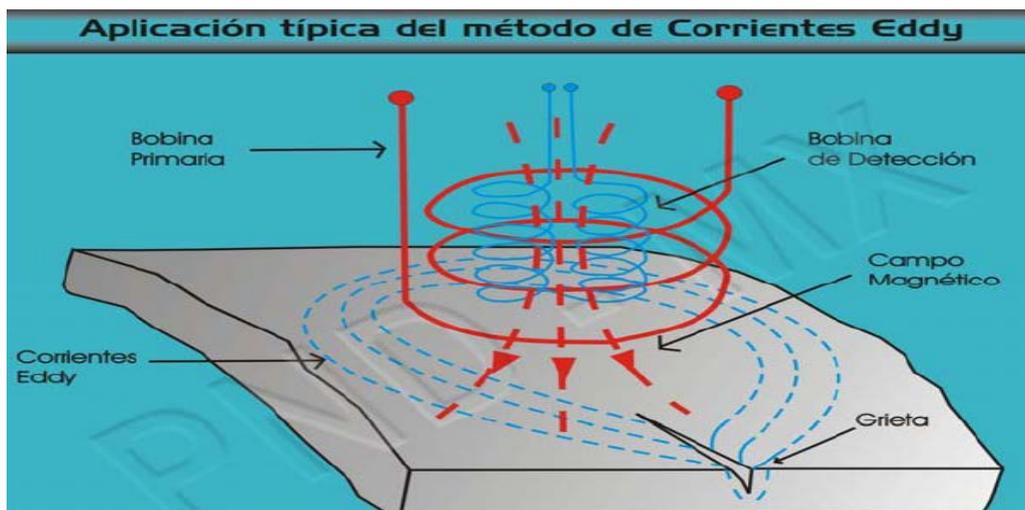


Figura 4.6. Corriente parasita [196]

El movimiento de la aguja en el cuadrante del instrumento es una indicación de que hay un defecto en el material que se está probando. Después, de que se han ajustado los controles y se ha preparado el instrumento para su funcionamiento, se debe usar un buen criterio al evaluar el movimiento de la aguja, a menos que se use la prueba en una situación de "pasa o no pasa".

En este caso, cualquier desviación de la aguja, producida por un defecto, se considera suficiente causa para rechazar una pieza. Las normas locales pueden determinar cuánta desviación de la aguja se permite antes de considerar una pieza como inservible. Varias condiciones variables influyen en las corrientes parásitas. En general, cualquier cosa que altere el patrón de corriente parásita en un conducto puede llamarse una variante. Cuando una rajadura produce un cambio importante en el patrón de la corriente parásita, puede descontarse en su mayor parte la influencia de un cierto número de variantes pequeñas. Hay variantes que pueden influir en los resultados de la prueba. Cuando se inspeccionan aleaciones para ver si tienen rajaduras, el mismo instrumento frecuentemente no es adecuado para probar ambos tipos de materiales. Una variante que con frecuencia es compensada, es el efecto de la distancia de la sonda a la pieza de prueba. Cuando se efectúan evaluaciones de la corriente parásita sosteniendo a mano el instrumento, en cuyo caso son inevitables pequeños cambios en la distancia de la sonda a la superficie de prueba, o el ángulo de la sonda con respecto a la superficie de prueba, la reacción del instrumento a estas variantes puede causar una desviación de la escala de 10%. Cuando se están seleccionando materiales, se encontrará que muchos metales se pueden distinguir unos de otros por su conductividad. La unidad de prueba se puede calibrar con los especímenes de conocida conductividad que se suministran con el instrumento. Esto hace posible descubrir las piezas que han sido tratadas térmicamente en forma incorrecta y separar las piezas mixtas [197, 198, 199].

#### **4.4.5. Ensayo por Ultrasonidos**

Lo mismo que en el caso de la inspección por corrientes parásitas, la finalidad de la ultrasónica es localizar defectos. Este método de inspección ha ido tomando cada vez mayor importancia. En años anteriores, el equipo de inspección ultrasónica era bastante complicado para su operación por personal de poca experiencia y sólo lo manejaban trabajadores técnicamente adiestrados. Ahora, gracias a los avances de la tecnología puede ser operado por personas que poseen habilidades básicas en este tipo de ensayo.

La inspección ultrasónica implica el uso de vibraciones de alta frecuencia para localizar defectos dentro de diferentes materiales. Esto es posible por la característica que tienen la mayoría de los materiales estructurales de formar eco o reflejar el ultrasonido cuando hay una interrupción, rotura o inclusión en

el mismo. El ultrasonido se genera en pequeñas ráfagas o pulsaciones. Un sonido de alta frecuencia es conducido a la pieza de prueba que se está inspeccionando a través de una capa de aceite entre un cristal y la pieza (método de inspección por contacto) o a través de una columna de agua (método de inspección por inmersión).

Al chocar el ultrasonido contra la superficie de la pieza (como cuando se usa el método de pulsación y eco), gran parte del sonido se refleja y viaja hacia el cristal silente o de escucha. Cuando la onda sonora que regresa choca el cristal, se convierte en pulsaciones eléctricas diminutas que hacen que aparezca un "pico" o línea vertical en un tubo de rayos catódicos. Parte del sonido original que chocó contra la pieza y no se reflejó, continuará su recorrido dentro de la pieza y será parcialmente reflejado por la siguiente "superficie de contacto", la cual usualmente, es el lado opuesto de la pieza; entonces una parte de este último eco regresa al cristal y produce un segundo "pico" en la superficie del tubo. Este "pico", naturalmente, estará más hacia la derecha en el tubo que el pico que represento el eco desde la parte superior del material de prueba. El adelanto de izquierda a derecha de los picos representa la secuencia del tiempo de recorrido de las ondas sonoras. Como la velocidad del sonido es constante, esta secuencia de tiempo se traduce en espesor del material por la lectura directa en el tubo de rayos catódicos; luego, el espacio entre estos dos picos indicará el espesor total del material. En la Figura 4.7, se muestra un ejemplo de cómo ocurre esto. Si hay una discontinuidad (defecto o rajadura) en el centro de la pieza, aparecerá otro pico en el tubo de rayos catódicos entre los dos que representan la parte superior y la parte inferior (o la superficie y el eco) del objeto. Este pico se produce por la reflexión del sonido desde la nueva "superficie de contacto". Con el instrumento graduado a un alto nivel de sensibilidad por el uso de la alta frecuencia, se puede identificar e indicar, por medio de un pico legible, un defecto pequeño hasta del de imprenta.

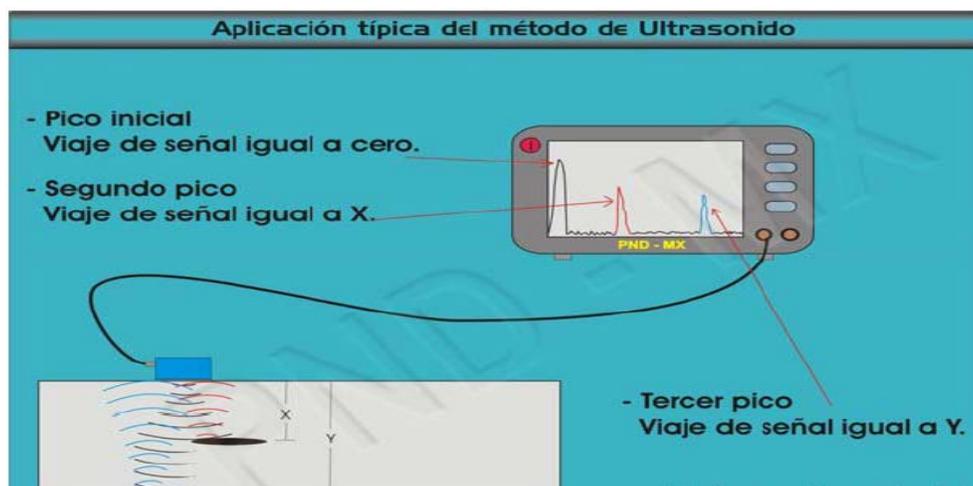


Figura 4.7. Ultrasonido [192]

El pico también puede interpretarse como la distancia a la cual está el defecto debajo de la superficie de la pieza de prueba.

La altura de los picos que indican un defecto es muy importante, ya que esta altura indica la zona aproximada de una discontinuidad pequeña (posiblemente menor que el diámetro del cristal). La evaluación de una discontinuidad en cuanto a su tamaño puede efectuarse comparando la señal del defecto natural con una señal proveniente del fondo plano de un agujero (un defecto artificial en un bloque de prueba convencional). El fondo del agujero estará aproximadamente a la misma distancia debajo de la superficie del bloque de prueba que el defecto natural debajo de la superficie que se está probando. Hay juegos de bloques de prueba que tienen estos defectos artificiales en forma de agujeros de fondo plano que están a distancias y diámetros designados desde la superficie. Cuando una persona se prepara para hacer una inspección ultrasónica, debe considerar ciertos factores que se aplican a la situación de prueba. Algunos de estos factores, tales como la selección de los accesorios apropiados para el tipo de instrumento y el tamaño y la frecuencia correctos del transductor, pueden ser controlados por el operario. Otros factores son condición de la superficie y apareamiento del transductor al material; estos factores determinan el medio de acoplamiento y los procedimientos de exploración que se han de usar. La condición del flujo del haz ultrasónico es también un factor, ya que se puede enfocar, reflejar y refractar en casi todos los medios, según el tipo de transductor usado [200, 201, 202, 203].

#### **4.5. Ventajas y desventajas de la NDE**

En la tabla 4.1, se da a conocer un resumen de sus ventajas y desventajas de los ensayos antes mencionados y otros disponibles en la industria petrolera.

Tabla 4.1. *Resúmenes de ventajas y desventajas* [204].

<b>Método NDI</b>	<b>Aplicación</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Óptico visual</b>	Detección de defectos superficiales	Uso simple en áreas donde otros métodos son poco prácticos	La confiabilidad del método depende de la habilidad y experiencia del usuario. Se requiere accesibilidad.
<b>Líquidos Penetrantes</b>	Detección de grietas superficiales en piezas metálicas	Uso simple, precisión, rapidez, fácil interpretación.	Los defectos deben llegar a la superficie y ser accesible al operador. El defecto puede estar cubierto por metal o pintura. Es necesario limpiar la pieza antes y después de cada inspección.
<b>Corrientes parásitas de alta frecuencia</b>	Detección de grietas superficiales en superficies metálicas, grietas, pitting, corrosión intergranular y condición de tratamiento térmico.	Útil para inspeccionar perforaciones de uniones para detectar grietas no detectables por métodos visuales o con tintas penetrantes. Rápido, sensible, portátil.	Se requiere un operador entrenado. Sensible a variaciones del material. Se requieren sensores especiales para cada aplicación y estándares de referencia.
<b>Corrientes parásitas de baja frecuencia</b>	Detección de defectos subsuperficiales en materiales metálicos. Medición de adelgazamiento y espaciado.	Útil para detectar presencia de grietas sin remover pernos o remaches o desarmar la estructura.	Se requiere un operador entrenado. Se necesitan sensores más grandes para el uso a baja frecuencia. Se requieren sensores especiales para cada aplicación y estándares de referencia.
<b>Emisiones acústicas</b>	Detección de delaminación, despegues, vacíos y núcleos aplastados en materiales compuestos y del tipo panel de abeja.	Basta con inspeccionar una superficie, lectura directa, no requiere retirar la pintura o preparación especial de la superficie.	Pierde sensibilidad al aumentar el espesor. Se requiere una fuente eléctrica.
<b>Rayos X</b>	Detección de fallas internas y defectos como grietas, corrosión, intrusiones y cambios de espesor. Elimina muchas veces la necesidad de desensamblar.	Tiene alta sensibilidad y deja un registro permanente.	Peligro por la radiación. Requiere personal entrenado y procesamiento de la placa. El plano de la grieta debe ser casi paralelo con el filamento de rayos X. Se requiere fuente eléctrica. Se requiere equipamiento especial para posicionar el tubo de rayos X y la placa.
<b>Partículas magnéticas</b>	Detección de defectos superficiales o cercanos a la superficie en materiales ferromagnéticos de cualquier forma o tratamiento térmico.	Principio simple. Fácil, portátil.	Se requiere un operador entrenado. Las partes deben ser limpiadas antes de la inspección y desmagnetizadas después. El flujo magnético debe ser normal al plano del defecto.
<b>Ultrasonido</b>	Detección de defectos superficiales o subsuperficiales, grietas, despegues, fallas en laminados y medición de espesor en la mayoría de los metales.	Rápido, confiable, fácil de operar. Los resultados se conocen inmediatamente y son altamente confiables. Altamente sensible y portátil.	Se requiere un operador entrenado y una fuente eléctrica. La orientación del plano de la grieta debe ser conocida para seleccionar el modo de la onda a utilizar. Se requieren estándares de prueba para establecer la sensibilidad del instrumento.

# CAPITULO V. APLICACIÓN NUMERICA

## 5.1 Descripción de los complejos petroquímicos

La exploración petrolera en la llamada Sonda de Campeche, localizada al sur del Golfo de México se inició en 1974; el pozo Chac 1 cortó una secuencia potente de lutitas del Cenozoico, además penetró una roca que Petróleos Mexicanos denominó provisionalmente y desde entonces, Brecha del Paleoceno, según determinaciones litológicas y apoyos bioestratigráficos preliminares, efectuados a partir de determinaciones de microfósiles foraminíferos obtenidos de esa unidad, Figura, 5.1.



Figura 5.1. Localización de pozos y líneas de sección estratigráficas estudiadas en la Sonda de Campeche, sur del Golfo de México [214].

Esa denominación informal de la roca productora de petróleo más importante de México fue estudiada desde 1982 por el autor de este artículo, con el apoyo del paleontólogo Román Landeros. Los registros geofísicos y los foraminíferos fueron integrados en el estudio de esa roca, donde se incluyeron varios pozos de esa región marina. Los resultados de ese estudio estratigráfico fueron publicados casi 20 años más tarde; en donde se determinó con precisión las relaciones estratigráficas de los sedimentos del Paleoceno, con las rocas del Cretácico Superior en el subsuelo del sur del Golfo de México. El estudio formal

mencionado fue complementado con cuatro secciones estratigráficas, cuya sección principal incluyó nueve pozos que cubren de norte a sur toda esa región marina de Campeche. La integración del registro de rayos gama y el soporte bioestratigráfico proporcionado por los microfósiles fue decisiva en ese estudio; con ello se determinaron las distribuciones estratigráficas y geográficas de la roca brecha mencionada, y de su unidad arcillosa suprayacente. El análisis bioestratigráfico de los foraminíferos planctónicos obtenidos de material de la brecha y de la unidad suprayacente a la misma, fue confrontado con propuestas mundiales de zonas de microfósiles, cuya finalidad fue ratificar las edades geológicas propuestas para las rocas analizadas en el subsuelo de la región marina de Campeche [214].

El petróleo ha sido determinante en México, para su economía, finanzas públicas, industria, desarrollo tecnológico, balanza comercial, y sus relaciones con el exterior, en particular con los Estados Unidos. Pero, más aún, ha sido un elemento determinante para la consolidación de México como Estado nacional y como un país con una economía emergente, con un nivel de desarrollo medio. Para los ideólogos y analistas políticos es y ha sido un tema de discusión fundamental el hecho de si el petróleo ha sido o no un elemento benéfico para el desarrollo del país. Pero de cualquier forma, lo que es claro es que el petróleo ha sido determinante en la vida de México desde las primeras décadas del siglo XX [215].

PEMEX Gas y Petroquímica Básica cuenta con 10 centros de procesamiento de gas:

1. *Complejo procesador de gas Nuevo PEMEX:* Localizado en el estado de Tabasco, tiene una capacidad para procesar 1,550 mmpcd de gas y cuenta con servicios auxiliares, laboratorio y talleres de mantenimiento.
2. *Complejo procesador de gas Cactus:* Ubicado en el estado de Chiapas, es uno de los más grandes del sureste del país; tiene una capacidad para procesar 1,800 mmpcd de gas.
- 3 *Complejo procesador de gas Ciudad PEMEX:* Ubicado en Tabasco, es el Complejo más antiguo del sureste. La primera planta de absorción inició sus operaciones en 1958.
4. *Complejo procesador de gas Area Coatzacoalcos:* Es el principal centro procesador y distribuidor de líquidos recuperados del gas, y cuenta con instalaciones en los Complejos la Cangrejera, Morelos y Pajaritos.
5. *Complejo procesador de gas La Venta:* Ubicado en el estado de Tabasco, cuenta con una planta de absorción y una planta criogénica.

6. *Complejo procesador de gas Matapionche*: Procesa gas amargo. Cuenta con diferentes tipos de plantas entre las que destaca una criogénica. Se localiza en la parte central del estado de Veracruz.

7. *Complejo procesador de gas Poza Rica*: Tuvo sus orígenes en años anteriores a la expropiación petrolera. Se encuentra localizado en la zona norte del estado de Veracruz.

8. *Complejo procesador de gas Reynosa*: Procesa gas húmedo dulce. Se encuentra ubicado al norte del país en la ciudad de Reynosa, Tamaulipas. Dentro de estos centros, los Complejos de Cactus, Nuevo PEMEX y Ciudad PEMEX en su conjunto procesan 92.8% del gas ofertado por PEP (Pemex Exploración y Producción).

La infraestructura de transporte está constituida principalmente por los gasoductos de PGPB (Pemex-Gas y Petroquímica Básica), que cuenta con dos sistemas, el Sistema Nacional de Gasoductos, de 8,704 km, y el sistema Naco-Hermosillo de 339 km [216].

A partir de mediados de la década de 1970 y en forma acelerada la industria petroquímica mundial, así como la industria de fertilizantes y ciertas industrias químicas inorgánicas pesadas han experimentado un profundo cambio estructural.

Las alzas en el precio del petróleo, las restricciones aplicadas al abastecimiento mundial provocaron precios elevados en los costos de producción y en los costos de inversión de productos y plantas petroquímicas y de fertilizantes, sufriendo los países desarrollados una fuerte retracción en su crecimiento, que ya habían alcanzado un cierto grado de saturación para la mayoría de los productos petroquímicos y que debido a la recesión económica mundial se agravó, de manera que los márgenes de rentabilidad de las empresas químicas se vieron afectados y con ello el crecimiento industrial se detuvo; que para reemplazar esto se concentró la atención en la producción y comercialización de productos químicos de alta especialización y tecnología, abriéndose así interesantes perspectivas a la industria de los países y regiones en desarrollo pero al mismo tiempo generándose problemas de abastecimiento de materias primas para la industrias dependientes, que los países latinoamericanos han experimentado recientemente [217].

La industria petroquímica básica mexicana, es un sector cuya producción ha tenido un crecimiento dinámico desde que surgió, en 1951, para abastecer la demanda de la industria nacional. Petróleos Mexicanos (PEMEX), es la que tiene el mayor número de plantas en operación, siendo éstas un total de 60 (ver Tabla 5.1) [218].

Tabla 5.1. *Industria petroquímica de PEMEX plantas y personal ocupado, 1997. PEMEX (1997), Memoria de Labores [218].*

Complejos petroquímicos	Números de Plantas
Cosoleacaque	7
Pajaritos	11
La Cangrejera	20
Morelos	8
Escolin	3
Tula	1
Salamanca	2
Independencia	5
Camargo	1
Reynosa	2

## 5.2 Descripción de campo petrolero en aguas someras

La Sonda de Campeche oculta valiosa información geológica petrolera, es preciso conocerla. Su gran potencial petrolero, actualmente explotado, se distribuye en varios horizontes no consecutivos, correspondientes a potentes secuencias sedimentarias de origen marino, de aproximadamente 6,000 m de espesor.

La falta de estudio geológico petrolero integral, para acceder a conocer la distribución razonada de tan importante tesoro. En 1974 se inició la exploración petrolera en aguas someras de la Sonda de Campeche, con la perforación del pozo Chac 1, resultando ser productor de aceite y gas en las calizas (brecha) del Cretácico Superior. Esa roca fue posteriormente denominada formalmente Formación Cantarell. Hasta el momento, esos resultados exploratorios no han sido integrados regionalmente, en planos y por edades geológicas, para un mejor conocimiento petrolero de esa vasta región del sureste de México. Por falta de un programa de investigaciones exploratorias.

La calcarenita Kumaza, corresponde a una roca porosa y permeable, cuyo espesor varía de 6 a 190 m, los estratos que conforman esa unidad están intercalados entre dos cuerpos potentes de sedimentos arcillosos, de origen abisal, aún no definidos cronoestratigráficamente. La calcarenita Kumaza está distribuida en un área limitada al NW de Campeche, esa roca se localiza parcialmente en los campos Ku-Maloob-Zaap.

Un caso insólito, de representación de las estructuras geológicas, corresponde a la parte aún inexplicada del plano geológico petrolero de los campos Ku-Maloob-Zaap.

Las expectativas de éxito en exploración petrolera conducen a proporcionar resultados favorables, al apoyarse en métodos de investigación petrolera basados en material de subsuelo. Esa región es productora de petróleo en los campos Ku-Maloob-Zaap en estratos de diferentes edades; la explicación de dos de los principales yacimientos, Eoceno y Cretácico Superior, recae en reconocer eventos estructurales y estratigráficos que afectaron esa región, donde se localizan esos campos [219].

El activo Ku Maloob Zaap (KMZ) se localiza frente a las costas de Tabasco y Campeche, a 105 kilómetros al noreste de Ciudad del Carmen, Campeche. Este activo integral Ku Maloob Zaap se extiende en un área de 149.5 kilómetros cuadrados y es uno de los principales productores de crudo pesado [220], esto es debido al descubrimiento del campo Ku en 1980 por el pozo Ha-1A y posteriormente se descubrieron los campos Maloob en el año 1984 y Zaap en el año 1991. En la actualidad este activo se conforma por los campos Ku, Maloob, Zaap, Bacab y Lum, los cuales toman su nombre en honor a la cultura maya que predominó en la zona de Campeche y Yucatán [221], la Figura, 5.2 muestra de Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste hallándose el activo Ku Maloob Zaap, este complejo cuenta en la actualidad con 31 plataformas marinas de las cuales 2 son plataformas de enlace, 5 habitacionales, 18 de perforación, 5 de producción y 1 de telecomunicaciones [222].

Este campo descubierto en 1979, el yacimiento Ku-Maloob-Zaap, es el vigésimo tercero en el mundo, con reservas probadas equivalentes a 4 mil 900 millones de barriles de crudo, es cual es considerado como el relevo del gigante Cantarell, el gobierno federal abrió la puerta a la inversión privada. Cuya inversión serán más visibles en la construcción de las plataformas de producción PB-KU-M y PB-KUS, en la Sonda de Campeche, que forman parte “de un ambicioso programa para elevar la producción de la región petrolera de Ku-Maloob-Zaap”. Localizado a 195 kilómetros al noreste de Ciudad del Carmen, el yacimiento, compuesto por los campos Ku, Maloob, Zaap, Bacab y Lum, será objeto de inversión, pues el proyecto de desarrollo prevé de momento la construcción de 17 plataformas: siete de perforación, cuatro de producción, cuatro habitacionales, una de telecomunicaciones y una de enlace. También 42 ductos de diferentes diámetros, que suman alrededor de 200 kilómetros para interconectar las nuevas plataformas con la infraestructura actual, y en la incorporación de una Unidad Flotante de Producción, Almacenamiento y Descarga para apoyar el procesamiento y almacenamiento de crudo, la cual tendrá capacidad para procesar 200 mil barriles de crudo y 120 millones de pies cúbicos de gas al día y permitirá recibir hasta 200 mil barriles. Cuyo nombre con el cual está identificado, es Yu’um K’ak na’b (Señor del Mar, en lengua maya) [223],

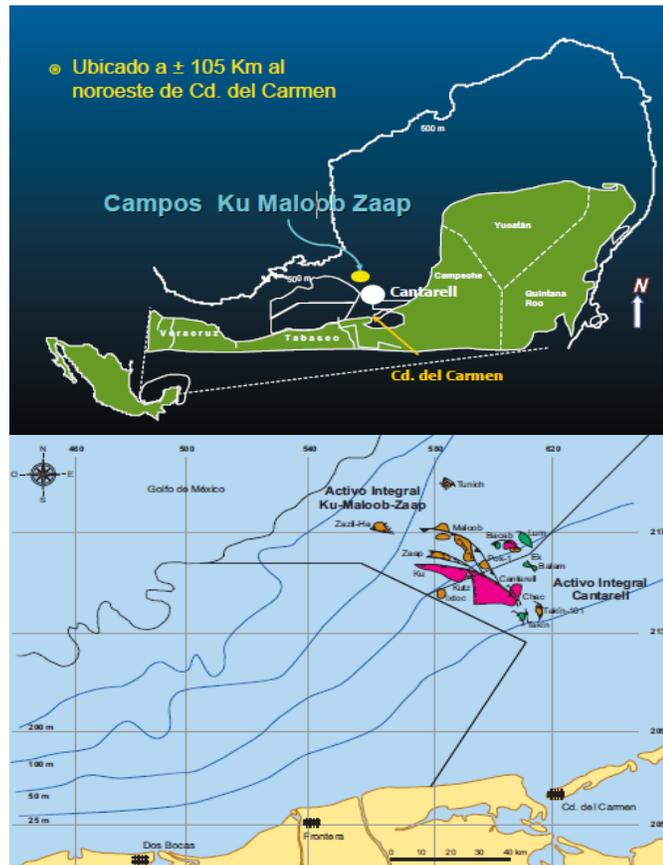


Figura 5.2. Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste [222]

Asimismo, este activo integral tiene considerado a futuro la instalación de otros sistemas de bombeo, de deshidratación y desalado, los cuales hacen necesario contar con un sistema de generación eléctrica en una nueva plataforma de generación (PG-ZAAP-C).

Esta nueva plataforma tendrá como propósito principal abastecer de energía a las plataformas periféricas es decir que son aquellos que no están unidas físicamente al complejo Ku-Maloob-Zaap: PP-Maloob-A, PP-Maloob-b, PP-Maloob-C, PP-Maloob-D, PP-ZAAP-A, PP-Zaap-B Y PP-Zaap-D, a través de cable submarino, en la Figura, 5.3 se muestra el complejo Ku-Maloob-Zaap [222]



*Figura 5.3.* Red de plataformas marinas del complejo Ku-Maloob-Zap en la época actual [222]

Así como el activo Ku-Maloob-Zaap, existben otros como: Akal, Atun, Isla de lobos, Nonoch, Pol chuc, Caan, Batb, Uech, Balan, Kax, Sihil, Marsopa, Abkatún, Och, Arenque, Ixtoc, Lankahuasa, Xanab, Homol Bagre A, Bagre B, Bolontiku, Yum, Manik, Carpa, Bacab, Ektaratunich, Kanaab, Kutz, Kab, Sinán, Ixtal, Takin, May, Yaxche, Lum.

Se destaca la posibilidad de establecer una estrategia integral de sistema de mejorar estos campos productores y así como también la exploración de los plays subsalinos, permitiendo incrementar la reserva para el 2026 [224]

### **5.2.1. Descripción de la plataforma**

En la Sonda de Campeche, México tiene más de 100 plataformas marítimas. Las plataformas marinas son estructuras metálicas sustentadas en pilotes profundamente incrustados en el lecho marino siendo esta de tipo fijos o a si mismo serian semifijo o flotante, de manera que son instalaciones que suelen tener muchos pisos, formando verdaderos y raros edificios, su parte inferior es un muelle y la superior un helipuerto. Con frecuencia estas instalaciones son verdaderos conjuntos modulares de varias plataformas, una principal y otras satélites, unidas por gigantescas tuberías que a la vez sirven de estructuras para los puentes colgantes formando una notable geometría de ductos y conexiones, además de la instalación de equipos estáticos y dinámicos como se muestra en la Figura 5.4 [225].



*Figura 5.4.* Uniones de Plataformas marinas [226]

Normalmente los tipos de plataformas fijas se le dominan “Jacket”, debido a que sus columnas principales son fabricadas con tubos de acero huecos con la finalidad de que en su interior alojen a los pilotes formando así un sistema de camisa y así los pilotes a través de las piernas penetran al subsuelo para asegurar su estabilidad.

Generalmente las plataformas marinas de tipo convencional están integradas en superestructura, subestructura.

Con respecto a la superestructura, se refiere a la parte de la plataforma que se localiza sobre el nivel medio del mar y que soporta el equipo necesario para el servicio del sistema. La superestructura se apoya sobre los pilotes que sobresalen de las piernas de la subestructura (punto de trabajo) y está constituida principalmente por plantas estructurales, marcos longitudinales y marcos transversales a base de secciones tubulares, vigas armadas y perfiles laminados como vigas IR, canales y ángulos.

Así mismo, la subestructura, es la parte de la plataforma que se localiza en la superficie nivel medio del mar (SNM) hasta el fondo del lecho marino o línea de lodo, como se da a conocer en la Figura 5.5. Esta parte de la plataforma proporciona rigidez necesaria para distribuir los efectos de las cargas ambientales principalmente y de los equipos de servicio a la cimentación. Esta

parte de la estructura va soldada a los pilotes en la parte superior y se construye principalmente por plantas estructurales, marcos longitudinales y marcos transversales a base de secciones tubulares, entrelazadas entre sí, que llegan a formar conexiones [227].

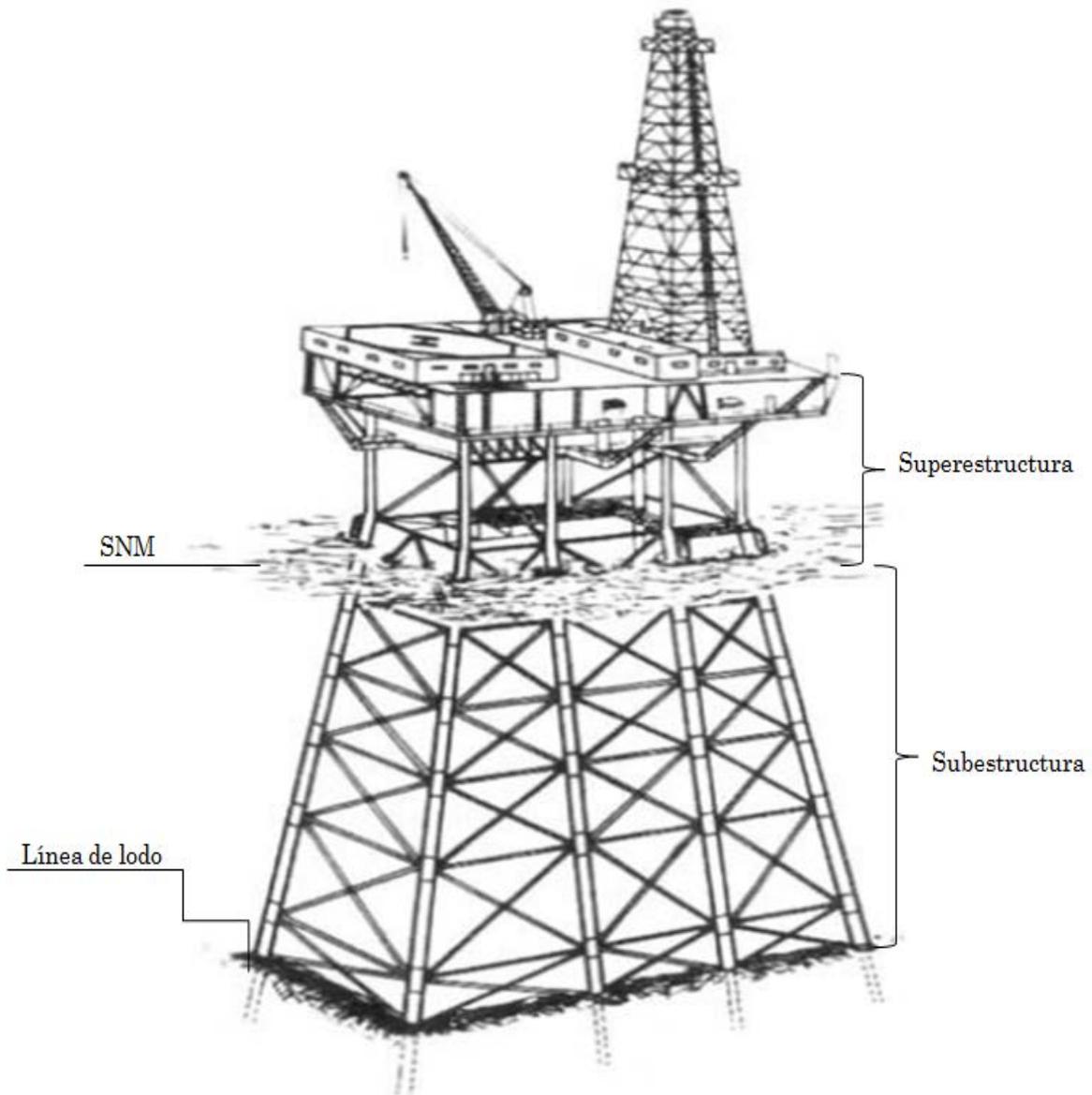
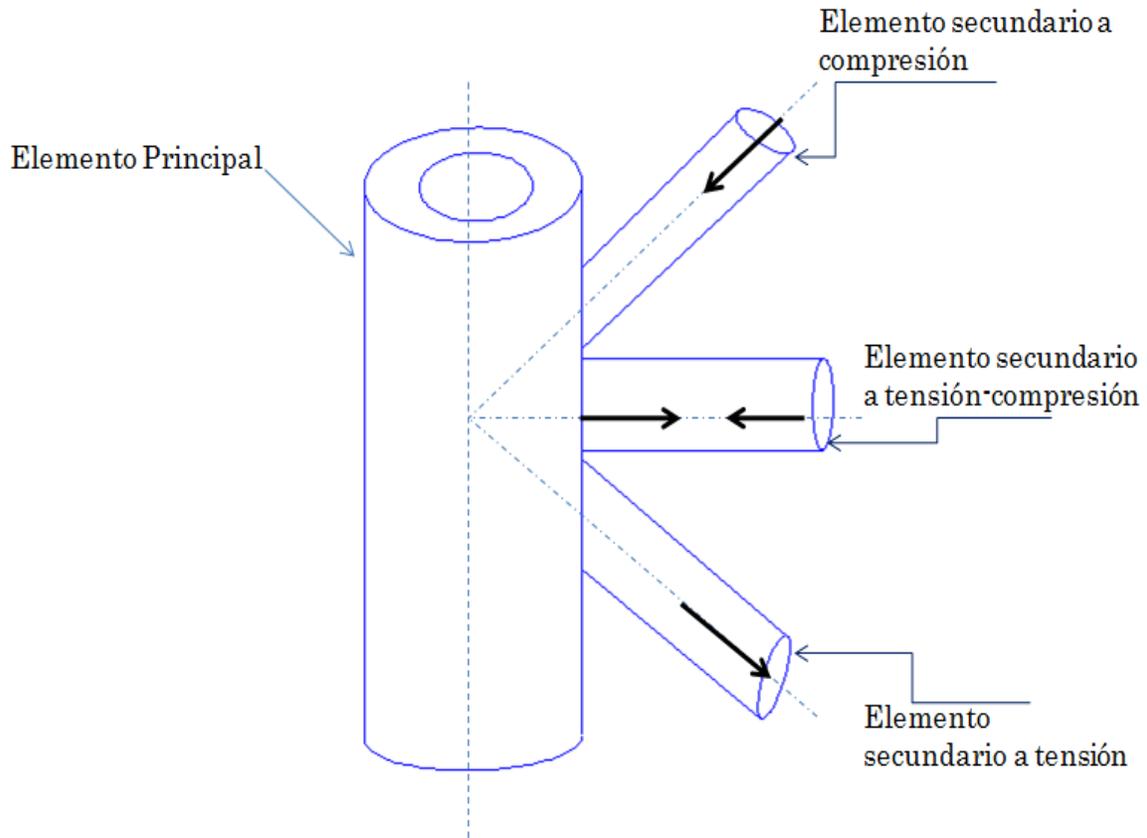


Figura 5.5. Integración de plataforma marina [225]

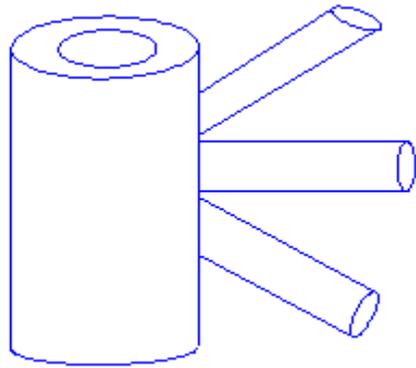
A estas conexiones se le define como aquella parte de la estructura donde la sección transversal de uno o más elementos secundarios tubulares están unidos mediante soldadura a la superficie exterior de un elemento tubular principal como se ve en la Figura 5.6.



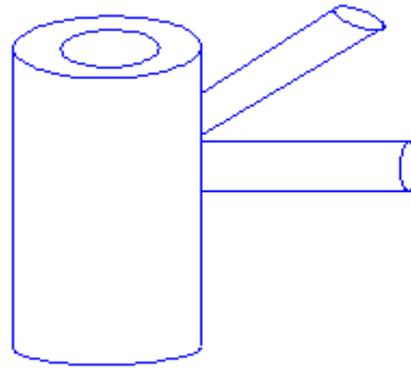
*Figura 5.6. Conexión tubular [228]*

Estas secciones tubulares de pared delgada son preferibles en plataforma marina como elemento estructural debido a su sección simétrica transversal y forma ofrecen un buen desempeño ante el oleaje.

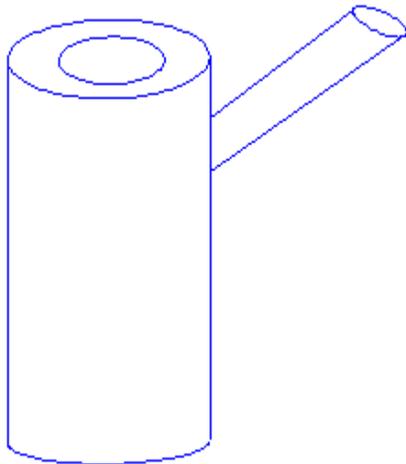
Del mismo modo, se generan diferentes configuraciones que se pueden obtener en nodos estructurales tubulares u de juntas, en el plano o en el espacio. En el plano las juntas son de tipo “T”, “K”, “Y”, “TY”, “TK”, o combinaciones de las mismas, dependiendo de la posición de los elementos secundarios, como se muestran en la Figura 5.7, de los tipos de nodos comúnmente empleados en la subestructura de las plataformas marinas fijas de tipo “Jacket”.



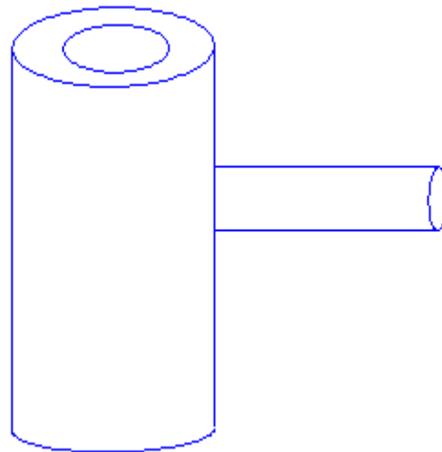
Nodo "KT"



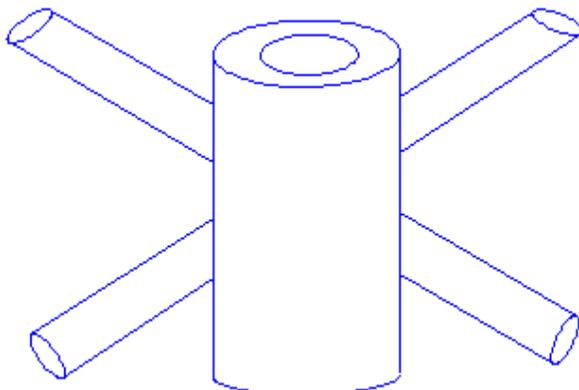
Nodo "TY"



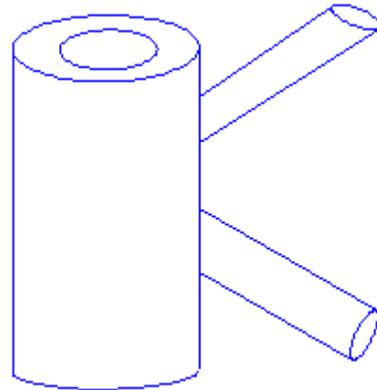
Nodo "Y"



Nodo "T"



Nodo "X"

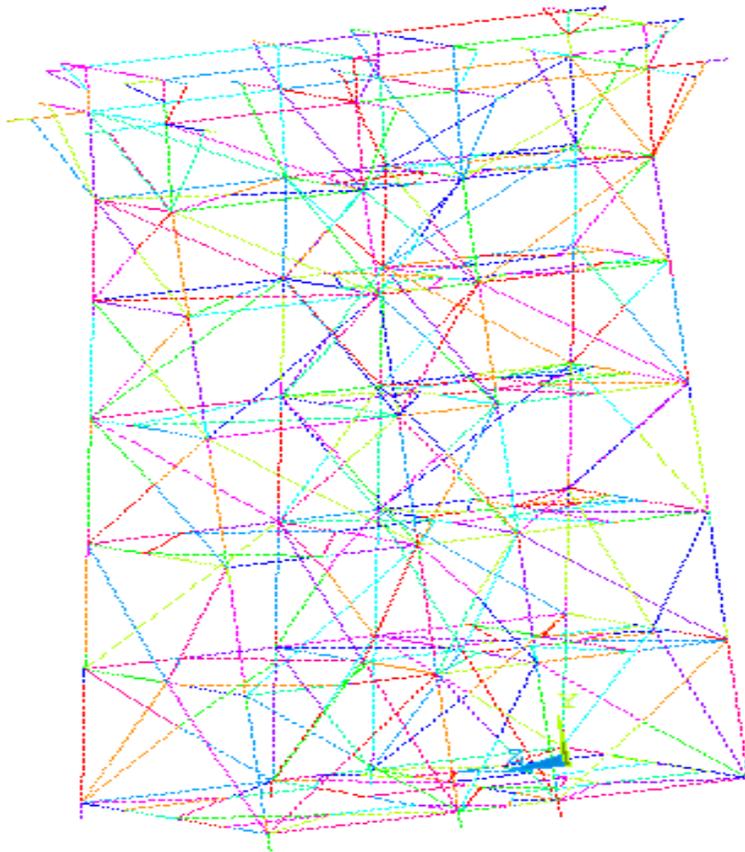


Nodo "K"

*Figura 5.7. Nodos estructurales, [228]*

### 5.3. Aplicación numérica

La estructura de la plataforma marina que se consideró para este estudio se muestra en la Figura 5.8. El sistema está constituido de elementos estructurales tubulares en forma de torre fabricado con acero ASTM A-36. La plataforma consta de una superestructura y una subestructura; en este arreglo, la superestructura tiene dos cubiertas, una inferior y una superior. La cubierta inferior se localiza a un nivel de +19.100 m sobre el nivel del mar (SNM) y la cubierta superior se ubica a un nivel de +27.939 m SNM. Las cubiertas están soportadas por 8 columnas tubulares, cuyo diámetro, espesor y material se diseñaron para soportar las cargas inducidas. La separación entre columnas es de 12.192 m en el sentido longitudinal y de 13.716 m en el sentido transversal. Por otro lado, la subestructura es del tipo piramidal, de 8 columnas apoyada en el lecho marino; 4 ejes transversales y 2 longitudinales. El punto de trabajo se ubica en la elevación +7.315 m y el lecho marino se encuentra a una elevación de -82.250 m. Finalmente, se debe mencionar que la estructura se consideró empotrada en el lecho marino.



*Figura 5.8.* Marco tipo octapodo de plataforma marina

La plataforma marina está sujeta a cargas externas, originados por la fuerza de oleaje, la fuerza de viento y las cargas estáticas y dinámicas, para el análisis de riesgo aplicado a la integridad estructural, se construyen modelos de elementos finitos, de los cuales se discretizan en nodo estructurales que sirve para encontrar las deformaciones y los esfuerzos que existen entre ellos y determinar después su integridad estructural.

#### 5.4. Característica de la plataforma marina

En la Tabla 5.2, se muestran las características geométricas de la plataforma marina y los datos del acero utilizados en su construcción.

Tabla 5.2. *Característica geométrica de plataforma*

Características		Propiedades mecánicas	
Material	Acero	ASTM A-36	API-2H Grado 50
Longitud	36.57	Resistencia a la tracción	4200.00 a 5600.00 kg/cm <sup>2</sup>
Ancho	13.716	Módulo de elasticidad del acero (E)	2.1 x 10 <sup>6</sup> kg/cm <sup>2</sup>
Torre	1 tipo armadura	Modulo de Poisson ( $\nu$ )	0.30
		Esfuerzo de fluencia G.B. ( $\sigma$ )	2500.00 kg/cm <sup>2</sup>

#### 5.5. Simulación numérica de la plataforma marina

Para realizar el análisis estructural de la plataforma marina, se empleo el software Ansys versión 11, que emplea el método de los elementos finitos, el cual posee los siguientes pasos.

Preproceso. Se describe la geometría (construcción del modelo matemático), propiedades del material, cargas y condiciones de fronteras, esta etapa se realiza también la descritización del modelo continuo.

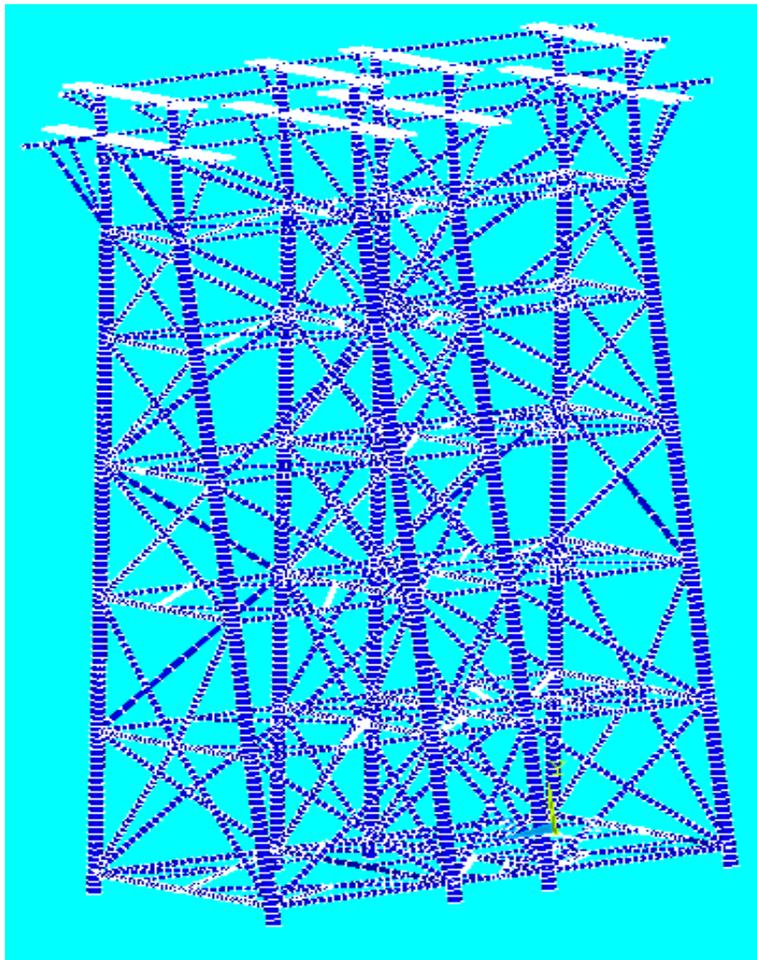
Tipo de análisis. En esta etapa el software genera las matrices que describen el comportamiento mecánica de los elementos estructurales y las resuelve para determinar los valores de los esfuerzos y deformaciones

Posproceso general. En esta etapa se realiza la revisión grafica y numérica de los resultados para realizar el reporte final. En análisis típicos de esfuerzos, las graficas que se incluyen, son las deformaciones, esfuerzos y probablemente animaciones.

## 5.6. Construcción del modelo general de la plataforma marina

Para la construcción del modelo matemático se definió el origen de las coordenadas  $(0, 0, 0)$ , al inicio del nodo 1, aguas abajo en línea de lodo, donde se apoyo la pierna de la plataforma marina. La abscisa se halla ubicado en sentido transversal de la plataforma marina, la ordenada en el sentido vertical y la “z” en la dirección de aguas abajo y arriba, estas coordenadas generalizadas se muestran en la Figura 5.9.

Elementos entre coordenadas. Después se trazaran las líneas entré coordenadas para unir los puntos (Keypoints en el programa Ansys) de este modo se generan los elementos, por lo que el modelo general de la plataforma queda como se ilustra en la Figura 5.9, en la Figura 5.10 se muestran los elementos estructurales con que se construyo el modelo general de la plataforma marina.



*Figura 5.9.* Elementos del modelo general

## 5.7. Análisis numérico con cargas y combinaciones

Para el análisis estructural de plataformas marinas se utilizaron las diferentes condiciones de cargas como son, las cargas gravitacionales y cargas laterales, en la Tabla 5.3, se da conocer dichas cargas utilizadas para este análisis.

Tabla 5.3. *Tipos de carga*

Condición de carga	Combinaciones			
	1	2	3	4
Peso propio	✓	✓	✓	✓
Cargas muertas y accesorios de subestructura	✓	✓	✓	✓
Cargas muertas y accesorios de superestructura	✓	✓	✓	✓
Equipo de perforación (393 ton)	✓	✓		
Cargas de viento, oleaje y corriente generadas por una tormenta de 10 años (8 direcciones a 45°)	✓			
Cargas de viento, oleaje y corriente generadas por una tormenta de 100 años (8 direcciones a 45°)			✓	✓

Siendo un total de 18 combinaciones, que se utilizaron para este análisis, de acuerdo a la delimitación de la investigación. En la Figura 5.10, se muestra el modelado de la plataforma marina con condiciones de fronteras.

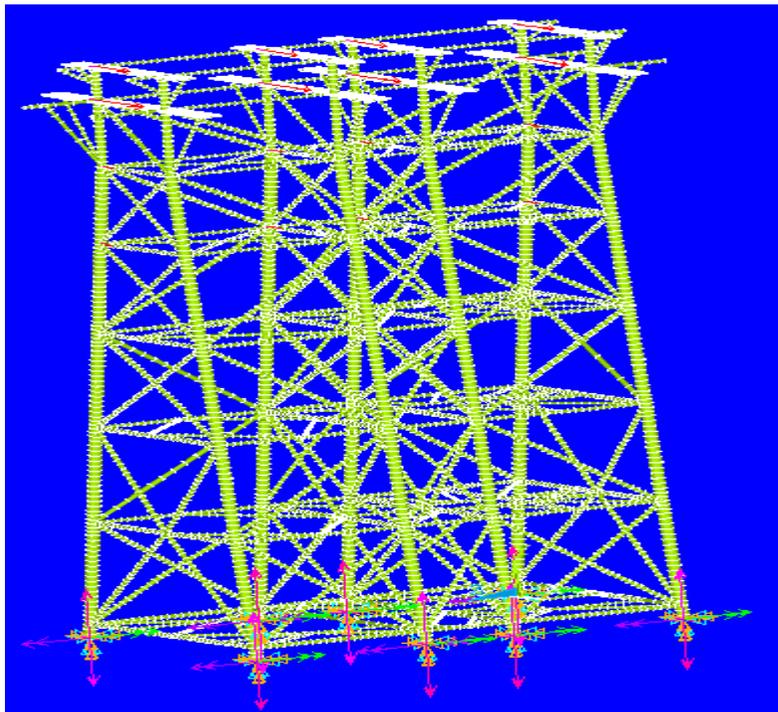


Figura 5.10. Modelo general con condición de frontera

## 5.8. Resultados de esfuerzos en nodos estructurales

Con la ejecución del programa Ansys, se obtuvieron los esfuerzos que se generaron en los nodos estructurales de la plataforma marina, de acuerdo a las combinaciones de carga dadas en la Tabla 5.3. En la Figura 5.11 se muestran los resultados de dichos esfuerzos de colapso a un tercio la torre piramidal de la plataforma del tirante de agua tirante de agua de la Fuerza del oleaje, representado así las cargas mayores.

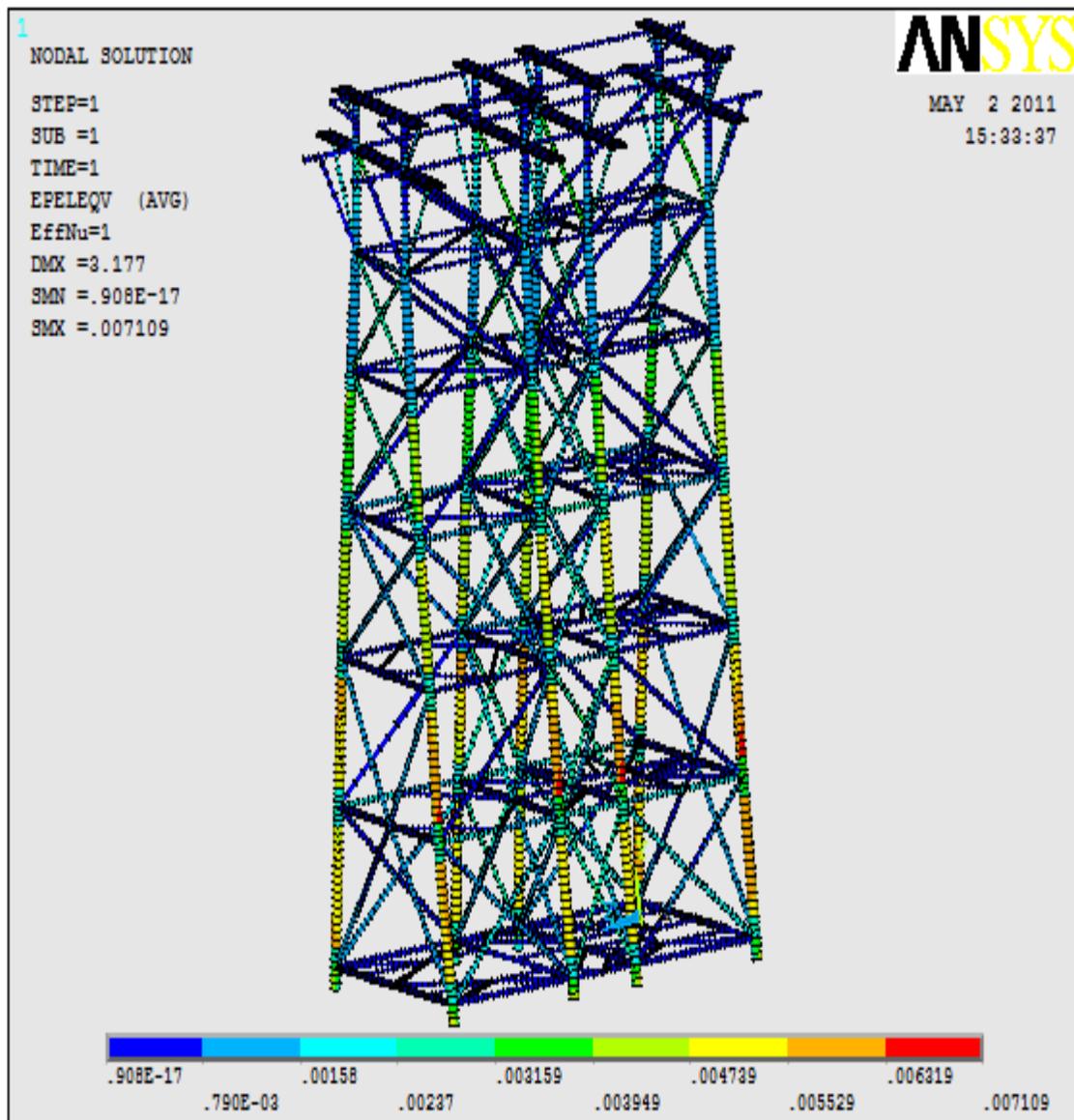


Figura 5.11. Elementos tendientes al Colapso de la plataforma "X"

En la Tabla 5.4 se muestran los esfuerzos en los elementos tubulares de la pierna de la plataforma PP-ZAAP-A y la Figura 5.12a, b, c y d, muestra el comportamiento de estos esfuerzos; estos esfuerzos son comparados con el esfuerzo de fluencia de acero grado B y de la resistencia a la tracción, especificado en la Tabla 5.2 [229]. Además se toma en consideración la relación de diámetro y espesor. Finalmente los resultados obtenidos tienen una correlación con el parámetro matemático propuesto por Donnell, Figura 5.13.

Tabla 5.4. *Esfuerzos en elementos tubulares*

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia-último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
2959	2787	2788	22407	2530-4080	✓
2960	2788	2789	19936	2530-4080	✓
2961	2789	2790	17936	2530-4080	✓
2962	2790	2791	16577	2530-4080	✓
2963	2791	2792	16024	2530-4080	✓
2964	2792	1874	16358	2530-4080	✓
2965	1768	2763	17528	2530-4080	✓
2966	2793	2794	61678	2530-4080	✓
2967	2794	2795	57970	2530-4080	✓
2968	2795	2796	54269	2530-4080	✓
2969	2796	2797	50578	2530-4080	✓
7	8	10	48795	2530-4080	✓
8	10	11	48795	2530-4080	✓
9	11	9	44578	2530-4080	✓
10	9	13	42596	2530-4080	✓
11	13	14	41421	2530-4080	✓
12	14	12	40245	2530-4080	✓
365	351	353	71603	2530-4080	✓
366	353	354	69337	2530-4080	✓
367	354	352	67071	2530-4080	✓
368	352	356	61511	2530-4080	✓
364	350	349	2883.2	2530-4080	
381	352	368	3106.8	2530-4080	

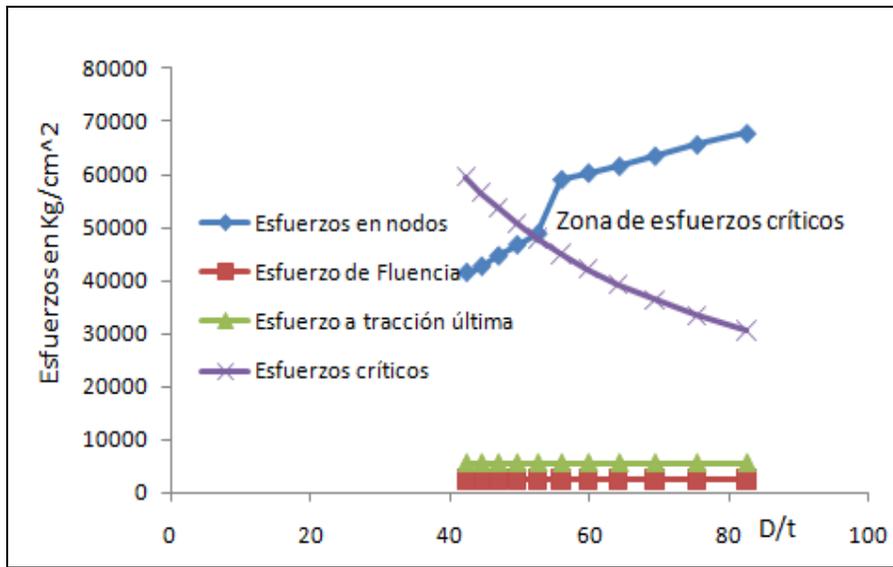


Figura 5.12a. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

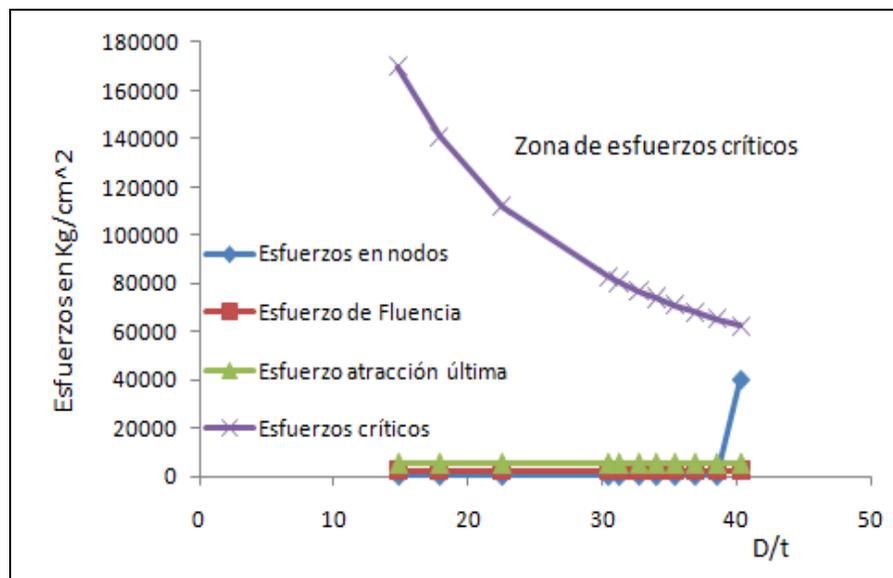


Figura 5.12b. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

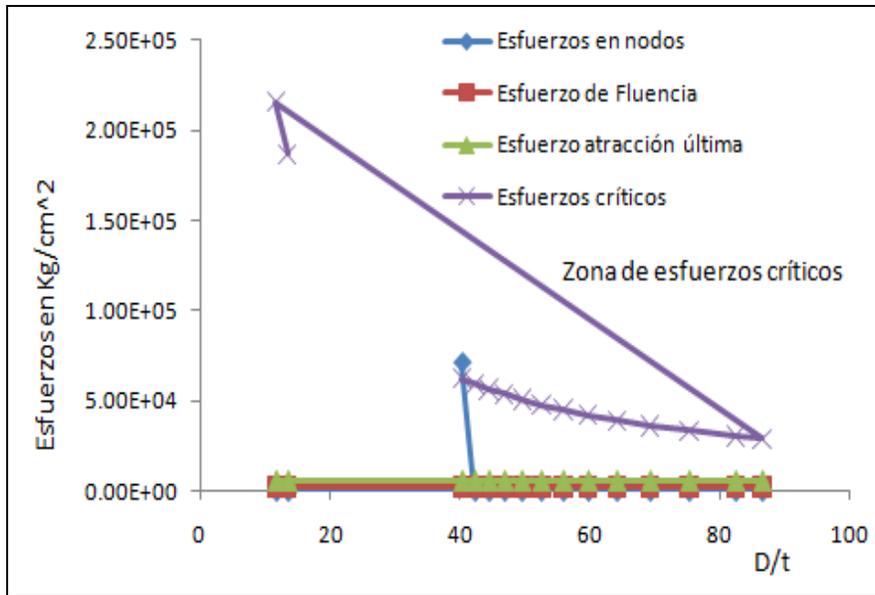


Figura 5.12c. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

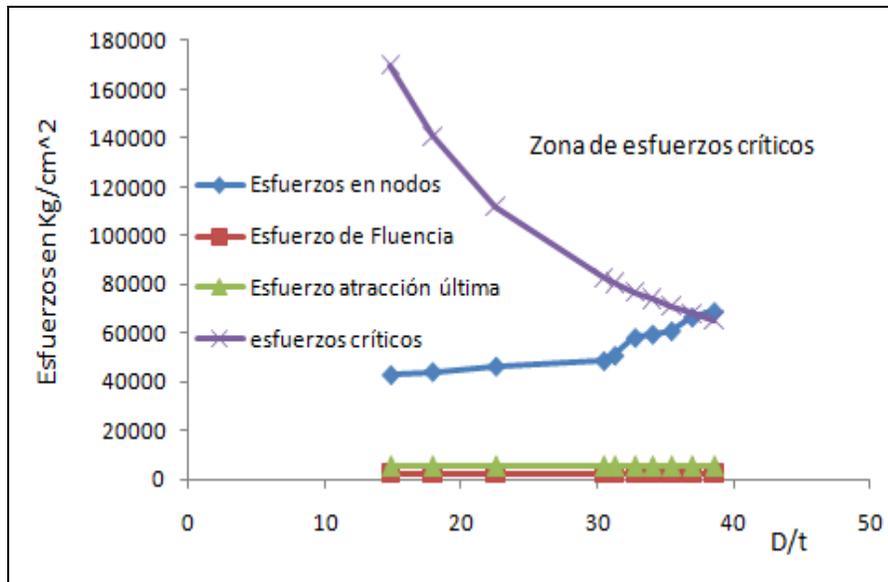


Figura 5.12d. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

De modo que en la Figura 5.12a, b, c y d, se dan a conocer la excedencia de esfuerzo en la parte superior del esfuerzo de fluencia, estos esfuerzos obtenidos por el software ANSYS, significan que están en su estado crítico (colapso), constituyendo así al riesgo a la integridad estructural en su estado de operación de la plataforma marina; y los esfuerzos que se hallan en la parte inferior nos indica que están en su estado de esfuerzo de fluencia aceptable por las cargas aplicadas a dicha plataforma.

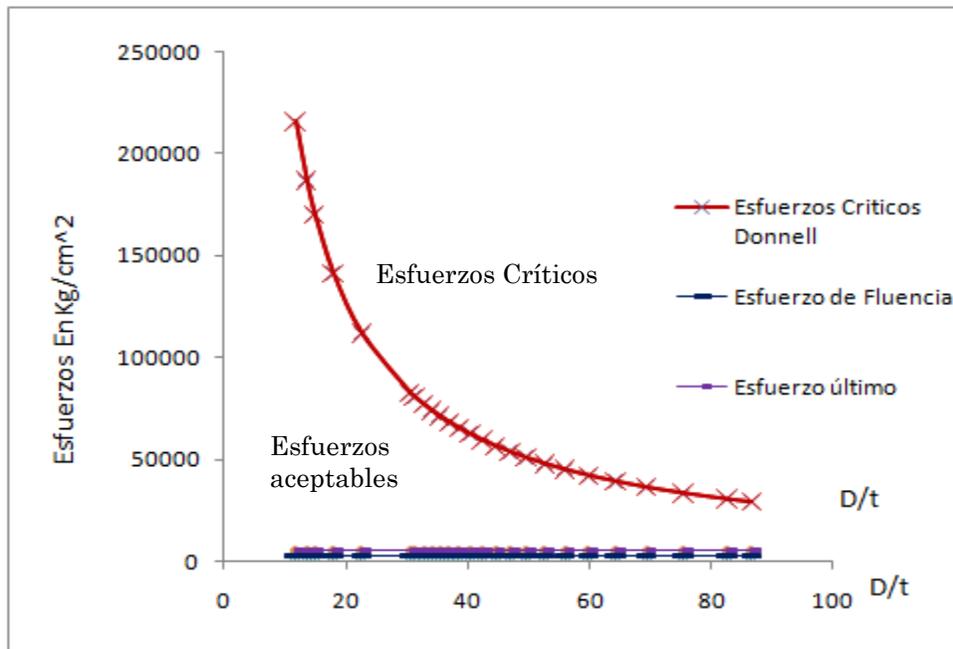


Figura 5.13. Parámetro matemático de Donnell [230]

No obstante, al generarse los esfuerzos en los elementos estructurales tubulares, estos esfuerzos inciden en los nodos que conforman a la estructura de las cuales se hace mención en la Figura 5.7, por lo que se realizó su análisis de riesgo a la integridad estructural.

Las deformaciones de los nodos estructurales tubular de la plataforma marina, son usualmente elástico, cuando el esfuerzo generado por las cargas y fuerzas externas aplicado están debajo de su nivel de esfuerzo crítico, denominado esfuerzo de fluencia; cuando dichos esfuerzos están por encima de dicho nivel de fluencia, se dice que los esfuerzos son críticos, ocurriendo deformaciones combinadas de deformación elástica y plástica.

En la Tabla 5.5a, b, c y d, se presenta la deformación plástica debido a los esfuerzos de compresión y tensión al cual se encuentra sometido el nodo tipo K-T (ver Figura 5.6) del elemento estructural tubular en estudio, así como sus diferentes relaciones. Cabe mencionar que estos esfuerzos de compresión y tensión se obtuvieron de la simulación completa de la plataforma PP-ZAAP-A, (Figura 5.14 y 5.15).

Tabla 5.5a. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"

oc	$\varepsilon^p$	$\beta$	$\tau$	K
4770.60627	1.73E+01	1	0.1	1.01502261
4620.21532	5.52E+00	0.8	0.15	0.983024536
4469.82437	3.24E+00	0.75	0.2	0.951026461
4332.29996	2.28E+00	0.72727273	0.25	0.921765949
4242.93722	1.53E+00	0.66666667	0.3	0.902752601
4153.64479	1.28E+00	0.66666667	0.35	0.883754211
3430.72766	9.99E-01	0.63636364	0.4	0.729942054
3282.44597	9.27E-01	0.6173913	0.45	0.69839276
3134.2346	7.35E-01	0.55384615	0.5	0.666858426
2994.88216	5.99E-01	0.50344828	0.55	0.637208971
2912.26909	4.99E-01	0.43333333	0.6	0.619631721
4232.46118	1.53435832	0.66666667	0.3	0.01579338
4140.14547	1.27863184	0.66666667	0.35	0.01548421
5034.33533	0.99860087	0.63636364	0.4	0.01543192
4875.01513	0.92670591	0.6173913	0.45	0.01563744
4715.69494	0.73540234	0.55384615	0.5	0.01609265
4324.7769	0.59933001	0.50344828	0.55	0.01677591
4232.46118	0.49866622	0.43333333	0.6	0.01766018
4140.14547	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.01871932
3538.44104	17.2615377	1	0.1	0.01992269
3389.03442	5.5236916	0.8	0.15	0.02124774
3239.62779	3.23653778	0.75	0.2	0.02267285
7734.69309	1.53435832	0.66666667	0.3	0.53460981
7466.11271	1.27863184	0.66666667	0.35	0.99162732
7198.23542	0.99860087	0.63636364	0.4	0.95719394
6929.44411	0.92670591	0.6173913	0.45	0.92285069
6660.93404	0.73540234	0.55384615	0.5	0.88839027
6392.49428	0.59933001	0.50344828	0.55	0.8539659
6123.98421	0.49866622	0.43333333	0.6	0.81955055
5855.47414	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.78512618
5587.03438	17.2615377	1	0.1	0.75070181
5318.52431	5.5236916	0.8	0.15	0.71628646
5050.08454	3.23653778	0.75	0.2	0.68186209
4781.57447	2.28251682	0.72727273	0.25	0.64744674
4513.13471	1.53435832	0.66666667	0.3	0.61302237
4244.62464	1.27863184	0.66666667	0.35	0.57860701

Tabla 5.5b. *Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"*

$\sigma_c$	$\epsilon^p$	$\beta$	$\tau$	K
7829.61024	0.92670591	0.6173913	0.45	0.50976729
7558.92059	0.73540234	0.55384615	0.5	1.00379618
7287.52785	0.59933001	0.50344828	0.55	0.96909238
7016.34604	0.49866622	0.43333333	0.6	0.93429844
6745.23453	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.89953154
6474.05272	17.2615377	1	0.1	0.86477366
7734.69309	1.53435832	0.66666667	0.3	0.53460981
6202.87091	5.5236916	0.8	0.15	0.83000676
5931.68909	3.23653778	0.75	0.2	0.79523986
5660.50728	2.28251682	0.72727273	0.25	0.76047296
5389.32547	1.53435832	0.66666667	0.3	0.72570606
5118.21396	1.27863184	0.66666667	0.35	0.69093916
4847.03215	0.99860087	0.63636364	0.4	0.65618128
4575.85034	0.92670591	0.6173913	0.45	0.62141438
4304.66853	0.73540234	0.55384615	0.5	0.58664748
4033.48671	0.59933001	0.50344828	0.55	0.55188058
7956.86953	0.49866622	0.43333333	0.6	0.51711368
7685.47679	0.51380005	0.47625	0.66666667	1.02011148
7414.78714	17.2615377	1	0.1	0.98531754
7143.3944	5.5236916	0.8	0.15	0.95061374
6872.70475	3.23653778	0.75	0.2	0.91581979
6601.66356	2.28251682	0.72727273	0.25	0.88111599
6330.69267	1.53435832	0.66666667	0.3	0.84636712
6059.72178	1.27863184	0.66666667	0.35	0.81162727
5788.68059	0.99860087	0.63636364	0.4	0.77688741
5517.7097	0.92670591	0.6173913	0.45	0.74213854
5246.73882	0.73540234	0.55384615	0.5	0.70739868
4975.76793	0.59933001	0.50344828	0.55	0.67265882
4704.72674	0.49866622	0.43333333	0.6	0.63791897
4433.75585	17.2615377	1	0.1	1.00100569
4162.78496	5.5236916	0.8	0.15	0.94335231
5362.11589	3.23653778	0.75	0.2	0.88569893
5111.39399	2.28251682	0.72727273	0.25	1.14087572
4860.6721	1.53435832	0.66666667	0.3	1.08753064
4609.9502	1.27863184	0.66666667	0.35	1.03418555
4359.22831	0.99860087	0.63636364	0.4	0.98084047
4108.50642	0.92670591	0.6173913	0.45	0.92749539
3857.78452	0.73540234	0.55384615	0.5	0.8741503
3607.13294	0.59933001	0.50344828	0.55	0.82080522
3356.41104	0.49866622	0.43333333	0.6	0.76747509

Tabla 5.5c. *Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"*

$\sigma_c$	$\epsilon^p$	$\beta$	$\tau$	K
3105.68915	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.71413001
2854.96725	17.2615377	1	0.1	0.66078493
2604.24536	5.5236916	0.8	0.15	0.60743984
2353.52347	3.23653778	0.75	0.2	0.55409476
3193.78633	5.5236916	0.8	0.15	0.73468417
2934.48673	3.23653778	0.75	0.2	0.67952901
2675.25745	2.28251682	0.72727273	0.25	0.62435888
2416.02817	1.53435832	0.66666667	0.3	0.56920371
2156.72858	1.27863184	0.66666667	0.35	0.51404855
1897.49929	0.99860087	0.63636364	0.4	0.45887842
1638.27001	0.92670591	0.6173913	0.45	0.40372325
5459.28292	0.73540234	0.55384615	0.5	0.34856809
5197.3819	0.59933001	0.50344828	0.55	1.16154956
4935.48087	0.49866622	0.43333333	0.6	1.10582594
4673.50954	0.51380005	0.47625	0.66666667	1.05010231
4411.60851	17.2615377	1	0.1	0.99436373
4149.70749	5.5236916	0.8	0.15	0.93864011
3887.80646	3.23653778	0.75	0.2	0.88291649
3625.90544	2.28251682	0.72727273	0.25	0.82719287
3364.00441	1.53435832	0.66666667	0.3	0.77146924
3102.10339	1.27863184	0.66666667	0.35	0.71574562
2840.13206	0.99860087	0.63636364	0.4	0.660022
2578.23103	0.92670591	0.6173913	0.45	0.60428342
2316.33001	0.73540234	0.55384615	0.5	0.54855979
2054.42898	0.59933001	0.50344828	0.55	0.49283617
1792.52796	0.49866622	0.43333333	0.6	0.43711255
5426.58924	17.2615377	1	0.1	1.15459346
5176.42982	5.5236916	0.8	0.15	1.10136805
4926.27039	3.23653778	0.75	0.2	1.04814264
3193.78633	5.5236916	0.8	0.15	0.73468417
2934.48673	3.23653778	0.75	0.2	0.67952901
2675.25745	2.28251682	0.72727273	0.25	0.62435888
2416.02817	1.53435832	0.66666667	0.3	0.56920371
2156.72858	1.27863184	0.66666667	0.35	0.51404855
1897.49929	0.99860087	0.63636364	0.4	0.45887842
1638.27001	0.92670591	0.6173913	0.45	0.40372325
5459.28292	0.73540234	0.55384615	0.5	0.34856809
5197.3819	0.59933001	0.50344828	0.55	1.16154956
4935.48087	0.49866622	0.43333333	0.6	1.10582594
4673.50954	0.51380005	0.47625	0.66666667	1.05010231

Tabla 5.5d. *Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"*

$\sigma$	$\epsilon^p$	$\beta$	$\tau$	K
4676.11097	2.28251682	0.72727273	0.25	0.99491723
4425.95155	1.53435832	0.66666667	0.3	0.94169182
4175.79213	1.27863184	0.66666667	0.35	0.88846641
3925.63271	0.99860087	0.63636364	0.4	0.835241
3675.47328	0.92670591	0.6173913	0.45	0.78201559
3425.31386	0.73540234	0.55384615	0.5	0.72879018
3175.15444	0.59933001	0.50344828	0.55	0.67556477
2924.99502	0.49866622	0.43333333	0.6	0.62233937
2674.8356	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.56911396
2424.60587	17.2615377	1	0.1	0.51587359
2174.44644	5.5236916	0.8	0.15	0.46264818
1924.28702	3.23653778	0.75	0.2	0.40942277
2002.89248	2.28251682	0.72727273	0.25	0.42614734
3302.90589	1.53435832	0.66666667	0.3	0.70274594
3080.44822	1.27863184	0.66666667	0.35	0.65541451
2859.46703	0.99860087	0.63636364	0.4	0.60839724
2640.31388	0.92670591	0.6173913	0.45	0.56176891
2423.55123	0.73540234	0.55384615	0.5	0.5156492
2209.88218	0.59933001	0.50344828	0.55	0.4701877
2000.22074	0.49866622	0.43333333	0.6	0.42557888
3302.90589	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.70274594
4089.45268	17.2615377	1	0.1	0.87009631
3762.93768	5.5236916	0.8	0.15	0.80062504
3436.77423	3.23653778	0.75	0.2	0.73122856
3111.10294	2.28251682	0.72727273	0.25	0.6619368
2786.06443	1.53435832	0.66666667	0.3	0.59277967
2461.93994	1.27863184	0.66666667	0.35	0.52381701
4676.11097	2.28251682	0.72727273	0.25	0.99491723
4425.95155	1.53435832	0.66666667	0.3	0.94169182
4175.79213	1.27863184	0.66666667	0.35	0.88846641
3925.63271	0.99860087	0.63636364	0.4	0.835241
3675.47328	0.92670591	0.6173913	0.45	0.78201559
3425.31386	0.73540234	0.55384615	0.5	0.72879018
3175.15444	0.59933001	0.50344828	0.55	0.67556477
2924.99502	0.49866622	0.43333333	0.6	0.62233937
2674.8356	0.51380005	0.47625	0.66666667	0.56911396
2424.60587	17.2615377	1	0.1	0.51587359

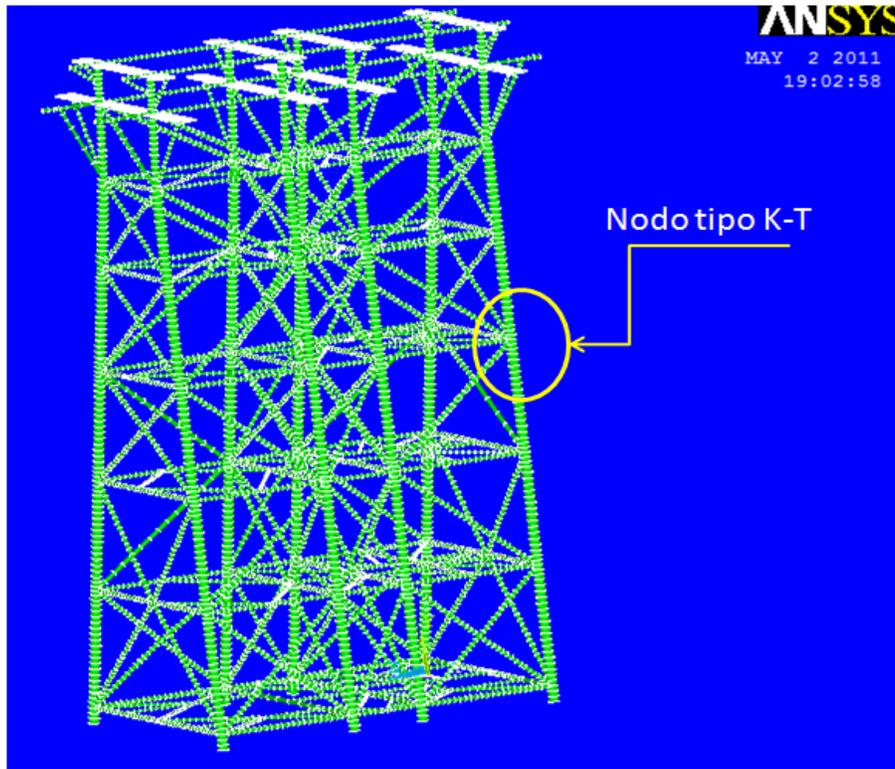


Figura 5.14. Modelo de plataforma “P-A” generado por el software ANSYS

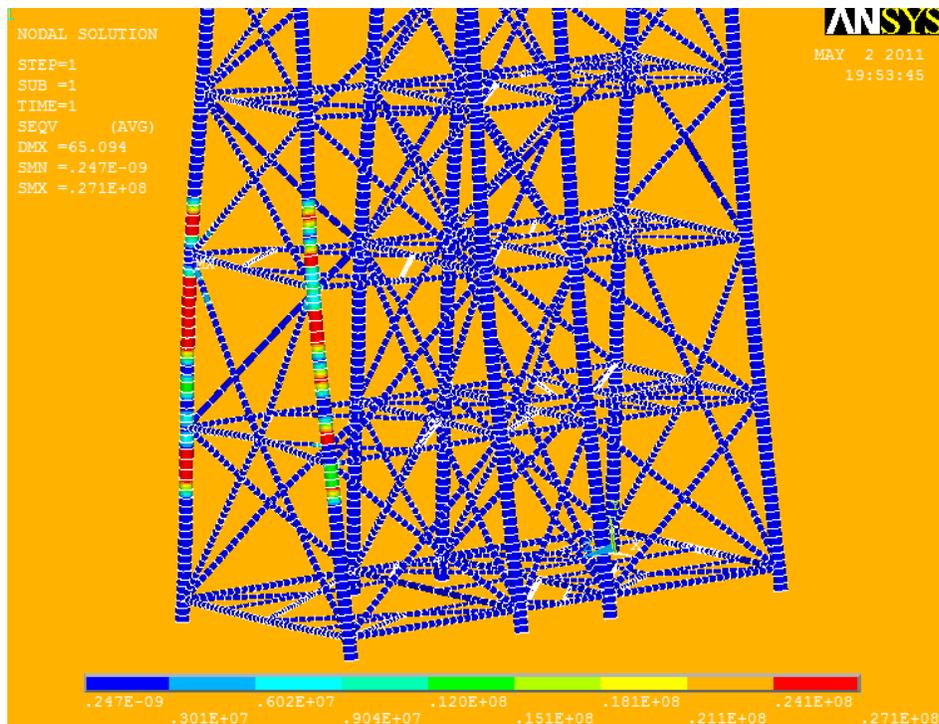


Figura 5.15. Deformación plástica en nodos estructurales tubulares de la Plataforma P-A” generado por el software ANSYS

La Figura 5.15, muestra la distribución de los esfuerzos plásticos en la junta de tipo K-T de la Figura (ver Figura 5.6), 5.14 y 5.15; por otro lado, la Figura 5.16a, b, c, d, e, f, g, h, i y j; muestra la tendencia de la deformación plástica debido al incremento de los esfuerzos a compresión alcanzando deformaciones superiores al esfuerzo de fluencia; de esta manera se observa un comportamiento logarítmico antes de llegar a la fisura que da origen a la grieta, transformado al sistema estructural de plataforma marina en un riesgo a su integridad estructural.

En estos nodos la deformación plástica da lugar a tensiones residuales; a medida que se incrementa su valor se va generando en el diámetro una mayor abolladura como se muestra en la Figura (ver Figura 2.19), generando así esfuerzos de tensión y de compresión alrededor del diámetro abollado, ocurriendo de esta manera la plastificación en el centro de la abolladura generada por el nodo o unión estructural (ver Figura. 2.19) de la relación  $\beta$ , así mismo la Figura. 5.17a, b, c, d, e, f y g, de la relación  $\tau$  y  $\beta$ , muestra el comportamiento de ambos espesores como se describe matemáticamente por la Ecuación (Ver ecuaciones 2.45 y 2.46), dichas Figuras muestran el comportamiento del esfuerzo a compresión y tensión sobre los espesores y muestran una tendencia a su debilitamiento y plastificación, corroborándose así que al alcanzar esfuerzos que sobrepasen la fluencia del acero, se manifestara en plastificación antes de la fisura, constituyendo de este modo un riesgo a la integridad estructural.

Además, en esta unión la curva de esfuerzo de deformación y del endurecimiento que experimenta el acero en el nodo es de vital importancia conocer, debido a la zona plástica local que se genera como relajación de este esfuerzo a compresión y tensión. Esto hace de su valor a la rigidez y flexión descienda gradualmente, formándose así un número de nodos plenamente plásticos, siendo esto suficiente en transformar a los elementos tubulares circulares en inestabilidad global de la plataforma marina.

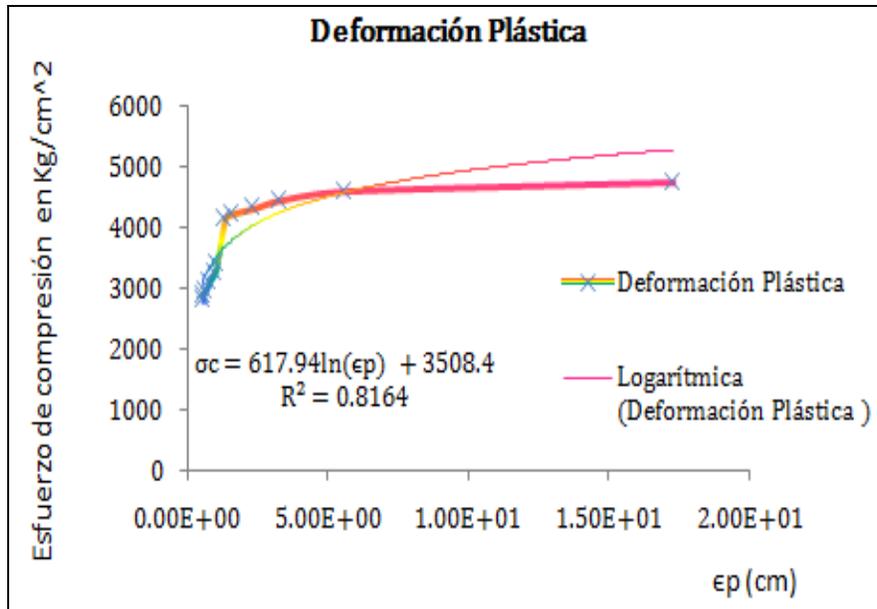


Figura 5.16a. Deformación plástica en nodos estructurales

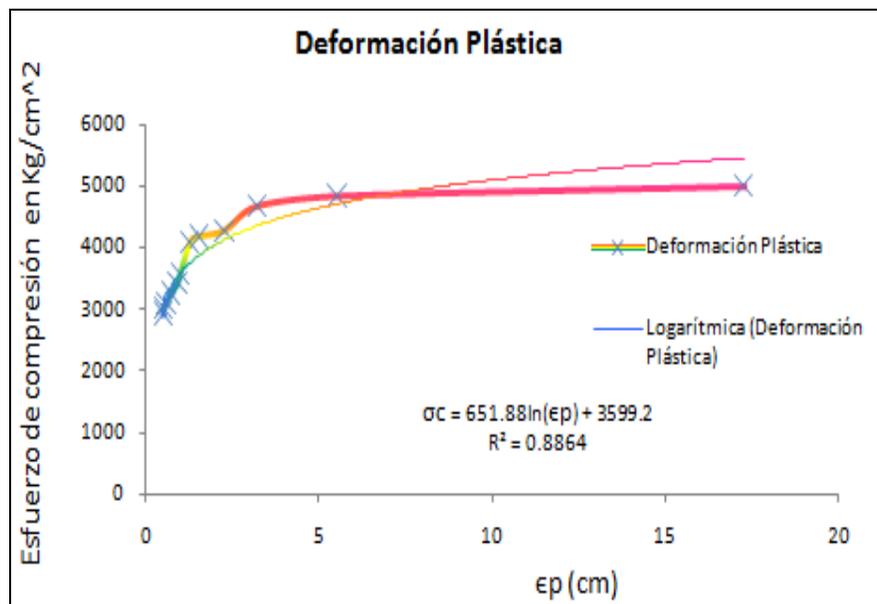


Figura 5.16b. Deformación plástica en nodos estructurales

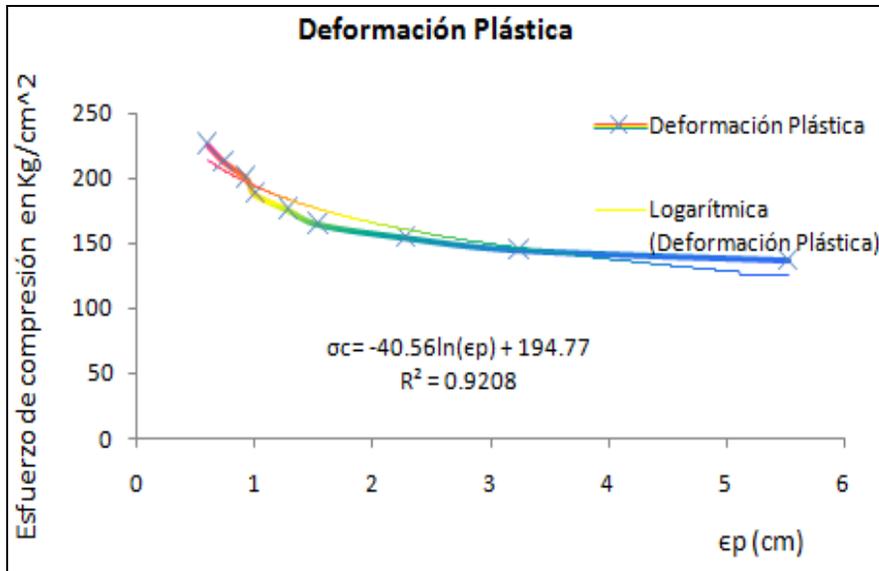


Figura 5.16c. Deformación plástica en nodos estructurales

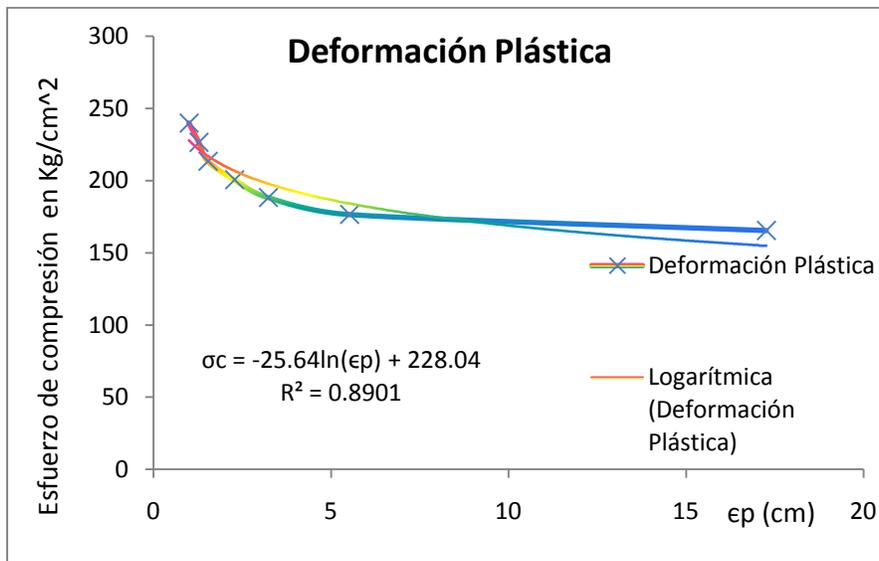


Figura 5.16d. Deformación plástica en nodos estructurales

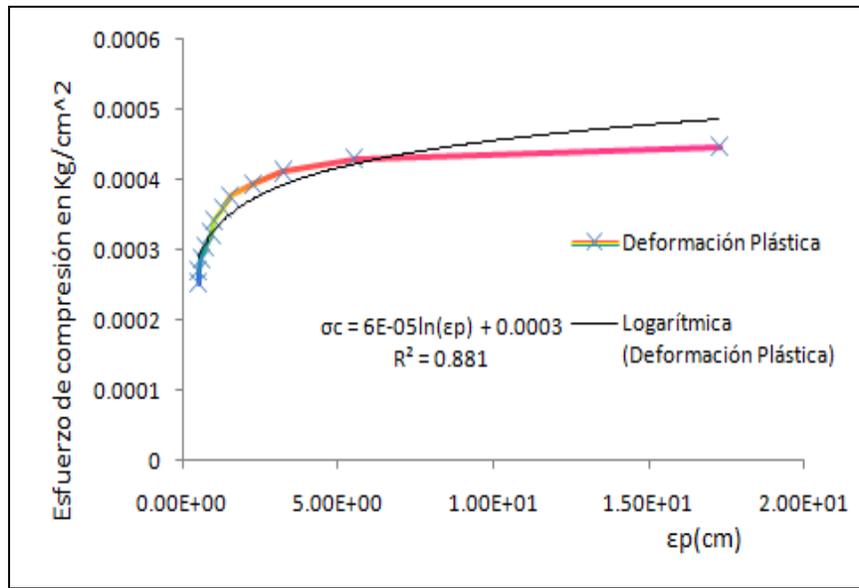


Figura 5.16e. Deformación plástica en nodos estructurales

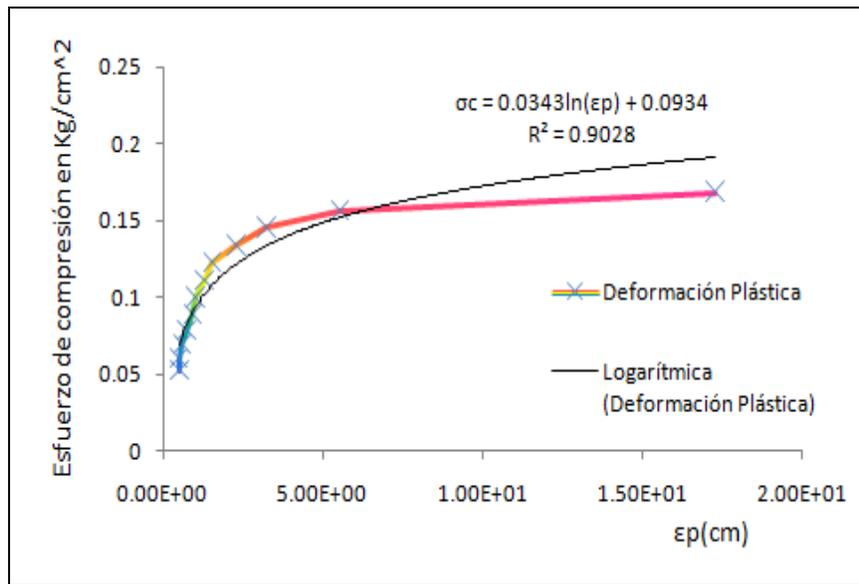


Figura 5.16f. Deformación plástica en nodos estructurales

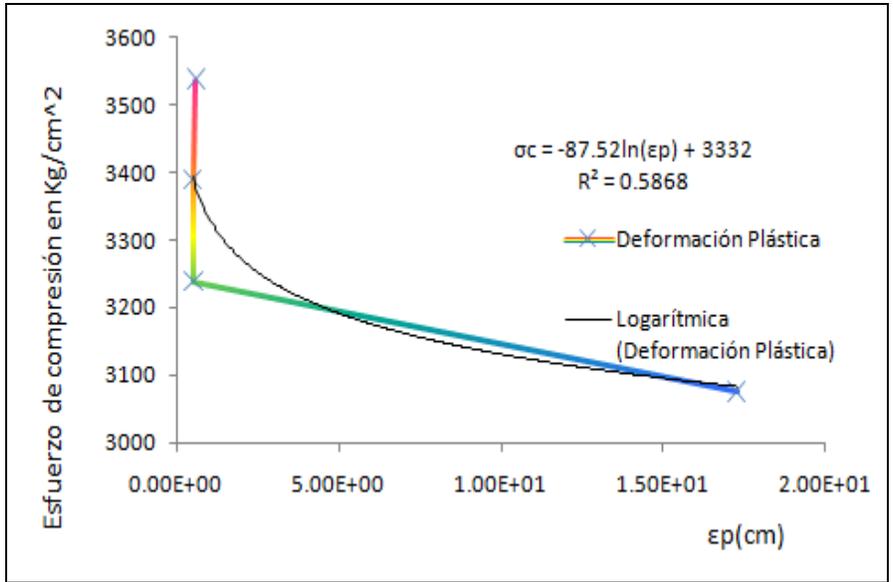


Figura 5.16g. Deformación plástica en nodos estructurales

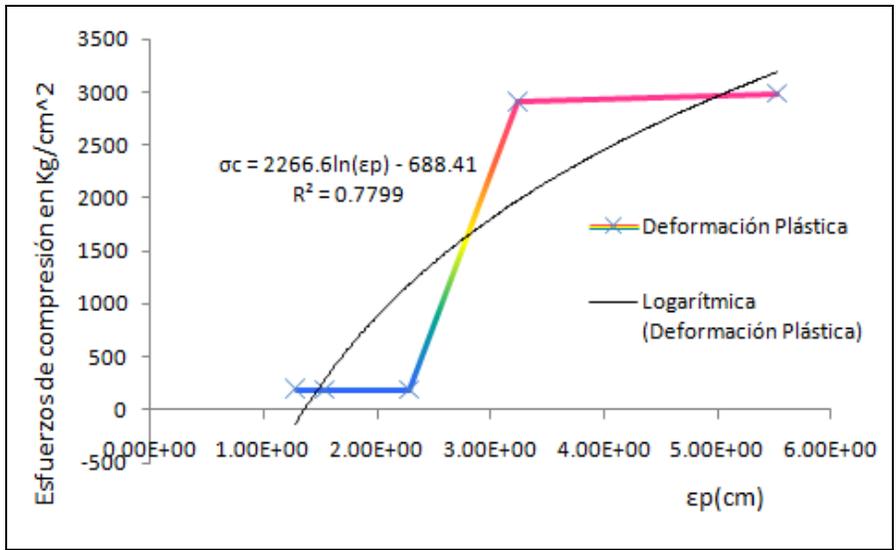


Figura 5.16h. Deformación plástica en nodos estructurales

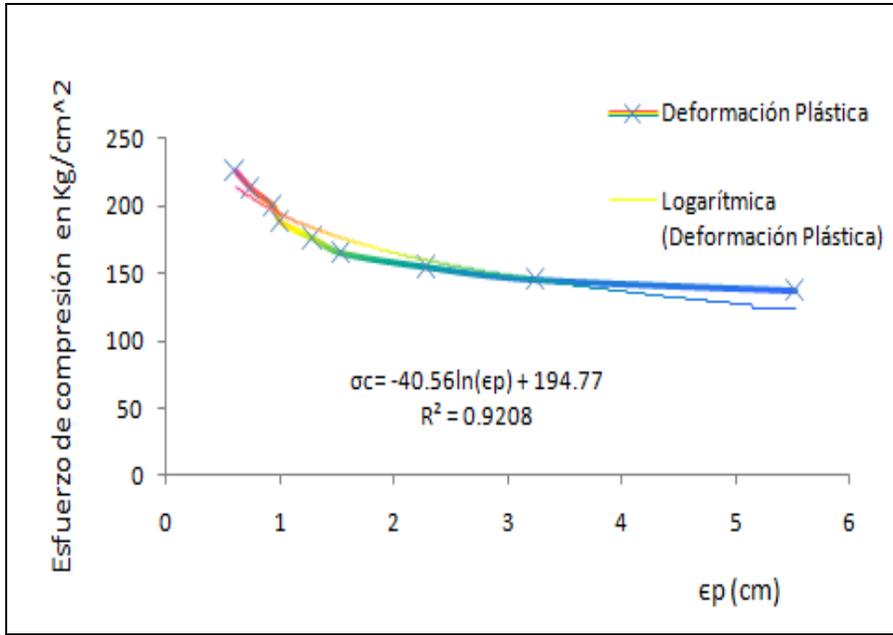


Figura 5.16i. Deformación plástica en nodos estructurales

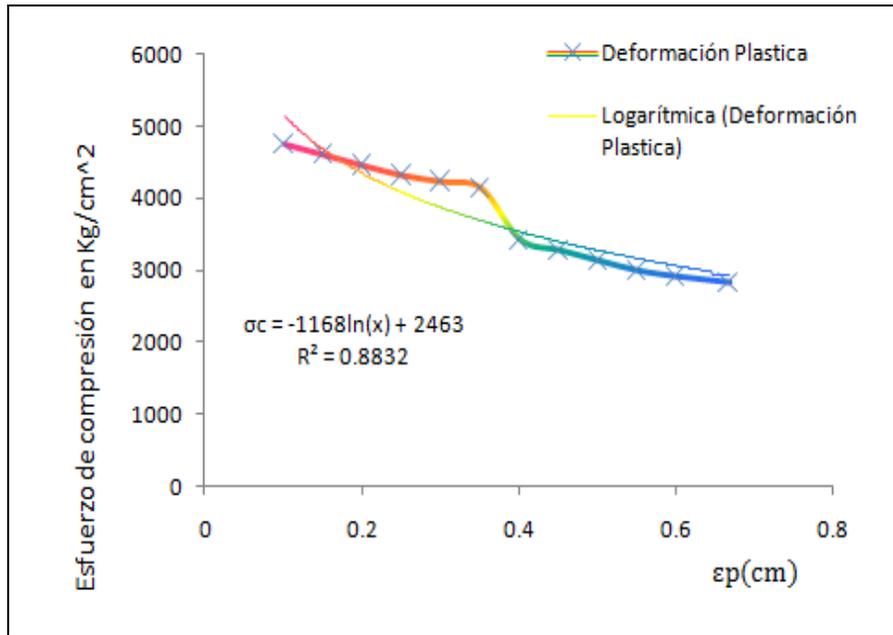


Figura 5.16j. Deformación plástica en nodos estructurales

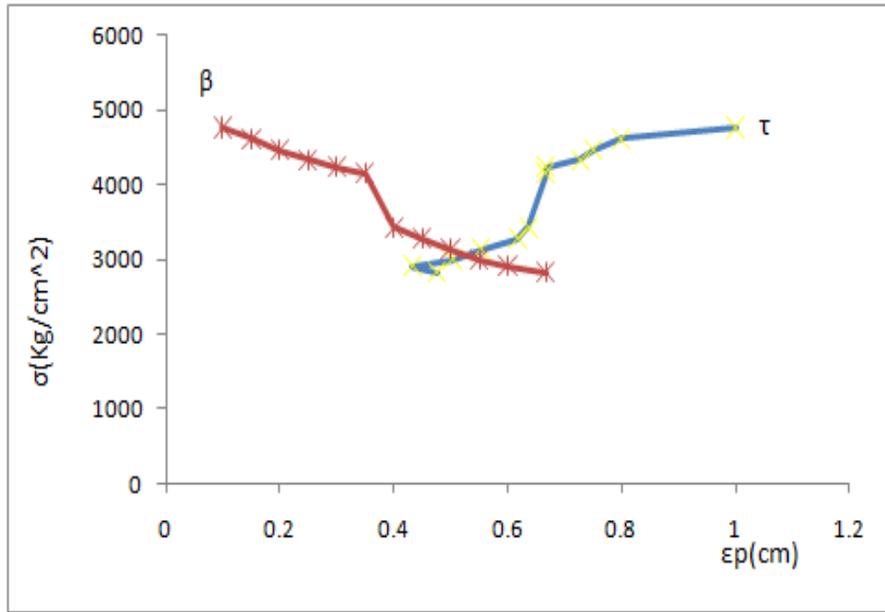


Figura 5.17a. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

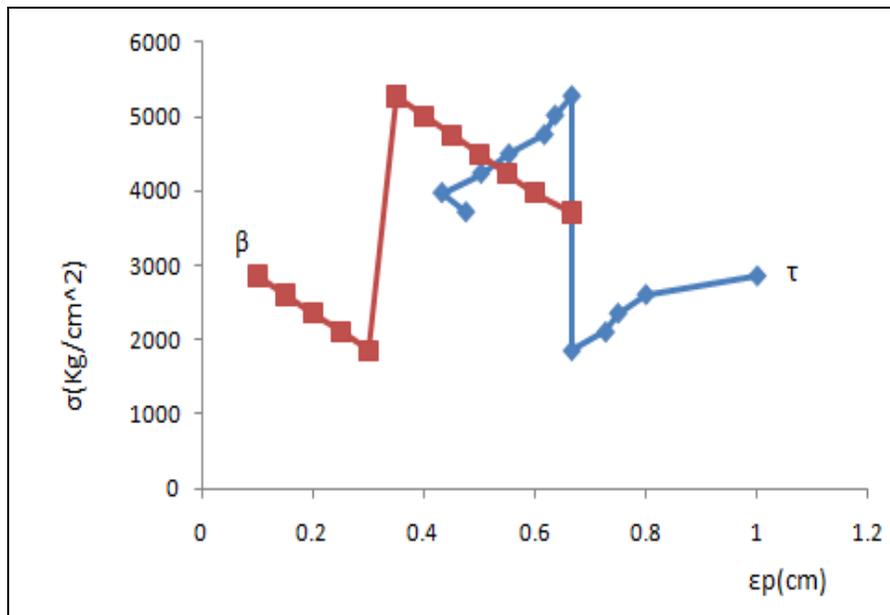


Figura 5.17b. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

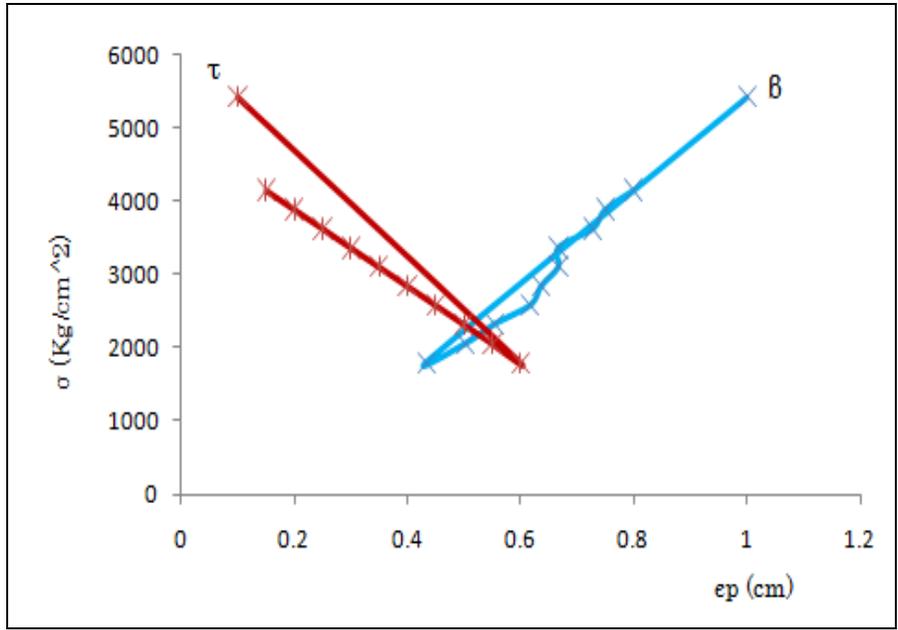


Figura 5.17c. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

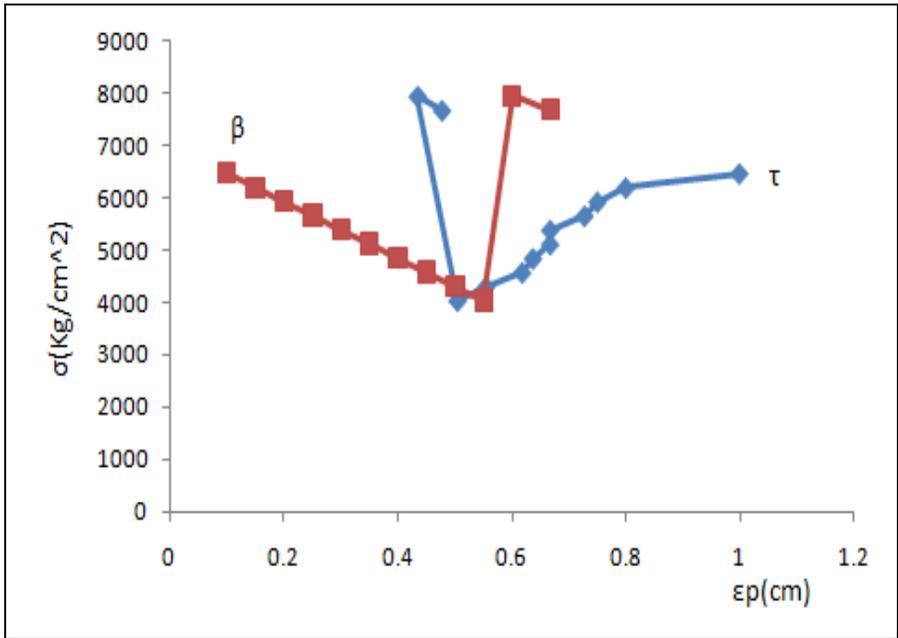


Figura 5.17d. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

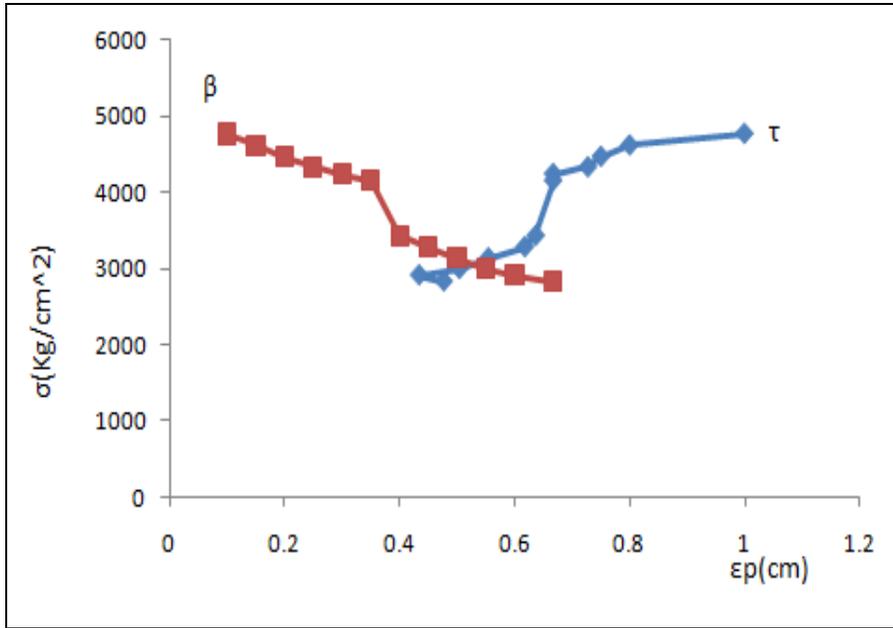


Figura 5.17e. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

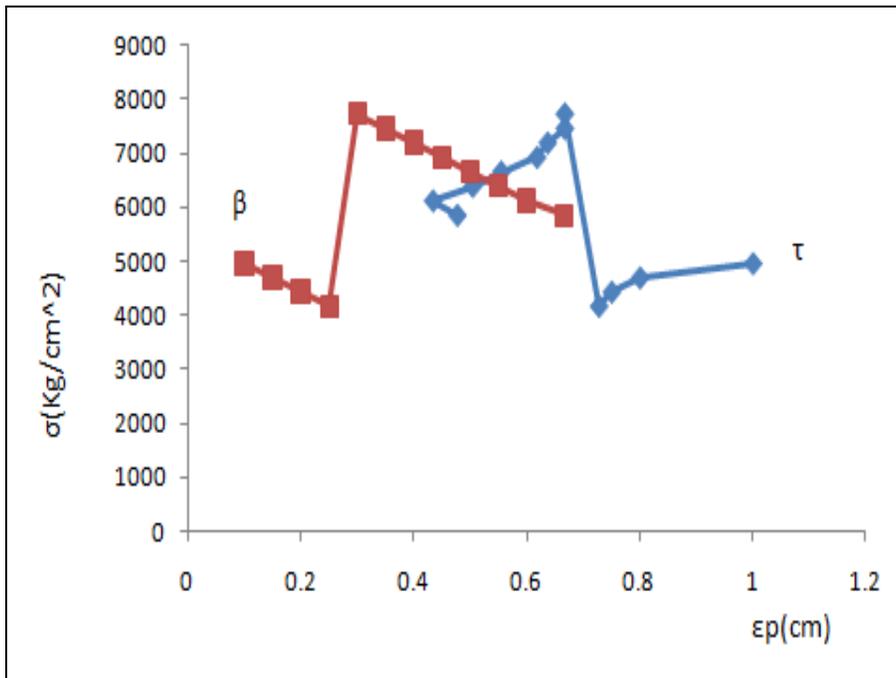


Figura 5.17f. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

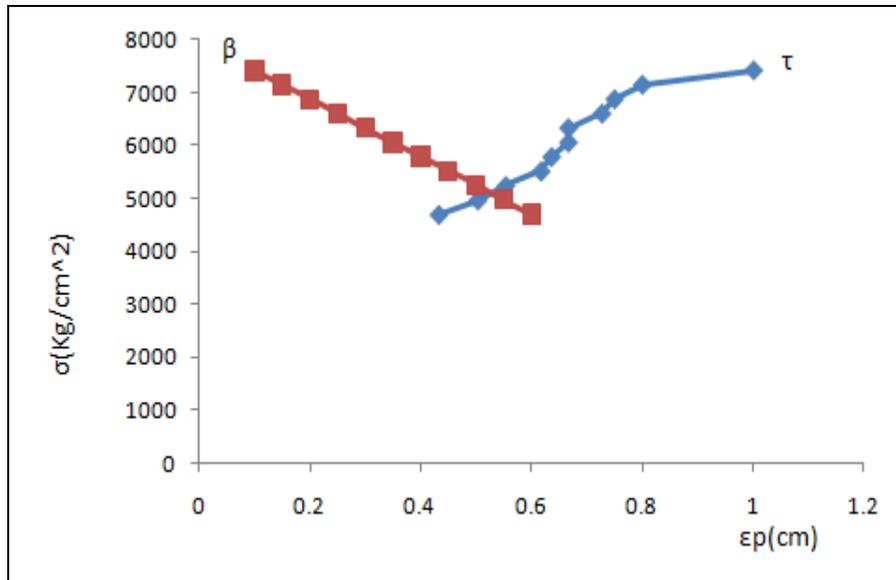


Figura 5.17g. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor

En la Figura 5.18, se muestra el comportamiento de los factores de concentración de esfuerzos debido a la tensión (KT) y compresión (KC) que se genera en el nodo estructural (esto es, donde ocurre la intersección de los elementos estructurales tubulares circulares).

La Figura 5.19, muestra claramente los factores de concentración de esfuerzos en la zona plástica antes de la fisura; Los valores de K en la zona de fisura son del orden de 0.9 a 1.0. A este valor no se le debe de exceder, ya que es un indicativo de que la energía ya no es absorbida por el propio material y tiene una posible tendencia a la fisura antes que se propague a una grieta.

Además, la deformación plástica genera cierta energía térmica del cual el 5% aproximadamente es retenido internamente, el resto se disipa en forma de calor. La mayor proporción de esta energía almacenada lo es en forma de energía de deformación asociada con dislocaciones.

Estos campos de deformaciones y de fuerzas asociadas, son importantes en los mecanismos de refuerzos de los metales. Durante la deformación elastoplástica, el número dislocaciones aumenta drásticamente.

En la Tabla 5.6a, b, c, d, e y f, se da a conocer los esfuerzos por deformación térmica, dichos esfuerzos se obtuvieron de la aplicación del software ANSYS.

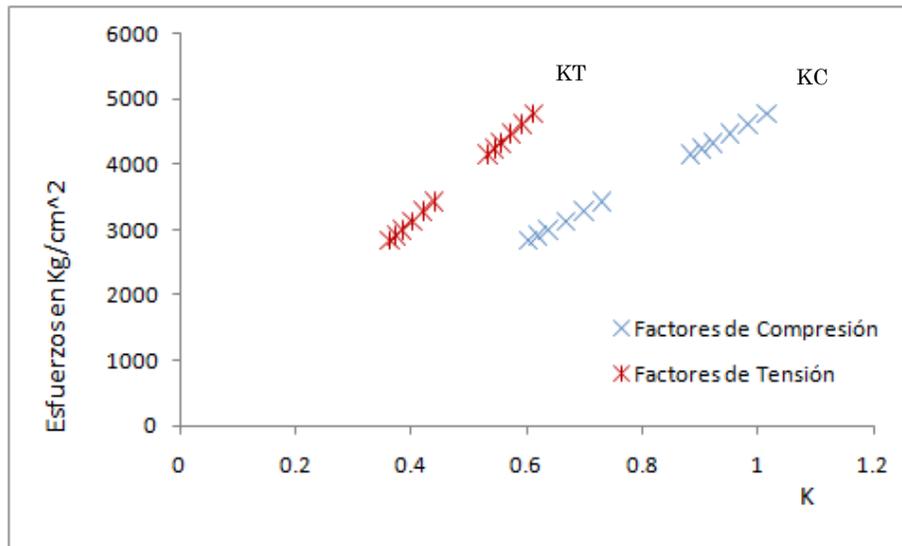


Figura 5.18. Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC) y tensión (KT) en la pared cilíndrica (ver Fig. 5.6).

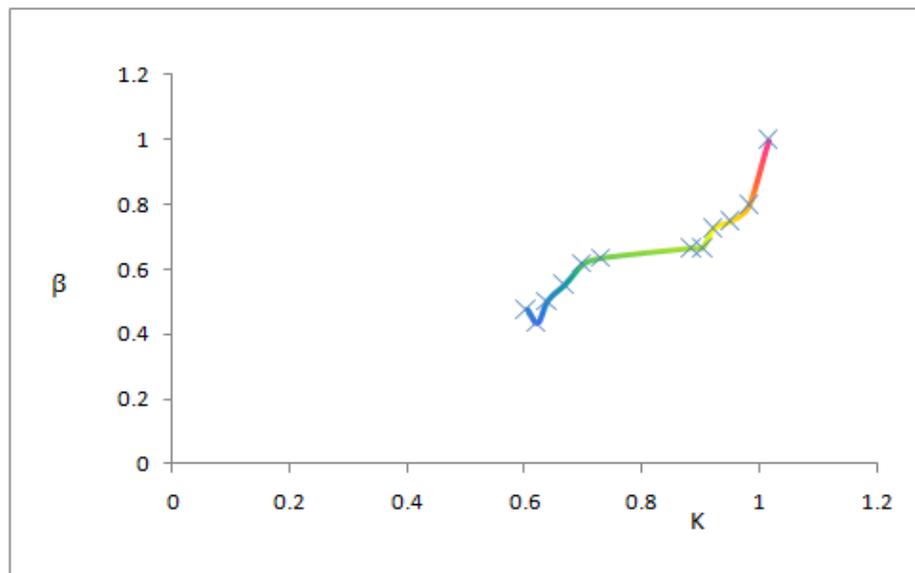


Figura 5.19. Factor de concentración de Esfuerzo plástico en el nodo estructural

Del concepto de elastoplasticidad, ha surgido una gran diversidad de modelos, muchos científicos consideran que la elastoplasticidad es el único marco teórico para describir el comportamiento de los materiales inelásticos, pasando desapercibido la elastoplasticatermica (EPT); esto es cuando un material es sometido a cargas que exceden su elasticidad y después de retirar la carga aplicada no regresa a su forma original, debido a que un sólido cuando es deformado aumenta su energía interna, este aumento de energía en el

material ocasiona cambios termodinámicos irreversibles al adquirir mayor energía potencial elástica.

Tabla 5.6a. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
4770.60	0.1	0	0	0.31070768	2500	4200
4620.21	0.5	1	5.52	0.74569837	2500	4200
4469.82	1	2	1.61	1.1651536	2500	4200
4332.29	1.5	3	0.76	1.54069885	2500	4200
4242.93	2	4	0.38	1.65710699	2500	4200
4153.64	2.5	5	0.25	2.01384515	2500	4200
3430.72	3	6	0.16	2.15697788	2500	4200
3282.44	3.5	7	0.13	2.62721125	2500	4200
3134.23	4	8	0.09	2.64744843	2500	4200
2994.88	4.5	9	0.06	2.67001518	2500	4200
2912.26	5	10	0.05	2.69279758	2500	4200
2829.58	5.5	11	0.046	3.39108032	2500	4200
4999.25114	0.1	0	0	0.31070768	2500	4200
4841.40743	0.5	1	5.52369156	0.74569836	2500	4200
4683.63404	1	2	1.61826887	1.16515359	2500	4200
4285.89602	1.5	3	0.76083894	1.54069886	2500	4200
4190.13516	2	4	0.38358958	1.657107	2500	4200
4094.44462	2.5	5	0.25572637	2.01384516	2500	4200
3578.93903	3	6	0.16643348	2.15697783	2500	4200
3424.11861	3.5	7	0.13238656	2.62721119	2500	4200
3269.29819	4	8	0.09192529	2.64744835	2500	4200
3110.68109	4.5	9	0.06659222	2.6700151	2500	4200
3021.7402	5	10	0.04986662	2.69279749	2500	4200
2932.86963	5.5	11	0.04670909	3.39108022	2500	4200
173.43121	0.1	0	0	0.31070769	2500	4200
193.623955	0.5	1	5.52369228	0.74569846	2500	4200
195.508236	1	2	1.61826922	1.16515384	2500	4200
197.392518	1.5	3	0.76083915	1.54069928	2500	4200
199.28383	2	4	0.38358974	1.65710766	2500	4200
201.168111	2.5	5	0.25572649	2.01384611	2500	4200
203.059423	3	6	0.16643356	2.15697895	2500	4200
204.240614	3.5	7	0.13238663	2.62721259	2500	4200
204.247645	4	8	0.09192535	2.64745005	2500	4200
202.714909	4.5	9	0.06659227	2.67001709	2500	4200
5034.33533	5	10	0.04986659	2.69279582	2500	4200

Tabla 5.6b. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
4875.01513	5.5	11	0.04670907	3.39107825	2500	4200
4715.69494	0.1	0	0	0.31070768	2500	4200
4324.7769	0.5	1	5.52369164	0.74569837	2500	4200
4232.46118	1	2	1.61826891	1.16515361	2500	4200
4140.14547	1.5	3	0.76083895	1.54069887	2500	4200
201.189204	2	4	0.38358974	1.65710766	2500	4200
198.74245	2.5	5	0.25572649	2.01384611	2500	4200
196.302728	3	6	0.16643356	2.15697896	2500	4200
193.863006	3.5	7	0.13238663	2.6272126	2500	4200
191.423283	4	8	0.09192535	2.64745005	2500	4200
218.056333	4.5	9	0.06659227	2.67001708	2500	4200
181.207386	5	10	0.04986666	2.69279985	2500	4200
145.827897	5.5	11	0.04670913	3.39108304	2500	4200
0.1660347	0.1	0	0	0.02761846	2500	4200
0.16604173	0.5	1	1.27863248	0.17261538	2500	4200
0.16604877	1	2	0.4993007	0.3594965	2500	4200
0.1660558	1.5	3	0.30890214	0.62552683	2500	4200
0.16606283	2	4	0.18385071	0.79423505	2500	4200
0.16607689	2.5	5	0.11986609	0.94394549	2500	4200
0.16609095	3	6	0.08311111	1.07712	2500	4200
0.16610501	3.5	7	0.07340007	1.45662436	2500	4200
0.16611907	4	8	0.69046154	19.8852923	2500	4200
3538.44104	4.5	9	0.35961532	14.4187764	2500	4200
3389.03442	5	10	0.2282517	12.3255916	2500	4200
3239.62779	5.5	11	0.13948713	10.126766	2500	4200
3075.5969	0.1	0	0	0.02301538	2500	4200
2992.91351	0.5	1	0.99860094	0.13481113	2500	4200
2910.15982	1	2	0.46335298	0.33361415	2500	4200
194.43954	1.5	3	0.24513426	0.49639688	2500	4200
196.31679	2	4	0.14983261	0.64727687	2500	4200
198.201071	2.5	5	0.09973333	0.78539995	2500	4200
200.085352	3	6	0.08563341	1.10980897	2500	4200
201.969633	3.5	7	0.7890989	15.6596676	2500	4200
228.286292	4	8	0.4045673	11.6515383	2500	4200
191.521716	4.5	9	0.25361305	10.1686153	2500	4200
156.444556	5	10	0.1534359	8.28553833	2500	4200
124.468023	5.5	11	0.11623932	8.43897427	2500	4200
0.00039534	0.5	1	0.73540282	0.09927938	2500	4200

Tabla 5.6c. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
0.00038145	1	2	0.29966523	0.21575897	2500	4200
0.00036758	1.5	3	0.16622222	0.3366	2500	4200
0.0003537	2	4	0.12845012	0.55490452	2500	4200
0.00033984	2.5	5	1.10473846	8.69981538	2500	4200
0.00032598	3	6	0.53942308	6.99092308	2500	4200
0.00031214	3.5	7	0.32607393	6.47093706	2500	4200
3456.95291	4	8	0.19179481	5.5236904	2500	4200
0.00423239	1	2	0.36770141	0.26474502	2500	4200
0.00423239	1.5	3	0.19977682	0.40454807	2500	4200
210.294219	2	4	0.12466666	0.53855997	2500	4200
163.66529	2.5	5	0.10276009	0.80923572	2500	4200
130.268515	3	6	0.92061538	11.9311753	2500	4200
106.468919	3.5	7	0.46236264	9.17558649	2500	4200
89.6088205	4	8	0.28531468	8.21706289	2500	4200
7865.46783	4.5	9	0.1704842	6.83556385	2500	4200
7601.80908	5	10	0.12786313	6.90460908	2500	4200
7337.44724	5.5	11	0.09078184	6.59076182	2500	4200
7073.78849	0.1	0	0	0.0166807	2500	4200
6809.70789	0.5	1	0.73540178	0.09927924	2500	4200
6545.7679	1	2	0.29966473	0.21575861	2500	4200
6281.75761	1.5	3	0.1662219	0.33659935	2500	4200
6017.81762	2	4	0.12844989	0.55490352	2500	4200
5753.80732	2.5	5	1.10473829	8.69981399	2500	4200
5489.86734	3	6	0.53942294	6.99092126	2500	4200
5225.85704	3.5	7	0.32607381	6.47093479	2500	4200
4961.91706	4	8	0.19179478	5.52368956	2500	4200
4697.90676	4.5	9	0.1420702	5.69630448	2500	4200
4433.96678	5	10	0.09986007	5.39244387	2500	4200
4169.95648	5.5	11	0.08424598	6.11625813	2500	4200
7734.69309	0.1	0	0	0.01323723	2500	4200
7466.11271	0.5	1	0.59932932	0.08090946	2500	4200
7198.23542	1	2	0.24933278	0.1795196	2500	4200
6929.44411	1.5	3	0.17126647	0.34681461	2500	4200
6660.93404	2	4	1.38092282	5.96558659	2500	4200
6392.49428	2.5	5	0.6473075	5.09754653	2500	4200
6123.98421	3	6	0.38041942	4.93023573	2500	4200
5855.47414	3.5	7	0.21919401	4.34990514	2500	4200
0.00423239	1	2	0.36770141	0.26474502	2500	4200

Tabla 5.6d. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
0.00423239	1.5	3	0.19977682	0.40454807	2500	4200
210.294219	2	4	0.12466666	0.53855997	2500	4200
163.66529	2.5	5	0.10276009	0.80923572	2500	4200
130.268515	3	6	0.92061538	11.9311753	2500	4200
106.468919	3.5	7	0.46236264	9.17558649	2500	4200
89.6088205	4	8	0.28531468	8.21706289	2500	4200
7865.46783	4.5	9	0.1704842	6.83556385	2500	4200
7601.80908	5	10	0.12786313	6.90460908	2500	4200
7337.44724	5.5	11	0.09078184	6.59076182	2500	4200
7073.78849	0.1	0	0	0.0166807	2500	4200
6809.70789	0.5	1	0.73540178	0.09927924	2500	4200
6545.7679	1	2	0.29966473	0.21575861	2500	4200
6281.75761	1.5	3	0.1662219	0.33659935	2500	4200
6017.81762	2	4	0.12844989	0.55490352	2500	4200
5753.80732	2.5	5	1.10473829	8.69981399	2500	4200
5489.86734	3	6	0.53942294	6.99092126	2500	4200
5225.85704	3.5	7	0.32607381	6.47093479	2500	4200
4961.91706	4	8	0.19179478	5.52368956	2500	4200
4697.90676	4.5	9	0.1420702	5.69630448	2500	4200
4433.96678	5	10	0.09986007	5.39244387	2500	4200
4169.95648	5.5	11	0.08424598	6.11625813	2500	4200
7734.69309	0.1	0	0	0.01323723	2500	4200
7466.11271	0.5	1	0.59932932	0.08090946	2500	4200
7198.23542	1	2	0.24933278	0.1795196	2500	4200
6929.44411	1.5	3	0.17126647	0.34681461	2500	4200
6660.93404	2	4	1.38092282	5.96558659	2500	4200
6392.49428	2.5	5	0.6473075	5.09754653	2500	4200
6123.98421	3	6	0.38041942	4.93023573	2500	4200
5855.47414	3.5	7	0.21919401	4.34990514	2500	4200
5587.03438	4	8	0.15982895	4.60307383	2500	4200
5318.52431	4.5	9	0.11095562	4.44876559	2500	4200
5050.08454	5	10	0.09267056	5.00421044	2500	4200
4781.57447	5.5	11	0.06685474	4.8536538	2500	4200
4513.13471	0.1	0	0	0.01078794	2500	4200
4244.62464	0.5	1	0.49866602	0.06731991	2500	4200
3976.18488	1	2	0.25689994	0.18496795	2500	4200
7829.61024	1.5	3	1.84123037	3.7284915	2500	4200

Tabla 5.6e. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
7558.92059	2	4	0.80913433	3.49546028	2500	4200
7287.52785	2.5	5	0.45650327	3.59496327	2500	4200
7016.34604	3	6	0.25572632	3.31421306	2500	4200
6745.23453	3.5	7	0.18266164	3.62492014	2500	4200
6474.05272	4	8	0.12482505	3.59496145	2500	4200
6202.87091	4.5	9	0.10296727	4.12847282	2500	4200
5931.68909	5	10	0.07354019	3.97117032	2500	4200
5660.50728	5.5	11	0.05448451	3.95557537	2500	4200
5389.32547	0.1	0	0	0.00897599	2500	4200
5118.21396	0.5	1	0.5137997	0.06936296	2500	4200
4847.03215	1	2	2.76184578	1.98852896	2500	4200
4575.85034	1.5	3	1.07884592	2.18466299	2500	4200
4304.66853	2	4	0.57062921	2.46511817	2500	4200
4033.48671	2.5	5	0.30687167	2.41661441	2500	4200
7956.86953	3	6	0.21310521	2.76184351	2500	4200
7685.47679	3.5	7	0.14265717	2.83103162	2500	4200
7414.78714	4	8	0.11583816	3.33613899	2500	4200
7143.3944	4.5	9	0.0817113	3.27621468	2500	4200
6872.70475	5	10	0.05993294	3.23637882	2500	4200
6601.66356	5.5	11	0.04533324	3.29119332	2500	4200
6330.69267	0.1	0	0	0.00924839	2500	4200
6059.72178	0.5	1	5.52369138	0.74569834	2500	4200
5788.68059	1	2	1.61826879	1.16515353	2500	4200
5517.7097	1.5	3	0.76083888	1.54069873	2500	4200
5246.73882	2	4	0.38358954	1.65710682	2500	4200
4975.76793	2.5	5	0.25572634	2.01384495	2500	4200
4704.72674	3	6	0.16643345	2.15697746	2500	4200
4433.75585	3.5	7	0.13238653	2.62721075	2500	4200
4162.78496	4	8	0.09192527	2.64744786	2500	4200
5362.11589	4.5	9	0.06659218	2.67001356	2500	4200
5111.39399	5	10	0.04986659	2.69279576	2500	4200
4860.6721	5.5	11	0.04670907	3.39107826	2500	4200
4609.9502	0.1	0	0	0.09942645	2500	4200
4359.22831	0.5	1	3.23653779	0.4369326	2500	4200
4108.50642	1	2	1.14125843	0.82170607	2500	4200
3857.78452	1.5	3	0.51145279	1.03569191	2500	4200
3607.13294	2	4	0.31965798	1.38092248	2500	4200
3356.41104	2.5	5	0.19972018	1.57279639	2500	4200
3105.68915	3	6	0.15445099	2.00168482	2500	4200

Tabla 5.6f. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	$\epsilon^{EPT}$	$\sigma_f$	$\sigma_T$
2854.96725	3.5	7	0.10505748	2.08486576	2500	4200
2604.24536	4	8	0.07491626	2.15758824	2500	4200
2353.52347	4.5	9	0.05540737	2.22155839	2500	4200
2102.80157	5	10	0.05138002	2.77452085	2500	4200

En la Figura 5.20a, b, c, d, e, f y g se presenta el comportamiento de los esfuerzos ante la temperatura generada por el propio material en la zona de los nodos estructurales, como consecuencia de la aplicación de incrementos de tensiones y compresiones en dichos nodos.

Se observa, que a medida que se incrementa la forma de tensión y compresión estas van generando la plastificación y la recrystalización dinámica elevando su temperatura, sufriendo la transición de los esfuerzos en decremento, que entre menor es la excitación de tensión y compresión mayores serán dichos esfuerzos; dando la impresión, que los nodos sufren la alta concentración de esfuerzos y la generación de temperaturas mayores a los coeficiente de dilatación térmica del acero, que oscila alrededor de  $12 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ; el cual transcurre en la manifestación de la superficie rugosa (Ver anexo D) y el principio de la manifestación de fisuras al centro de la plastificación, como se observa en la Figura 5.21 el mapa térmico en zonas del nodo y la Figura 5.22, muestra el esfuerzo térmico debido a la termo fluencia.

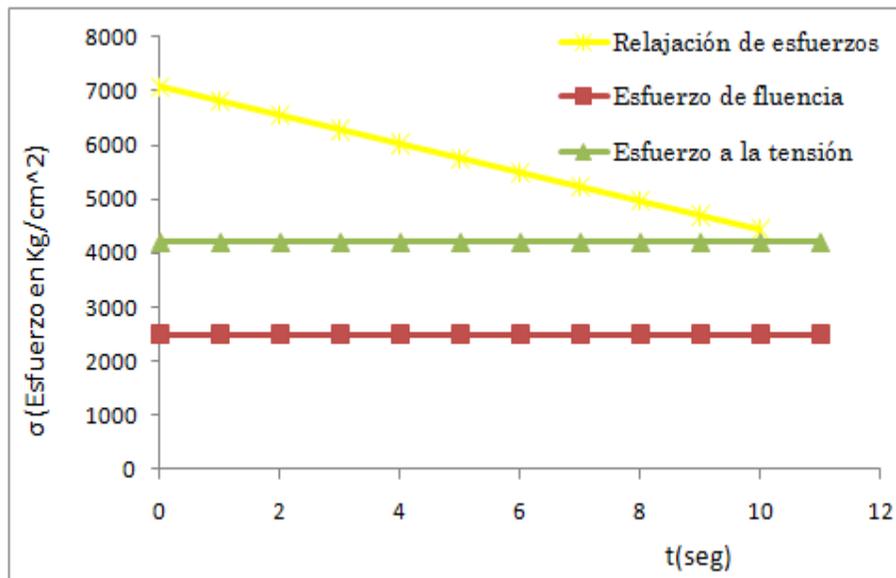


Figura 5.20a. Esfuerzo de relajación

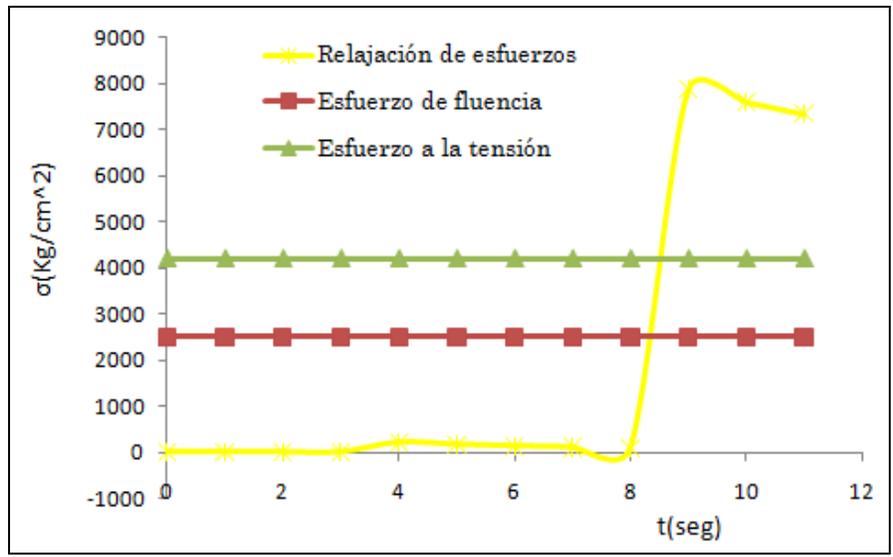


Figura 5.20b. Esfuerzo de relajación

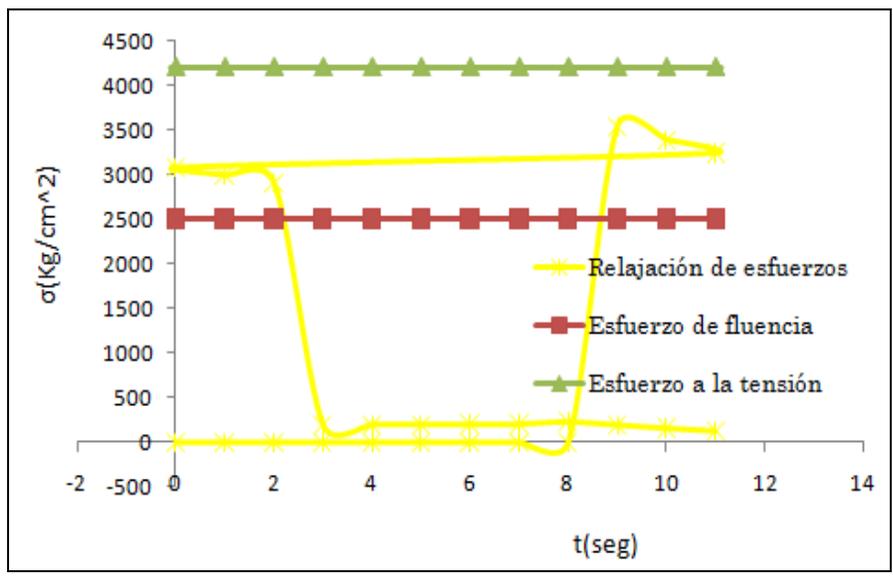


Figura 5.20c. Esfuerzo de relajación

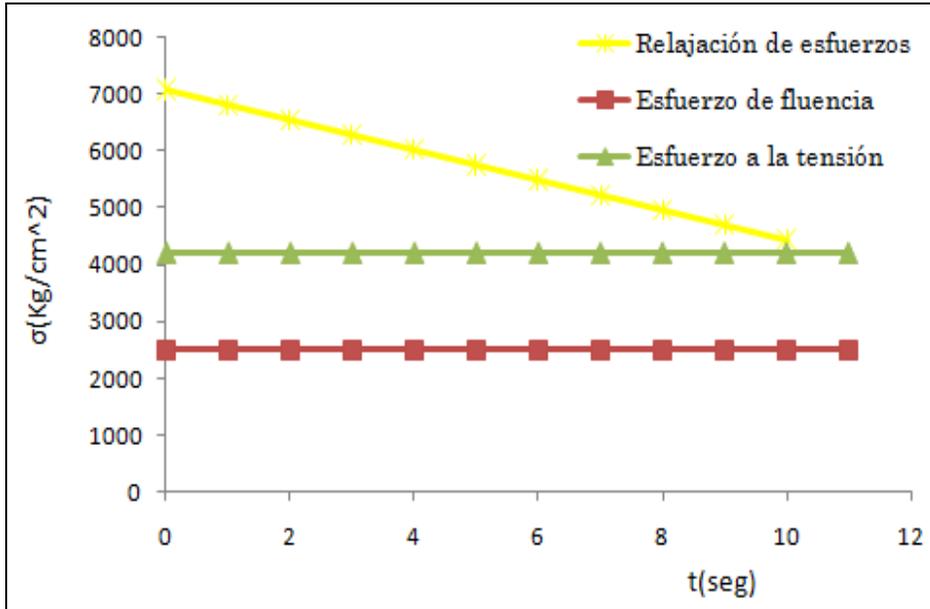


Figura 5.20d. Esfuerzo de relajación

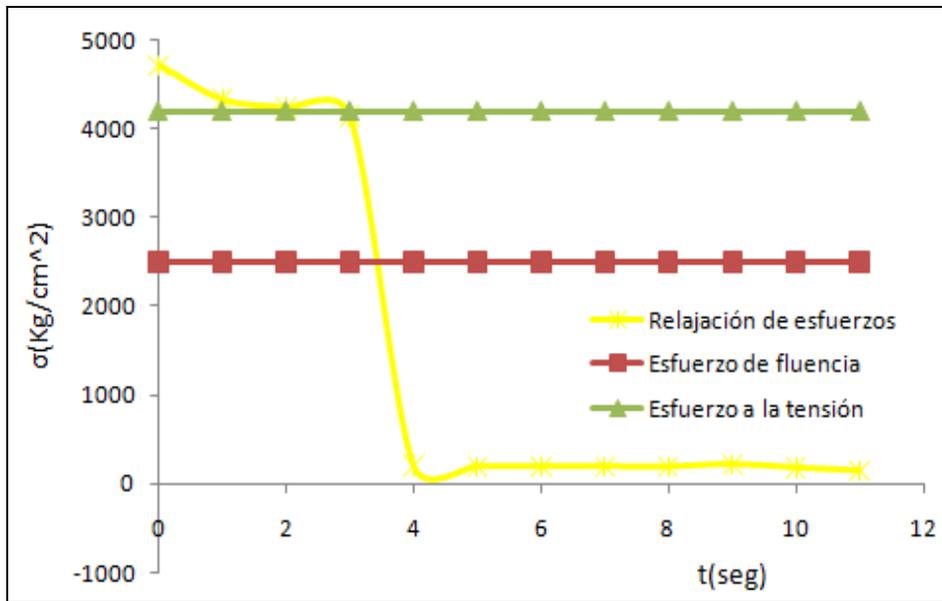


Figura 5.20e. Esfuerzo de relajación

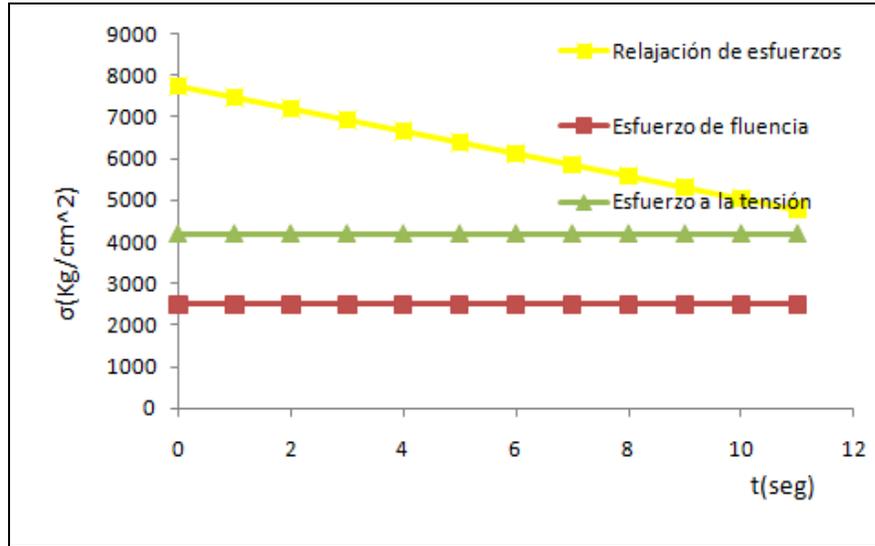


Figura 5.20f. Esfuerzo de relajación

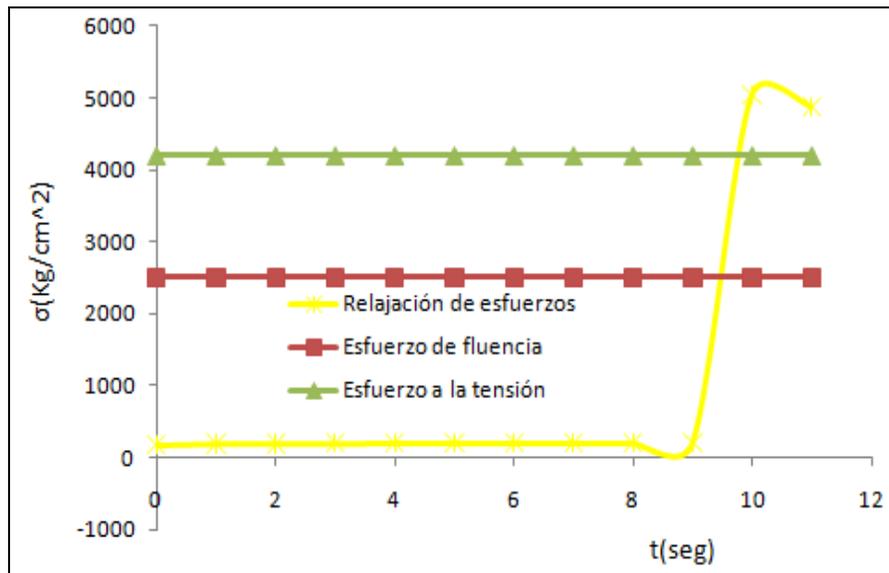


Figura 5.20g. Esfuerzo de relajación

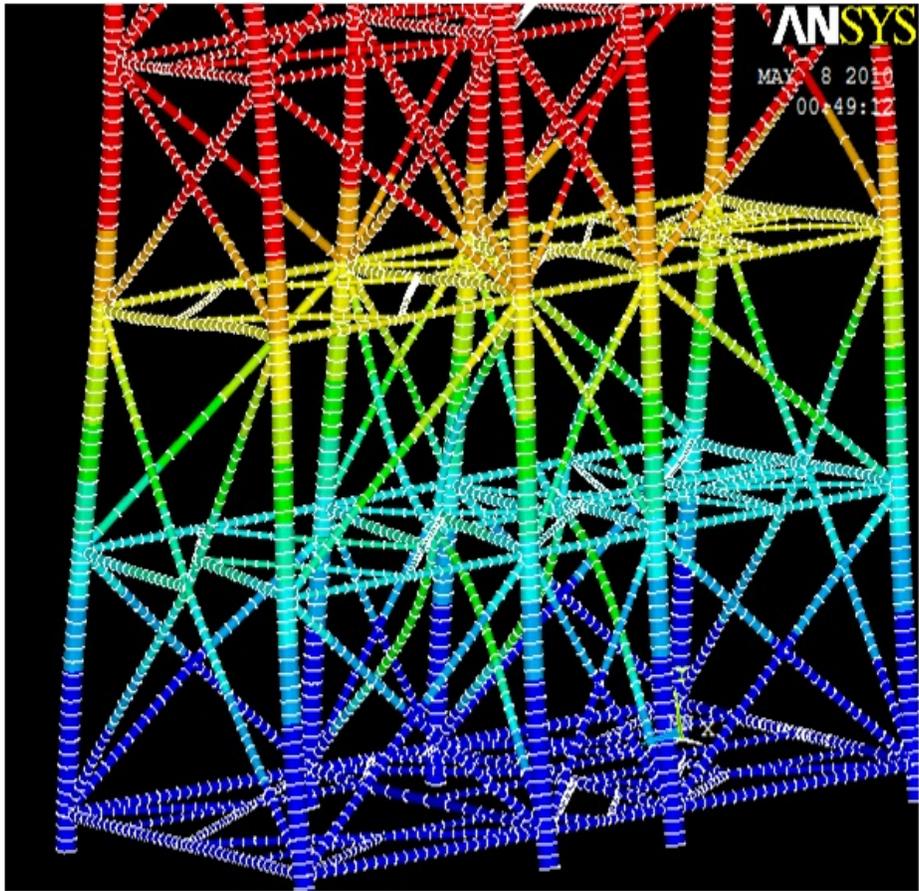


Figura 5.21. Esfuerzo térmico en los nodos estructurales

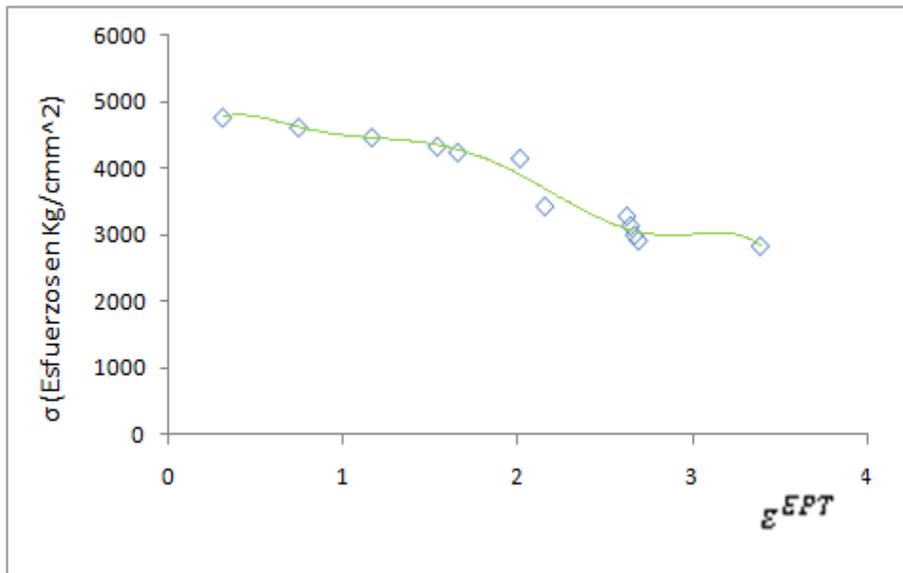


Figura 5.22. Esfuerzo de deformación térmica

Así mismo, la Figura 5.23, muestra la termofluencia en los nodos estructurales a consecuencia de dicha temperatura generada debido a la excitación dinámica de las cargas externas.

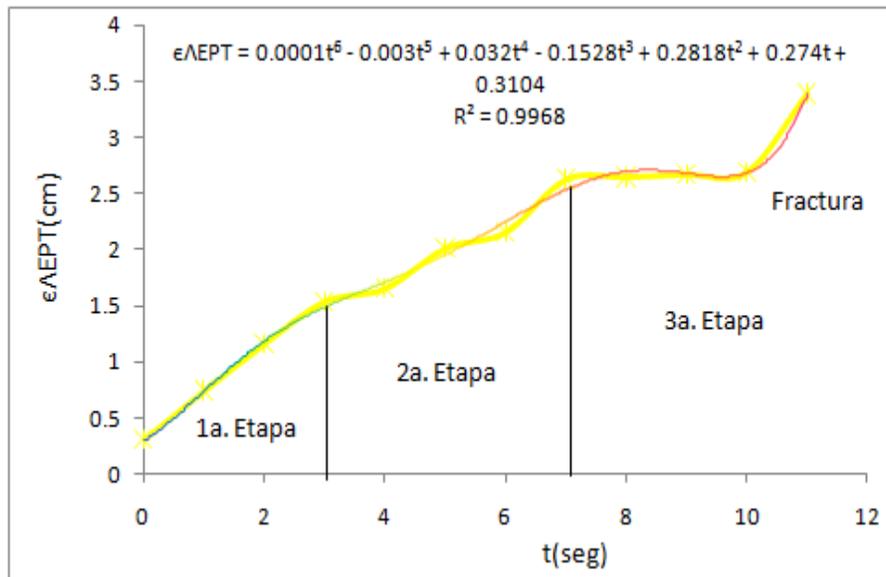


Figura 5.23. Termofluencia

La Figura 5.23, muestra que la temperatura en el nodo, crece polinómicamente en sexto grado, de un cierto valor de deformación térmica, comienza a tener su primera etapa de termofluencia después de un cierto tiempo y, al transcurrir el tiempo alcanza su segunda etapa hasta pasar a la tercera etapa después de un largo tiempo para manifestar la fisura.

De modo que en la Figura 5.22, se observa que al tener un esfuerzo alto, el material se opone a ser vencido por la fuerza externa, pero la fuerza externa son de mayores magnitudes que alcanzan un ciertos valores de  $4990 \text{ Kg/cm}^2$  y, los nodos de los elementos estructurales de la plataforma, al no poder soportar esta cargas externa comienza a generar cierta temperatura en sus nodos y comienza la relajación de los esfuerzos y su deformación va creciendo a consecuencia de esta fuerza externa, hasta alcanzar un valor de 3.4 cm.

Después de este valor, se comienza a generar dislocaciones en el material generando ciertas fisuras, debido a la rapidez de la deformación como se observa en la Figura 5.24, a consecuencia de la temperatura.

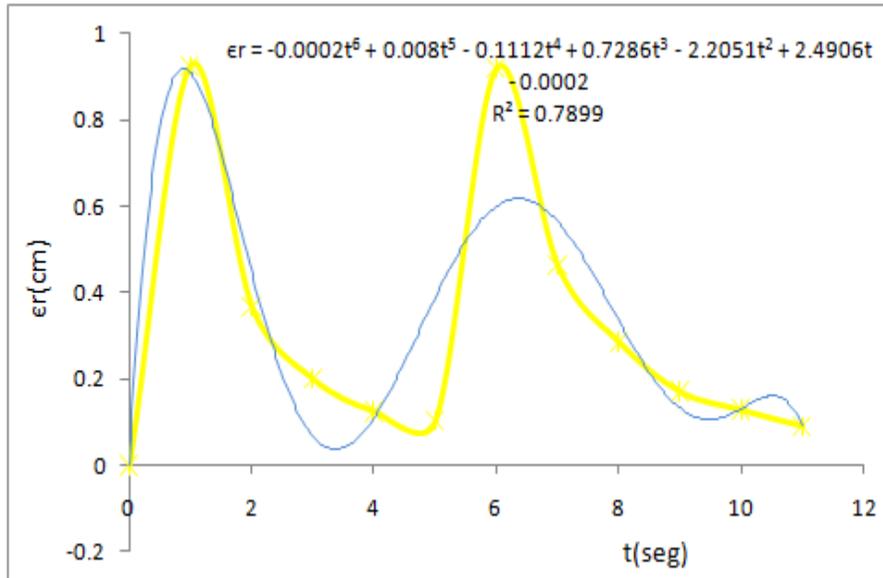


Figura 5.24. Rapidez de deformación

En normas y manuales de diseño como el API RP 2a, Norma Técnicas Complementarias del Distrito Federal (NTCDF) y el AISC, existen ciertas restricciones de desplazamiento de 5 cm para una estructura, con esta investigación que se ha realizado, dicho desplazamiento estaría restringido en 3.4 cm para que la estructura no sufra en sus nodos fisuras y lleve a esta a la grieta en los nodo estructurales transformando a la estructura en una inestabilidad global; debido que la soldadura en los nodos estructurales al hallarse en desventaja el material en absorber la energía interna generada por las cargas (fuerza de oleaje, fuerza de viento, poco a poco su resistencia a la tensión y de fluencia) se va debilitando, sufriendo así la transición de elasticidad a la plasticidad y de la plasticidad a la plasticidad térmica y arrugamiento del material en el centro de la disipación energética y de esta disipación energética a la plasticidad térmica, de esto a la fisura y de la fisura a la Fractura debido a rapidez de la deformación con respecto al tiempo; como los que se observa en la Figuras 5.24. Y así mismo, se muestra en la Figura 5.24, que el factor del coeficiente térmico para los nodos estructurales está en el valor de 0.9, el cual garantiza su integridad estructural evitando así el riesgo de la misma.

# CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO

---

---

## 6.1. Discusión

Del análisis estructural con el software Ansys se obtuvieron los resultados de los esfuerzos críticos que tienden a colapsar a la plataforma dicho colapso se observa en la Figura 5.10, muestra a los elementos estructurales tubulares, dicho esfuerzos críticos son evidencias de excedencia de esfuerzos en los elementos estructurales.

Así mismo la Figura 5.14, da a conocer la concentración de esfuerzos plásticos en los nodos tipos K-T, alcanzando deformaciones superiores a los de la fluencia, observándose un comportamiento logaritmo antes de la fisura, originando tensiones residuales a medida que se incrementa el esfuerzo y al mismo tiempo generando una abolladura, haciendo que su valor a la rigidez y flexión descienda, de modo que los factores de concentración de esfuerzos a tensión y compresión se da a conocer en la Figura 5.17 y la Figura 5.18 muestra los valores de concentración de esfuerzos. Cuya concentración de esfuerzo libera una gran cantidad de energía, disipándose el 95% y el 5% es absorbido por el propio material de modo que se generan los esfuerzos térmicos y estos están en el orden de 0.9, dichas concentración de esfuerzos generan en la superficie un arrugamiento, mismo perfil de arrugamiento se da a conocer en la Figura 5.29, generándose la fluctuaciones d esfuerzos en los nodos estructurales como se nota en la Figura 5.28, corroborándose el valor de 0.9 generando el rango plástico con los de esfuerzos térmicos y los de los exponente de Hurt.

## 6.2. Conclusiones

Se puede concluir que los esfuerzos críticos se presentan en las piernas de la plataforma, las cuales tienden a colapsar al sistema estructural, como se observa en los colores preventivos de colapso que al calce tiene la Figura 5.10. Los colores que describen en que rango de esfuerzos críticos se encuentra la plataforma son:

El color azul, indica que la estructura tiene resistencia ante las fuerzas actuantes. El color amarillo, indica que la estructura se halla en su estado de exceder el esfuerzo de fluencia aceptable como se ve en la Figura 5.11. El color rojo, indica que la estructura ha excedido su esfuerzo de fluencia, indicándonos el estado de alerta a que la plataforma se colapse debido a las subsidencias de cargas que soporta, afecta su integridad estructural.

Por otra parte, el análisis de esfuerzos de los nodos estructurales, muestran claramente que las uniones soportan una gran cantidad de esfuerzos que llegan el momento de trabajar en un rango plástico; sin embargo, cuando el factor de concentración de esfuerzo rebasa el valor de 0.9, tiende al rango de la fisura, como se muestra en la Figura 5.18. Este análisis confirma una vez más el por qué las estructuras de este tipo se diseñan con un factor de seguridad (conocido también como “factor de miedo”) del orden de 0.72; obviamente esto hace que los costos en la fabricación de las plataformas sean muy elevados.

Esto quiere decir que cuando se diseña una estructura de este tipo normalmente se toma en consideración un factor de concentración de esfuerzo en los nodos de un valor de 0.85, el cual resultaría un proyecto conservador y estaría trabajando en el punto óptimo de la estructura sin que se vea afectada su rigidez.

En particular, en la (Fig. 5.17) se observa una disminución de estos factores de concentración en la zona de compresión mientras que en las tensiones se va incorporando al rango plástico local. En relajación a los esfuerzos, por otro lado, se observa también que la concentración de esfuerzo es el punto de partida para una fisura ocurriendo así el agrietamiento pudiéndose obtener resultados catastróficos.

Esta concentración de esfuerzo, genera cierta energía térmica, siendo este un proceso termodinámico del que su comportamiento térmico transforma a la concentración de esfuerzo en dislocaciones, acelerando de este modo el proceso de fisuras en el centro de la concentración de esfuerzo, generando con ello un riesgo estructura y falta de su integridad de la misma.

Así mismo, esta concentración de esfuerzo transforma a la superficie en rugosa tendiendo a ser de un orden fractal, de modo que en el rango escalado los esfuerzos en nodos, poseen niveles de tendencias logarítmicas, que el material se transforma en insuficiente de soportar grandes esfuerzos y cambian en el rango crítico en decaimiento de esfuerzos

De modo que estos esfuerzos no deberían de sobrepasar el coeficiente de seguridad, siendo el exponente de Hurst indicativos en la prevención de fisuras y además en la prevención de riesgos estructural.

### **6.3. Futuro trabajo**

Desarrollar nuevos métodos de evaluación de integridad de las estructuras existentes.

Llevar a cabo una evaluación de las tecnologías existentes de monitoreo de la integridad estructural de plataformas marinas fijas.

Realizar un análisis estructural con los factores de 0.85 y 0.9, aplicándolas a normas y reglamentos que rigen el diseño estructural

Posteriormente llevar a cabo un experimento en laboratorio de los elemento de nodos estructurales tipo K-T, sometiéndolos a esfuerzos y de este modo corroborar los resultados hallados en esta tesis.

# Referencias.

---

---

1. Victor M. Valdes. 1973. Curso de Ingeniería Costa Fuera. UNAM, PP.1-50
2. Wang J. y, Kieran O. 2000. Offshore Safety Assessment and Safety Based Decisions Making The Current Status and Future Aspects. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.122.
3. Moan T. y, Song R. 2000. Implications of Inspection Updating on System Fatigue Reliability of Offshore Structures. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.122.
4. Bea, R.G., and Young, C. 1993. Loading and capacity effects on platform performance in extreme condition storm waves and earthquakes. *Proc. 25th Annual Offshore technology Conference*, paper No. OTC 7140, Houston, US.
5. Galano L., Spadaccini, O. & Vignoli, A. 1995. A study on the correlation between structural and environmental data of an offshore platform. *Proc. 5th international Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE'95, The hague, Vol. I, pp. 207-214, ISOPE.
6. Shetty, N. K., 1994. Selective enumeration method for identification of domain failure paths of large structures. *Proc. 13th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, OMAE, Houston, Vol. II, pp. 381-391, ASME.
7. Thoft-Christensen, P. and Murotsu, Y. 1986. Application of structural system reliability theory. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany.
8. Chandrasekaran S., Jain A. K. and Chandak N. R. 2007. Response behavior of triangular TLPs under regular waves using Stokes non-linear wave theory. ASCE, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 133, No. 3, pp. 230-237.
9. Moses F. y Stahl B. 2000. Calibration Issues in development of ISO standards for Fixed Steel Offshore Structures. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, vol.122.

10. Gupta S., Shabakhty N. y Geldera P. V. 2007. Fatigue damage in randomly vibrating jack-up platforms under non-Gaussian loads. ELSEVIER.
11. Raizer V. D. 2000. Probabilistic Analysis of Optimal Lengths between Thermal Joints. Central Research inst. For Build. Str. (TSNIISK), Moscow, Russia.
12. Tello F. C., Campos D. y, Pérez J. G. 2003. Reliability of Tubular Joints of Marine Jacket Plataforms. 22nd Internacional Conference on Offshore Mechanic and Artic Engineering (OMAE), Cancun, Mexico.
13. Cassidy M. J., Houlsby G. T., R. y, Taylor R. E. 2003. Probabilistic Models Applicable to the Short-term Extreme Response Analysis of Jack-Up Platforms. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2003 by ASME, Vol.125.
14. Melchers R. E. 2003. Probabilistic Models for Corrosion in Structural Reliability. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
15. Cole G. F., Ronalds B. F. y, Fakas E. 2003. The Interaction Between Strength and Fatigue Reliability for a Minimum Structure in Shallow Water. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
16. Hai-Houng S. y Soares C. G. 2003. Reliability-Based Structural Desing of Ship-Type FPSO Units. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
17. Ronalds B. F., Anthony N. R, Tuty S. y Fakas E. 2003. Structural Reliability of Monopods Under Storm Overload. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
18. Di Paola M. y Failla G. 2003. Stochastic Response of Offshore Structures by a New Approach to Statistical Cubicization. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
19. Young Liaw C. y Yuan Zheng X. 2003. Polynomial Approximations of Wave Loading and Superharmonic responses of Fixed Structures. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.125.
20. Rodriguez G., Soares C.G., Pacheco M. y, martell E.P. 2003. Wave Height Distribution in Mixed Sea States. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, by ASME, Vol.124.

21. Tuty S., Cassidy M. J. y, Ronalds B. F. 2002. Investigation of Shallow Water Kinematics and Local Loading Effects on Reliability of Minimum Structures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.124.
22. Garbatov Y y Soares C. G., 2002. Bayesian Updating in the Reliability Assessment of Maintained Floating Structures” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.124.
23. Ronalds B. F., Bjarke T. y Trinh S. 2002. Influence of Non- Proportional Environmental Loading on the Reliability of Production Jack- ups. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.124.
24. Lanning D. B. y Shen M. H. S, 2000. Reliability of Welded Structures Containing Cracks in Heat-Affected Zones. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.122.
25. Thandavamoorthy T. S., 2000. Investigations on Internally Ring Stiffened Joints of Offshore Platforms. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.122.
26. Chakrabarti S. K. 2002. Numerical simulation of Multiple Floating Structures with Nonlinear Constraints. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.124.
27. Bhattacharyya S. K. y Selvam R. P. 2003. Parameter Identification of a Large Floating Body in Random Ocean waves by Reverse MISO Method. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.125.
28. Teigen P. y Naess A. 2003. Extreme Response of Floating Structures in Combined Wind and Waves. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.125.
29. Gudmestad O. T. 2000. Challenges in Requalification and Rehabilitation Offshore Platforms on the Experience and Developments of a Norwegian Operator. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.122.
30. Bea R. G. 2000. Performance Challenges in Requalification and Rehabilitation of Offshore Platforms on the Experience and Developments of a Norwegian Operator. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.122.

31. Bea R. G., Inversen R. y Xu T. 2001. Wave in Deck Forces on Offshore Platforms. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.123.
32. Moan T. 2000. Recent Research and Development Relating to Platform Requalification” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, by ASME, Vol.122.
33. Rodríguez L. 2009. Un vistazo al pasado Museo del Petróleo. rev. *El mundo del petróleo*, tomo 36, pp.78-79.
34. Cinco Ley H. 2008. Industria del Petróleo Mexicana. [www.pemex.com](http://www.pemex.com)[34].
35. Rodriguez E. 2009. Industria Petrolera. rev. *El mundo del petróleo*, tomo 36, pp.48-49.
36. Levy y Walter. (1971). Oil power. En *Foreign Affairs* Vol. 79 No. 4, US; p: 652 – 668.
37. PetroStrategies. 2008. Leading Oil and Gas Companies Around the World1. [http://www.petrostrategies.org/Links/Worlds\\_Largest\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Companies\\_Sites.htm](http://www.petrostrategies.org/Links/Worlds_Largest_Oil_and_Gas_Companies_Sites.htm).
38. International Energy Outlook. 2003. Prospectiva del mercado de gas licuado de petróleo. [http://www.sener.gob.mx/res/PE\\_y\\_DT/pub/prospecogas\\_natural2003.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/PE_y_DT/pub/prospecogas_natural2003.pdf)
39. Red Proteger higiene y seguridad, 2008. [http://www.redproteger.com.ar/Escuela%20de%20Seguridad/Grandes\\_Accidentes/plataforma\\_piper\\_alpha\\_1988.htm#\\_ftnref1](http://www.redproteger.com.ar/Escuela%20de%20Seguridad/Grandes_Accidentes/plataforma_piper_alpha_1988.htm#_ftnref1).
40. El Mundo. 2001. Se hundió la Plataforma de Petrobras. <http://pdf.diariohoy.net/2001/03/21/pdf/22.pdf>.
41. Avance. 2010. Se hunde plataforma de gas, <http://www.avancediario.com.ve/index.php/avances-informativos/en-el-pais/1473-se-hunde-plataforma-de-gas>.
42. Valencia J. O. 2010. Ecocidio petrolero en el Golfo de México: ¿Cómo detenerlo?, <http://www.dw-world.de/dw/article/0,,5530556,00.html>.
43. Bucay B. 2001. Apuntes de Historia de la Química Industrial en México. *Revista de la Sociedad Química de México*, Vol. 45, No. 3, pp. 136-142.

44. Chapa C. A. y Flores R. L. 2001. The Cretaceous-Paleocene Boundary in the Subsurface Campeche Shelf, Southern Gulf of Mexico. In The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems. AAPG Memoir 75, p 389-395.
45. Bogaert A. F. 2007. Ensayo sobre El Dramático Cambio Estructural en la Industria Petrolera. International Energy Agencia (IEA), p. 4.
46. Donoso H. R. y Tampier B. J. 1988. Nuevos Esquemas de Integración Sectorial: el caso de la industria química y petroquímica latinoamericana. Rev. Intal, No. 135, Pp.28-38.
47. Sarabia A. A. 1995. La Teoría General de Sistema. edit. Graficas Marte, p. 26.
48. Lajous A. 2006. México: Producción y reservas de petróleo y gas natural. [http://www.colmex.mx/ceh/petroleo/misc/lajous\\_mexico\\_produccion.pdf](http://www.colmex.mx/ceh/petroleo/misc/lajous_mexico_produccion.pdf).
49. Adnmundo. 2007. Derrame petrolero en el Golfo de México., [http://www.adnmundo.com/contenidos/ambienteyenergia/pemex\\_derrame\\_petroleo\\_golfo\\_mexico\\_e241007.html](http://www.adnmundo.com/contenidos/ambienteyenergia/pemex_derrame_petroleo_golfo_mexico_e241007.html).
50. El Semanario. 2007. Choque de Plataformas. [http://www.elsemanario.com.mx/news/news\\_display.php?story\\_id=2803](http://www.elsemanario.com.mx/news/news_display.php?story_id=2803).
51. Becker T. L., Cannon R. M., Ritchie R. O. 2000. An approximate method for residual stress calculation in functionally graded materials, Mechanics of Materials, Elsevier, USA.
52. Timoshenko S. 1957. Resistencia de materiales, Edit. Espasa-Calpe, S.A. México, p.25.
53. Vergara, M.E. 2004. Evaluación de los parámetros de plasticidad y daño de un aluminio 7075 t7, Congreso conamet/sam, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, 4° Piso, Santiago, Chile.
54. Dier, F. A. 2005. Tubular Joint Technology for Offshore Structures, MSL, Engineering, Limited, Haleworth House, Steel Structures. UK.
55. Nazari A., and Durack, J. 2007. Application of the hot spot stress method to the fatigue assessment of hollow section shiploader boom connections, 5th Australasian Congress on Applied Mechanics, Australia, 2007.

56. Liu D. K. 1988. Nonlinear Vibrations of Imperfect Thin- Walled Cylindrical Shells. Geboren te China Vliegtuigbouwkundig ingenieur.
57. Sekulovic, M. and Danilovic, M. 2004. Static inelastic analysis of steel frames with flexible connections, *Appl. Mech.*, Vol.31, No.2, pp.101-134, University of Belgrade, Serbia.
58. Grant C.K., Dyer R.C. and Leggett I.M. 1995. Development of a new metocean basis for the NW shelf of Europe. Proc. 27th Annual Offshore Technology Conference, paper no. OTC 7685, Houston, US.
59. Hardrath H. F. and Ohaman L., A. 1951. Study of Elastic and Plastic Stress Concentration Factors Due to Notches and Fillets in Flat Plates. National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), USA.
60. Bejorn H. S., Oddvar E.I., Amdahi J. and Johansen A. 1990. On the capacity of tubular joints subjected to extreme cyclic loading, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, Norway.
61. Grecea D., Stratan A. and Dubin D. 2003. "Plastic rotation capacity of mr beam-to-column joints under cyclic loading, of Steel Structures and Structural Mechanics, The Politehnica University of Timisoara, European Convention for Constructional Steelwork, Technical Committee (ECCS-TC10-03-528).
62. Poursaeidi E., Rahimi G. H. and Vafai A.H. 2004. Plastic Buckling of Cylindrical Shells With Cutouts, *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)* Vol. 5, Nos 3-4, Pages 191-207.
63. Sanjuán A.P. y Juha M.J. 2004. Análisis por elementos finitos del estado de esfuerzo y deformación de una sección geoméricamente similar a la encontrada en un horno para producción de cemento, Grupo de investigación en materiales y procesos de manufactura (GIMYP), Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Km 5 antigua vía a Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia.
64. Sibaja R. A., Ramírez T. M. 2003. Estimación de Daño por Fatiga Mediante Mecánica del Daño Continuo. *Rev. Ingenierías*, octubre-diciembre, vol. VI, No. 21, Universidad Veracruzana, México.
65. Dugdale D.S., Ruiz C. 1973. *Elasticidad para técnicos*, Edit. Reverte. S.A. pp.70-74, México.
66. Marshall P.W. 2004. Review of tubular joint criteria, *Connections in Steel Structures*, V – Amsterdam, Texas, USA.

- 67 Boulding, E. K. 2007. La teoría general de sistemas. Rev. Politécnica No. 4.
- 68 Checkland, P. 1993. Pensamiento de Sistemas, práctica de sistemas. Edit. Grupo Noriega, México. P.49.
- 69 García, C. A. 1995. Notas sobre la teoría general de sistemas. Edit. Revista general de información y documentación, ISSN 1132-1873, Vol. 5, N° 1, pp. 197-214.
- 70 Blanchard, B. S. 1995. Ingeniería de Sistemas. Edit. Gráficas Marte, España.
- 71 Gigch, P. V. J. 1997. Teoría General de Sistemas. Edit. Trillas, 5 Reimpresión, pp. 74.
- 72 Moreno, P. A. 2007. Teoría General de Sistemas Modulo. Edit. Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Bogotá, Primera impresión, p. 48.
- 73 Bertalanffy L. V., Ashby, W. R. y Weinberg, G. M. 1987. Tendencias en la teoría general de sistemas. Edit., Alianza universidad, Pag. 29-30, 147-148.
- 74 Gigch, J. P. V. 1990. Teoría General de Sistemas. Edit., México, Editorial Trillas. Pp. 196-198.
- 75 Alvarado, G. S. M. 1996. Pedagogía Hacia el Tercer Milenio. Vol. 1, No.1, pp. 28-46.
- 76 Romano, L. O. 1992. Simplicidad y complejidad. <http://idd0098d.eresmas.net/SIMPCOMP.HTM>
- 77 Kirshbaum, D. Introduction to Complex Systems. <http://www.calresco.org/intro.htm#def>.
- 78 Reynoso, C. 1998. Teorías y Métodos de la Complejidad y el Caos: Una exploración antropológica. Teorías Antropológicas Contemporáneas Buenos Aires Biblos.
- 79 Laszlo, B. y Bonabeau, E. 2003. Scale-Free Networks. Scientific American: Vol. 50.

- 80 Álvarez, F. M. 2007. Taller transdisciplinario sobre el enfoque de la complejidad.  
[http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/complejidad/fundamentos\\_historico\\_filosoficos\\_de\\_la\\_complejidad.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/complejidad/fundamentos_historico_filosoficos_de_la_complejidad.pdf).
- 81 Packel, E. W. y Traub, J. F. 1987. Information-based Complexity, Nature, Reino Unido: Nature Publishing Group no. 328.
- 82 Hernández, E. A., Medina, V. E. y Figueroa N. J. 1990. Problema de Tag de e. Post: implementación y análisis de sus implicaciones para los fundamentos de la computación clásica, XXXIII Congreso Nacional de Física, Ensenada, B. C., México, 22-26 de octubre.
- 83 Maldonado, C. E. 2003. El Problema de la Filosofía del Conocimiento y el Estudio de los Sistemas Complejos. Rev. Praxis Filosóficas, No. 17 Universidad Externado de Colombia.
- 84 Rea, P. L. M., et. al. 2009. Modelo híbrido de percolación y elemento finito para el análisis micromecánico de suelos. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, V. 26, núm. 2.
- 85 Aracil, J. 1995. Dinámica de Sistemas. Graficas Marte, pp. 49-51.
- 86 Gumiel, P., et. al. 1996. Característica de la Geometría Fractal de Varios Sistemas filonianos mineralizados del Macizo Hespérico. Su Aplicación a la prospección. Parte I: Mineralizaciones de Oro”, Rev. Geogaceta Vol. 20.
- 87 Sastre, M. A. <http://divulgamat.ehu.es/weborriak/TestuakOnLine/07-08/PG-07-08-Sastre.pdf>
- 88 Fernández, C. R. et. al. Los Fractales. [http://divulgamat.ehu.es/weborriak/Exposiciones/ExpoDe/Dali/Archivos/dali6\\_bis.pdf](http://divulgamat.ehu.es/weborriak/Exposiciones/ExpoDe/Dali/Archivos/dali6_bis.pdf).
- 89 Mandelbrot, B. 1997, La geometría fractal de la naturaleza. Barcelona. Editorial Tusquets.
- 90 Méndez, U. O. y Rivera, M. H. 1997. Geometría de fractales y autoafinidad en cinencia de materiales. Rev. Ingeniería, Vol 1. No.1.
- 91 <http://usuarios.multimania.es/sisar/fractales/bibliografia.php>
- 92 Braña, J. P. 2003. Introducción a la Geometría fractal. <http://www.docentes.unal.edu.co/cibermudezs/docs/CursoGeometriaFractal.pdf>.

- 93 Soria, F. G. 2000, Un Universo Fractal. [http://www.fgalindosoria.com/transfinitoydinamicadimensional/continuidadimensional/cont\\_di2.pdf](http://www.fgalindosoria.com/transfinitoydinamicadimensional/continuidadimensional/cont_di2.pdf)
- 94 <http://www.dmae.upm.es/cursofractales/capitulo1/2.html>.
- 95 Juárez, S. G. procesos hurst y movimiento browniano fraccional en mercados fractales: valuación y aplicaciones a los derivados y finanzas. <http://www.mexder.com.mx/inter/info/mexder/avisos/Proceso%20Hurst%20y%20Movimiento%20Browniano%20Fraccional%20en%20Mercados%20Fractales.pdf>.
- 96 Juárez, S. G. 2007. procesos hurst y movimiento browniano fraccional en mercados fractales. Rev. Administración y finanzas. Vol. 1. No.1. pp 1-21
- 97 Nilson, H. A. 2001. Diseño de Estructuras de Concreto. Edit. Mc Graw Hill, [97]
- 98 Sieh, Y. Y. 1986. Teoría Elemental de Estructuras. Edit., Prentice-Hall, PP. 2-3, 147-167, 206.
- 99 Vedia, A. L. y Syoboda, H. 2002. Estado de tensiones y de deformaciones. Dpto. Ingeniería Mecánica y Naval, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires, p.1-2.
- 100 Pytel, A. y Singer, L. F. 1987. Resistencia de materiales. Edit. Harper & Row. Nueva York.
- 101 Gere, M. J. 2002. Mecánica de Materiales. Edit. 5ª, edit. Thomson, pp.662-669, 774.
- 102 McCormac, J. y Elling, R. E. 1996. Análisis de estructuras. Edit. Alfaomega.
- 103 Ruiz, C. M. y Díaz, B. E. 2003. Mecánica de Estructuras libro 1 Resistencia de Materiales. Edit. Universidad Politécnica de Cataluña, SL. Barcelona, pp. 1-2.
- 104 Mckenzie, M. C. W. 2006. Example in structural analysis. Edit. Taylor y Francis. London and newyork.
- 105 Strelkóv, 1978, "Mecánica", edit. Mir Moscow, P. 293.

- 106 Morley, A. D. S. y Mech, M. I. E. 1956. Teoría de las Estructuras. Edit. Nacional Edinel, S. de R.L. México, D.F., p. 1.
- 107 Celigueta, T. J. 1998. Curso de Análisis Estructural. Escuela Superior de Ingeniería Industria de San Sebastian y del CEIT, pp.17-18, 25.
- 108 Mroginski, Javier L. et. al. 2004. Análisis Tridimensional de Sólidos por el MEF. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.
- 109 Torres, M. et. al. 2004. Estimación de Esfuerzo de Fluencia para Materiales Laminados en Frio. Rev. Latinoamérica de Metalurgia y, Materiales, vol. 24.
- 110 Vable, M. 2003. Mecánica de Materiales. Edit. Oxford, pp.99-100., 718.
- 111 Ferdinand, P. B. et. al. 2004. Mecánica de Materiales. Edit. McGraw-Hill, pp. 672-674.
- 112 Segrera, L. L. D. 2009. Introducción a la mecánica del medio continuo para ingenieros estructurales. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- 113 Timoshenko, S. y Goodier, J.N. 1934. Theory of Elasticity. Edit. McGraw-Hill, pp. 151, 162.
- 114 Feodósiev, V. I. 1997. Resistencia de Materiales. URSS.
- 115 Pfeiffer, P. A. and Kulak, R. F. 1999. Residual Stress Effects in Containment Analysis. Reactor engineering Division, A. N. L., USA.
- 116 Ppov, E. P. 1996. Mecánica de solido. Edit. Limusa, pp.91-92.
- 117 Riley, W. F. 2001, Mecánica de materiales. Edit. Limusa, pp.40.
- 118 Beyaev, N.M. 1979. Strength of Materials. Edit. Mir Moscow, pp. 135.v.
- 119 Hartmann, F. and Katz, C. 2007. Structural Analysis with Finite Elements. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- 120 Shanley, R. F. 1971. Mecánica de Materiales. Edit. McGraw-Hill, pp.295.
- 121 Timoshenko, et. al., 1961. Theory of Elastic Stability. Eit. McGraw-Hill, pp.300.

- 122 Askeland, D. R. y Phule, P. P. 2004. Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Edit. Thompson, pp.135, 326.
- 123 Irving H. S. y Ferro, G. H. 1975. Introducción a la Mecánica de Sólidos. Edit. Prentice Hall Internacional, pp. 89,461.
- 124 Ferreira, B. J. G. y Soares, C. G. 2004. Resistencia a Colapso de Miembros Tubulares no Reforzado. Unidade Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto superior Técnico. APMTAC, Portugal.
- 125 Charles D. B. 1962. The Buckling of Cylindrical Shells with an Initial imperfection under axial compression loading. California Institute of Technology.
- 126 Chakrabarty, J. 2006. Theory of Plasticity. Elsevier Butterworth-Heinemann
- 127 Martinez, L. 1983. Análisis Energético de un Mecanismo de Fractura por Termofluencia. Rev. Mexicana de Física, UNAM.
- 128 Datsko, J. Solid Materials. Chap. 32 in Joseph E. Shigley, Charles R. Mischke, and Thomas H. Brown, Jr. (eds.), Standard Handbook of Machine Design, 3rd ed., McGraw-Hill, New York, 2004. See also Joseph Datsko, "New Look at Material Strength," Machine Design, vol. 58, no. 3, Feb. 6, 1986, pp. 81–85.
- 129 Timoshenko, S. 1940. Strength Materials. Edit. D. Van Nostrand Compani, Toronto New York London, pp.425-428.
- 130 Navarro, A. y Madrigal, C. 2009. Ecuaciones de Flujo Plástico para el Método de las Deformaciones Locales con Carga Multiaxial. Rev. Análisis de la Mecánica de la Fractura, Vol. 2
- 131 Gere, M. M. y Goodno, B. J. 2009. Mecánica de Materiales. Edit. Cengage Learning, p. 25.
- 132 Kuhlmann, D. 1950. On the Theory of Plastic Deformation. Laboratory of physical, University of Bristol.
- 133 Callister, W. D. 2007. Introducción Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Edit. Reverte, p.161.
- 134 Mendoza, A. et. al. 1999. Introducción a la deformación plástica por movimiento de dislocaciones mediante el uso de analogías y el concepto de energía. Revista Mexicana de Física, UNAM.

- 135 A. Mendoza, et. al., 1999, "Introducción a la deformación plástica por movimiento de dislocaciones mediante el uso de analogías y el concepto de energía", Revista Mexicana de Física, UNAM.
- 136 Lubliner, J. 2006. Plasticity Theory. University of California at Berkeley
- 137 Carlborg, G. R. 2008. Cálculo Plástico de Estructuras de Barras: Teoría. Departamento de Mecánica de Estructuras e I. H., Universidad de Granada
- 138 Jenkins, W.M. 1980. Analisis y Mecánica de las Estructuras. Middlesbrough
- 139 Dalmau, M. R. y Vilardel, J. 2003. Análisis plástico de estructuras. Introducción. Universitat Politècnica de Catalunya.
- 140 API, Specification for line pipe. American Petroleum Institute (API-5L), 43rd Edition, December, USA., 2004.
- 141 Sekulovic, M. and Danilovic, M. 2004. Static inelastic analysis of steel frames with flexible connections, Appl. Mech., Vol.31, No.2, pp.101-134, University of Belgrade, Serbia.
- 142 Sanjuán, A.P. and Juha, M.J. 2004. Análisis por elementos finitos del estado de esfuerzo y deformación de una sección geoméricamente similar a la encontrada en un horno para producción de cemento, Grupo de investigación en materiales y procesos de manufactura (GIMYP), Dpto. de Ingeniería Mecánica, Universidad del Norte, Km 5 antigua vía a Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia.
- 143 Timoshenko, S. 1957. Resistencia de materiales, Edit. Espasa-Calpe, S.A. p.25, México.
- 144 Lloyd's. 1997. Stress concentration factors for simple tubular joints, HSE, UK.
- 145 Vinje, T. and Haver, S. 1994. On the non-gaussian structure of ocean waves, Proc. Behaviour of Offshore Structures (BOSS '94), Massachusetts, Vol. 3, pp. 453-480, July, US.
- 146 Chen, W.F. and Richard, J.Y. 2003. The civil engineering handbook, Crc Press, second edition, USA.

- 147 Vergara, M.E. 2004. Evaluación de los parámetros de plasticidad y daño de un aluminio 7075 t7, Congreso Conamet/Sam, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Beauchef 850, 4º Piso, Santiago, Chile.
- 148 Grant, C.K., Dyer, R.C. and Leggett, I.M. 1995. Development of a new metocean basis for the NW shelf of Europe, Proc. 27th Annual Offshore Technology Conference, paper No.OTC 7685, Houston, US.
- 149 Vallina, M. M. 2005. Tecnología de Materiales. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid.
- 150 Castellanos, J. et. al. 2009. Influencia de la micro estructura de partida en la ecuación constitutiva para la fluencia de un acero. Rev. DE METALURGIA, NO. 45, ISSN: 0034-8570.
- 151 Maya, F. J. et. al. 1983. Diseño y Construcción de una Maquina de Termofluencia. Rev. Sociedad Mexicana de la Instrumentación, Vol. 1. No. 3. Pp. 17-31.
- 152 Mendoza, A. et. al. 1999. Introducción a la deformación plástica por movimiento de dislocaciones mediante el uso de analogías y el concepto de energía. Revista Mexicana de Física, UNAM.
- 153 J. Castellanos, et. al. 2009. Influencia de la micro estructura de partida en la ecuación constitutiva para la fluencia de un acero. Rev. DE Metalurgia, NO. 45, ISSN: 0034-8570.
- 154 Vable, M. 2002. Mecánica de Materiales. university Oxford, pp. 87-162.
- 155 Blimel, M. R. 2007. Capacidad Estructural de Juntas T Perfiles de Acero Laminado en Frio. Rev. Ingeniería, No.17, ISSN: 1409-2441.
- 156 Alberteris, M., Capo, J. y Padovese L. 2007. Caracterización del Comportamiento Elastoplastico de Aceros Estructurales con Diferente Contenido de Carbono”, Rev. Scientiaet Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN0122 - 1701.
- 157 Landau, L. D. and Lifshitz, E. M. 1959. Theory of Elasticity. Institute of Physical Problems, U. S. S. B. Academy of Sciences, Volume7, p135.
- 158 Martínez, J. A. R. 2008. Mecanismo de Fallo en Placas de Acero Sometidas a Impacto de proyectiles Cilíndricos, Cónicos y Hemisféricos. Rev. Análisis de la Mecánica de Fractura, Vol. I.

- 159 Errandonea, D. 2009. Más Duro que el Diamante. Rev. Investigación y Ciencia.
- 160 González, G. 2008. Comportamiento a la Termofluencia del Acero 2.25Cr 1Mo. Departamento de Ing. Mecánica, Facultad Regional Bahía Blanca– Universidad Tecnológica Nacional.
- 161 Bea, R. G. and Young, C. 1993. Loading and capacity effects on platform performance in extreme condition storm waves and earthquakes. Proc. 25<sup>th</sup> Annual Offshore technology Conference, paper No. OTC 7140, Houston.
- 162 Murthy, A. R. C., Palani, G. S., Iyer, N. R. y Appa Rao, T. V. S. R. 2004. An Efficient FE Modelling Strategy for Fracture Analysis of Tubular Joints. Structural Engineering Research Centre, Taramani, Chennai, vol. 85.
- 163 Megson, T. H. G. 2005. Structural and stress analysis. El Sevier. Great Britain.
- 164 Zuheir B. 2008. Residual Stress Analysis and Fatigue Assessment of Welded Steel Structures. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Kungliga Tekniska Högskolan (KTH)
- 165 North, R. C. 1999 Fatigue resistant detail design guide for ship structure. United States Coast Guard [165]
- 166 Romero, R. 2010. Método del element finite. Edit. Limusa.
- 167 Chandrupatla, R. T. and Belegundu, D. A. 1991. Elemento finite en Ingenieria. Edit. Prentice- Hall, upper saddle river
- 168 Oñate, E. 1992. Calculo de estructuras por el método de elemento finito. Cimnne, Barcelona.
- 169 Bathe, K. J. 1996. Finite element procedures. Prentice hall. Upper Saddle River
- 170 Vila, G. V. A. y Sotolongo, Q. G. 2007. Aplicación de la teoría de seguridad al diseño de cimentaciones en arenas. Chequeo de linealidad. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 No2. Facultad de Construcciones, Universidad Central de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, CUBA
- 171 Bowles, E. J. 1993. Diseño de acero estructural. Edit. Limusa, México. D.F.

- 172 Álvarez, A. R., Bustillo, A. R., Martitegui, A. F., Bustillo, A. J. M y Reales, A. J. R. 2005. Estructuras de acero. Cálculo. Edit. Bellisco, Madrid.
- 173 Maranto, G. E. M. 2004. Evaluación de la Seguridad Estructural. Edit. Universidad de Los andes Facultad de Ingeniería, Republica Dominicana.
- 174 Mather, A. 1995. Offshore engineering. Witherby. Britain.
- 175 Moan T. and Keppel. 2004. Safety of Offshore structures. Centre for Offshore Research & Engineering National University of Singapore.
- 176 Cardenas, M. A. 1985. La Ingenieria de Sistemas. Limusa, Mexico.
- 177 Churchman, C. W. 1992. El enfoque de sistemas para la toma de decisiones . Diana, Mexico.
- 178 Churchman, C. W., Ackoff, R. L. y Arnoff, E. L. 1957. Introduction to Operations Research, John Wiley and Sons –inc., Nueva York, N. Y.
- 179 Ackoff, Russell L. and Sasieni Maurice W. 1975. Fundamentos de Investigacion de Operaciones. Limusa. Mexico.
- 180 A. J. Cañas, l et. al., 2004, “Análisis Estructural Sistemático. Teorías, Técnicas, y Aplicaciones. Su mapa Conceptual como Herramienta Didáctica y de Investigación”, Universidad Pública de Navarra, España.
- 181 Bea, R.G., and Young, C., 1993. Loading and capacity effects on platform performance in extreme condition storm waves and earthquakes.” Proc. 25th Annual Offshore technology Conference, paper No. OTC 7140, Houston, US, 1993.
- 182 API-RP-2A WSD, 2000, “Recommended Practice For Planning, Designing And Constructing Fixed Offshore Platforms-Working stress Design. American Petroleum Institute”, 20th Edition, December, pp.31-32.
- 183 O.A. Hilders y N. Zambrano. 2007. Interpretación fractal del índice de tolerancia al tamaño de grieta y de la tenacidad de fractura en el acero saf 2205. Rev. Fac. Ing. UCV v.22 n.3 Caracas Venezuela.
- 184 Wayne, W. L. 1994. “Investigación de Operaciones”. Grupo Editorial Iberoamericana S.A. México.

- 185 T. L. Anderson. 1991. Fracture Mechanics. CRC. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C.
- 186 Viramontes, C. J. F., Gonzales, L. G. M., Rodríguez, Q. A. J., y Madrid, M. M. 2003. La evaluación no destructiva de materiales estructurales y puentes. SCT. Publicación técnica- No. 231. Sanfandila, Qro.
- 187 Alarcón, A. H. J. 2005. Análisis de fatiga en la estructura del helicóptero Bell-UH-1;H 'por medio del Software Afgangrow. Universidad Austral de Chile. Ingeniería Mecánica.
- 188 AISC. 1998. Manual of Steel Construction Allowable Stress Design, New York.
- 189 Nuñez, C., Roca, A. y Jorba J. 2004. Comportamiento mecánico de los materiales volumen 2. Dpto. de Ing. Química y metalúrgica, Universitat Barcelona.
- 190 ASM International. 1998. Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM Metals Handbook 9th Ed, Vol. 17.
- 191 AWS D-1. 2008. Structural welding code steel.
- 192 MIL-STD-2035.1995, Nondestructive Testing Acceptance Criteria
- 193 American Society for Testing and Materials (ASTM) E1417. 1999. Standard Practice for Liquid Penetrant Examination.
- 194 Borucki, J. S. 1998. Liquid Penetrant Inspection, Nondestructive Inspection and Quality Control. ASM Handbook 9th Ed, Vol. 17, ASM International.
- 195 <http://www.ndtservices.pe/servicios.html>
- 196 American Society for Testing and Materials (ASTM) E165-09. 2009. Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry
- 197 Carpintero. P. J M. 2011. Manual práctico de soldadura básico. Edit. Starbook
- 198 American Society for Testing and Materials (ASTM) E709. 2011. Magnetic particle standard examination
- 199 MIL-HDBK- 728/4A.1993, Magnetic Particle Testing

- 200 American Society for Testing and Materials (ASTM) ASTM E125-63. 1993. Standard Reference Photographs for Magnetic Particle Indications on Ferrous
- 201 Peñafiel R. M. A. 2010 Ensayo no destructivos para soldaduras <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2010/11/05/ensayos-no-destructivos-para-soldaduras/>
- 202 American Society for Testing and Materials (ASTM) ASTM E 94-04. 2005. Standard guide for radiographic examination.
- 203 Montero, V. J. Rv Inspection NDT. <http://rvinspectionndt.com/inspeccion.htm>
- 204 ASM International. 1998. Radiographic Inspection, Nondestructive Evaluation and Quality Control. ASM Handbook 9<sup>th</sup> Ed, Vol 17.
- 205 I.G.P. [http://www.igp-srl.com.ar/site/?page\\_id=9](http://www.igp-srl.com.ar/site/?page_id=9)
- 206 Vukelich, S. I., Petrin, C. L., y Annis, C. A. 1993. Recommended Methodology for Qualifying NDE/NDI, Based on Aircraft Engine Experience. Agard-LS-190, Advisory Group for Aerospace Research & Development.
- 207 Olin, B. D. y Meeker, W. G. 1996. Application of Statistical Methods to Nondestructive Evaluatio. Technometrics, Vol 38, No 2, pp 95-130.
- 208 Spencer, F. W. 1996. Visual Inspection Research Project on Benchmark Inspection. Technical Report DOT/FAA/AR-96/05, U S Department of Transportation, Federal Aviation Administration.
- 209 Bray, D. E. y McBride, D. 1992. Nondestructive Techniques. John Wiley and Sons, New York.
- 210 Berger, H. 1995. 100 Years of X-Rays Industrial se of NDT and the Role of ASNT. Materials Evaluation, Vol 11, pp 1253-1260.
- 211 Chase, S. B. 1998. Developing NDT Technologies for the Next Century. Structural Materials Technology: an NDT Conference, San Diego, Cal, pp 91-105,
- 212 Davidson, N. C. y Chase, S. B. 1999. Initial Testing of Advanced Ground Penetrating Radar Technology for the Inspection of Bridge Decks - The Hermes and Peres Bridge Inspectors. Nondestructive Evaluation of Bridges and Highways III, SPIE 3587, Newport Beach, pp 180-197.

- 213 Ramírez, F. 1982. Introducción a métodos de END - Ed 2° - Madrid.
- 214 Abelardo Cantú Chapa, 2008, “Es posible Aumentar las Reservas Petroleras en Campeche”, Revista PetroQuiMex, pp 30-35.
- 215 María Teresa Sánchez Salazar, Norma Martínez Laguna y Maribel Martínez-Galicia, 1999, “Industria petroquímica y cambios socioeconómicos regionales en la costa del Golfo de México. El caso del sureste de Veracruz”, Investigaciones Geográficas, Boletín 40. P. 131.
- 216 Cuitláhuac Bardán Esquivel, Hilda Hernández Muñoz y Rafael Espinosa Soto, 2003, “Evolucion y perspectivas del gas natural en México, Instituto de investigaciones legislativas del senado de la republica, p.35.
- 217 Rosa Santana, 2007, “Ku-Maloob-Zaap, al relevo de Cantarell de la mano de Slim”, Rev. Proceso.
- 218 Secretaría de Energía, 2009, “Instalará PEMEX nueva infraestructura de bombeo para fortalecer la producción de hidrocarburos en Ku-Maloob-Zaap”, sin autor.
- 219 Pemex, 2002a, “Evaluación de Riesgo Ecológico e Impacto de las operaciones industriales (análisis general), exploración y producción Pemex. Mexico. 257, pp.www.pemex.org.com.
- 220 <http://elcapitalinoaldia.blogspot.com/2009/03/instalara-pemex-nueva-infraestructura.html>.
- 221 Ubicación Geográfica de los activos integrales de la región marina Noreste [http://www.pemex.com/files/dcf/Capitulo5\\_2007.pdf](http://www.pemex.com/files/dcf/Capitulo5_2007.pdf).
- 222 J. Ángel García Cuéllar, et. al., 2004, “Impacto Ecológico de la Industria Petrolera en la Sonda de Campeche, México, tras tres décadas de actividad, una revisión”, Rev. 006, vol.29, pp. 312-313.
- 223 Galano L., Spadaccini, O. & Vignoli, A., “A study on the correlation between structural and environmental data of an offshore platform.” Proc. 5th international Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE’95, The Hague, Vol. I, pp. 207-214, ISOPE, 1995. México.
- 224 Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH). Informe de Labores. [http://cnh.gob.mx/\\_docs/Informe\\_de\\_Labores\\_CNH\\_2009-2010.pdf](http://cnh.gob.mx/_docs/Informe_de_Labores_CNH_2009-2010.pdf)
- 225 Subrata Chakrabarti, John Halkyard, Cuneyt Capanoglu. 2005. Handbook of Offshore Engineering. Elsevier

- 226 Talla Política, 2008  
[http://www.telediccion.com.mx/artman2/publish/fotogaleria/fots\\_plataformas.shtml](http://www.telediccion.com.mx/artman2/publish/fotogaleria/fots_plataformas.shtml)
- 227 Sistemas de Información para funciones específicas.  
<http://antiguo.itson.mx/dii/jgaxiola/sistemas/segunda.html>
- 228 Overdick Moab is Installed, Consulting Engineers, September (2005).  
“Recommended Practice For Planning, Designing And Constructing Fixed Offshore Platforms-Working stress Design”. American Petroleum Institute (API-RP-2A WSD), 20th Edition, December (2000).
- 229 AISC, 2001, “Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design”, 3rd Edition, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL, USA.
- 230 Aparicio, G., D’ Armas, H., Ciaccia, M., 2007, Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569, Revista ingeniería uc, vol. 14, no 1, pp.57-63.

## Método de las Rigideces

Desde los inicios de la historia, la ingeniería estructural ha sido parte del esfuerzo humano. Sin embargo, no fue sino alrededor de la mitad del siglo XVII que los ingenieros empezaron aplicar el conocimiento de la mecánica en el diseño de estructuras. Se cree que un arquitecto italiano, Andrea Palladio (1518-1580), fue quien analizó y construyó las primeras armaduras. Sus extensas notas sobre arquitectura incluyen descripciones detalladas y dibujos de armaduras de madera bastante similares a las usadas actualmente.

En general, Galileo Galilei (1564-1642) se considera el iniciador de la teoría de las estructuras, en su libro titulado *Dos ciencias nuevas*, publicado en 1638, donde analizó la falla de algunas estructuras simples. Después de los trabajos de Galileo, el conocimiento del análisis estructural avanzó a paso rápido en la segunda mitad del siglo XVII y hacia XVIII. Entre los investigadores notables de ese periodo se encuentra, Robert Hooke (1635-1703), quien desarrolló la ley de las relaciones lineales entre la fuerza y la deformación de los materiales (ley de Hooke); Sir Isaac Newton (1642-1727), quien formuló las leyes del movimiento y desarrolló el cálculo; John Bernoulli (1667-1748), quien formuló el principio del trabajo virtual; Leonhard Euler (1707-1783), quien desarrolló la teoría de pandeo en columnas, y C. A. de Coulomb (1736-1806), quien presentó el análisis de la flexión en vigas elásticas.

En 1826, L. M. Navier (1785-1836) publicó un tratado sobre el comportamiento elástico de las estructuras, el cual considera el primer libro sobre la teoría moderna de la resistencia de los materiales. El desarrollo sobre el análisis estructural y los métodos utilizados actualmente se desarrollaron rápidamente durante todo el resto del siglo XIX y la primera mitad del XX.

En cuanto al método matricial de las rigideces, G. A. Maney (1888-1947) desarrolló el método de la pendiente deflexión, que se considera como el precursor del método de rigideces

Para estudiar una estructura por el método de la rigidez, al igual que en cualquier otro problema elástico, disponemos de tres conjuntos de ecuaciones que deben cumplirse.

Ecuaciones de compatibilidad  
 Ecuaciones constitutivas  
 Ecuaciones de equilibrio

Ejemplo teórico del método de rigidez

Considerar el marco plano de la Figura A1a y b, se hacen algunas simplificaciones con el fin de reducir el número de grados de libertad.

El grado de libertad. El número de grados de libertad es igual al número de coordenadas generalizadas necesarias para expresar la configuración del sistema estructural. y está representado por la siguiente ecuación.

$$GL = N.D.N - N.D.R \quad (A1)$$

Donde:

$GL$  = Grados de libertad o desplazamientos

$N.D.N$  = Número de desplazamientos en los nodos, incluyendo fronteras

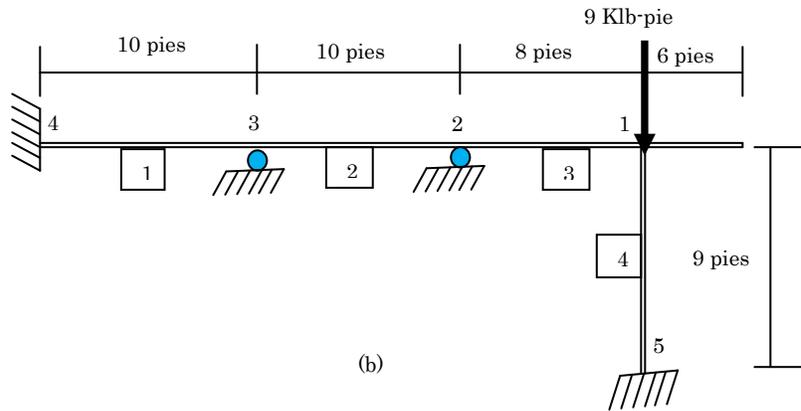
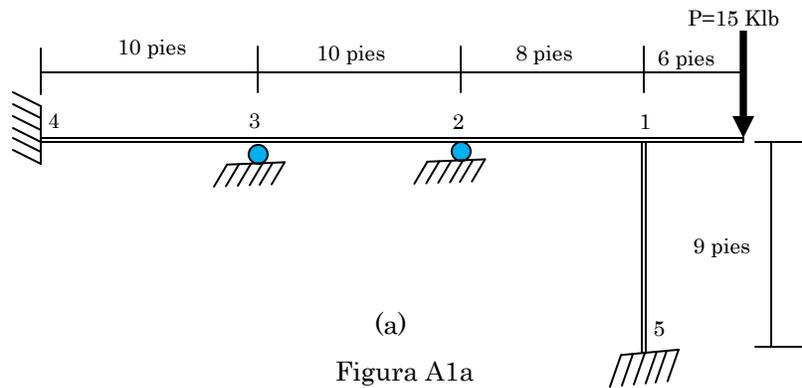
$N.D.R$  = Número de desplazamientos restringidos

Se supone que las deformaciones principales son de flexión y que las axiales son despreciables, entonces los únicos movimientos posibles de las juntas son las de rotación. Además, la carga de 15 Klb y de 90 pie-Klb en la junta 1 representan el efecto de una viga en voladizo sobre el resto del marco. En consecuencia, el modelo estructural tiene tres grados de libertad y cuatro miembros.

En este caso, ya que solo hay grados de libertad rotacionales, puede extraerse la siguiente matriz reducida a partir de la relación general

$$\begin{Bmatrix} M_B \\ M_E \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L \\ 2EI/L & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_B \\ \theta_E \end{Bmatrix} \quad (2A)$$

El primer renglón de esta relación matricial representa la ecuación de equilibrio en la dirección  $\Delta_1$ , es decir,  $\sum M_1 = 0$ .



Miembros:

Miembro 1.

$${}^4_3 \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (3A)$$

Miembro 2

$${}^3_2 \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (4A)$$

Miembro 3

$$\begin{matrix} & 2 & 1 \\ 2 & \begin{bmatrix} 12.5 & 62.5 \end{bmatrix} \\ 1 & \begin{bmatrix} 62.5 & 12.5 \end{bmatrix} \end{matrix} (10^{-3}) \quad (5A)$$

Miembro 4

$$\begin{matrix} & 1 & 5 \\ 1 & \begin{bmatrix} 55.55 & 27.77 \end{bmatrix} \\ 5 & \begin{bmatrix} 27.77 & 55.55 \end{bmatrix} \end{matrix} (10^{-3}) \quad (6A)$$

Matriz global

$$\begin{Bmatrix} -1080 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 125+55.55 & 62.5 & & & 27.77 \\ & 62.5 & 100+125 & 50 & \\ & & 50 & 100+100 & 50 \\ & & & 50 & 100 \\ 27.77 & & & & 55.55 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \Delta_4 \\ \Delta_5 \end{Bmatrix} (10^{-3}) \quad (7A)$$

Tomando las propiedades de los miembros 2 y 3 y la matriz reducida de rigidez se tiene.

$$\begin{aligned} M_{12} &= 62.5\Delta_2 + 125\Delta_1 \\ M_{15} &= 55.55\Delta_1 + 27.77\Delta_5 \end{aligned} \quad (8A)$$

Sustituyendo en las ecuaciones de equilibrio, tenemos.

$$(125 + 55.55)\Delta_1 + 62.5\Delta_2 + 27.77\Delta_5 = -1080 \text{ pul} - \text{klb} \quad (9A)$$

Desde aquí se han hecho las asignaciones a la matriz de rigidez de la estructura, la cual contiene todas las posibles rotaciones de las juntas. Sin embargo, para este problema  $\Delta_4$  y  $\Delta_5$  son ceros y el proceso general de resolución se reduce a.

$$\begin{aligned} \{\Delta_p\} &= [K_{pp}]^{-1} (\{P_p\} - [K_{pR}]\{\Delta_R\}) \\ \{\Delta_p\} &= [K_{pp}]^{-1} \{P_p\} \end{aligned} \quad (10A)$$

$$\begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 180.55 & 62.5 & 0 \\ 62.5 & 22.5 & 50 \\ 0 & 50 & 200 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -1080 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} (10^{-3})$$

Al resolver, se obtiene los desplazamientos.

$$\begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -6.6590 \times 10^{-3} \\ +1.9585 \times 10^{-3} \\ -4.8963 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} \quad (11A)$$

Al sustituir los valores de la ecuación (11A), se obtienen los momentos que se producen sobre los extremos de los miembros:

$$\begin{Bmatrix} M_B^1 \\ M_E^1 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -4.8963 \times 10^{-4} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -24.48 \text{ pulg-klb} \\ -48.96 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} M_B^2 \\ M_E^2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -4.8963 \times 10^{-4} \\ 1.9585 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} +48.96 \text{ pulg-klb} \\ +171.37 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix} \quad (12A)$$

$$\begin{Bmatrix} M_B^3 \\ M_E^3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 125 & 62.5 \\ 62.5 & 125 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1.9585 \times 10^{-3} \\ -6.659 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -171.37 \text{ pulg-klb} \\ -709.97 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix}$$

$$\begin{Bmatrix} M_B^4 \\ M_E^4 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 55.55 & 27.77 \\ 27.77 & 55.55 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -6.659 \times 10^{-3} \\ 0 \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -369.91 \text{ pulg-klb} \\ -184.95 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix}$$

Siendo que el esfuerzo, esta relacionado por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{\sigma I_c}{y} \quad (13A)$$

Donde:

$M$  = Momento de flexión en cm·kg

$\sigma$  = Esfuerzo en el elemento en kg/cm<sup>2</sup>

$I_c$  = Momento de inercia de la sección en cm<sup>4</sup>

$y$  = Superficie del eje neutro en cm

## **Método de Elemento Finito (MEF)**

Este método fue propuesto primero en 1943, no fue hasta 1956 que se presentaron los primeros resultados obtenidos con este método y en 1960 se le llamó el método como el método del elemento finito, siendo este un método numérico, que surgió como tal en la década de los 60'S, desde entonces a la fecha ha pasado a ser una herramienta poderosa en la solución de problemas de ingeniería para conocer el estado de esfuerzo y de deformación en un medio continuo. El medio puede ser heterogéneo y anisótropo; sólido, líquido o gas. Las aplicaciones van desde el análisis esfuerzo-deformación de sólidos como automóviles, aeronaves y edificios, hasta problemas complejos de flujo que pueden modelarse con relativa facilidad. En este método de análisis, una región compleja que define un continuo se discretiza en formas geométricas simples llamadas elementos finitos. Las propiedades del material y las relaciones gobernantes, son consideradas sobre esos elementos y expresadas en términos de valores desconocidos en las fronteras del elemento. Considerando debidamente las cargas y restricciones, se obtienen un conjunto de ecuaciones cuya solución proporciona el comportamiento aproximado del continuo.

En los últimos años y a partir del desarrollo y expansión de las computadoras personales, se ha convertido en la herramienta por excelencia a la hora de generar modelos que nos permiten conocer la respuesta sistemática a diferentes tipos de excitaciones.

El método del elemento finito para el análisis de estructuras, (cálculo de los desplazamientos) consiste en dividir el continuo en líneas imaginarias que constituye cada uno de los elementos finitos (mallado). Los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de nodos situados en sus fronteras. Los desplazamientos de estos nodos son las incógnitas fundamentales del problema. Se toma un conjunto de funciones que definen de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito en función de los desplazamientos nodales (funciones de forma). Estas funciones de desplazamiento definen el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, en conjunto con las propiedades constitutivas del material, definen el estado de esfuerzo en todo el elemento y consecuentemente, en sus fronteras. Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre los esfuerzos en las fronteras y cualesquiera cargas repartidas, lo cual se expresa con la relación

$F = ku$ ; donde  $F$  es el campo de fuerzas,  $k$  es la rigidez y  $u$  es el campo de desplazamientos. La solución de la ecuación que integra a todo el sistema permite obtener los desplazamientos nodales.

El elemento finito más sencillo, es quizás el elemento finito viga, el cual puede ser usado en análisis 1D, 2D y 3D. Es un elemento lineal con dos nodos, que puede tener varios grados de libertad en los nodos. Es el elemento más utilizado para el análisis estructural. También se pueden utilizar elementos finitos en el plano en forma de triángulos o cuadrados. Para análisis 3D son utilizadas formas volumétricas como tetraedros o cubos. La combinación de estas formas geométricas, así como la cantidad de nodos y las características de cada elemento finito permite modelar cualquier morfología de continuo, haciendo las mallas más refinadas donde se requiera conocer el comportamiento simulado con mayor detalle.

Ejemplo del método del elemento finito.

Considerar una viga empotrada como se muestra en la Figura B1, el cual esta discretizado en elemento cuadrilátero, mostrado en la figura B2. Evaluar su matriz de rigidez, considerando que  $E = 10 \times 10^6 \text{ PSI}$ ,  $\nu = 0.3$  y un espesor  $t = 0.2 \text{ pulg}$ .

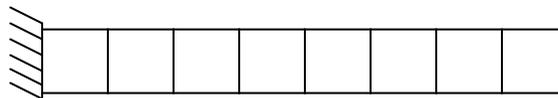


Figura B1. Sistema discretizado en elemento cuadriláteros

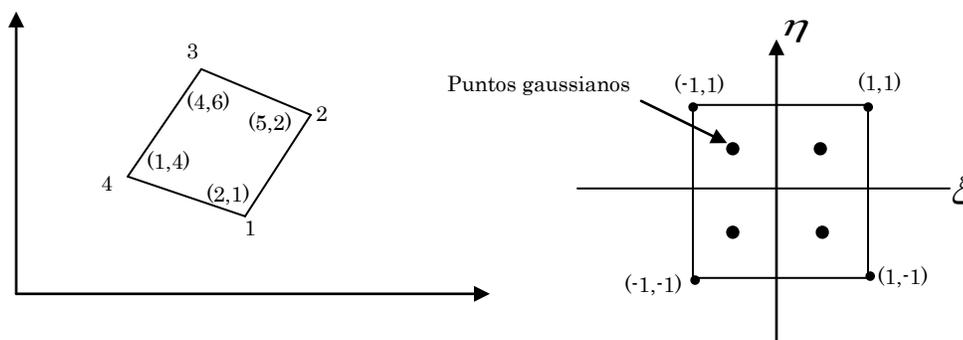


Figura B2. Elemento cuadrilátero en el sistema físico  $(x, y)$  y en el de referencia  $(\xi, \eta)$ .

Se empleara la regla de Gauss con  $2 \times 2$  puntos de integracion. La matriz  $[B]$  se debe evaluar para cada punto gaussiano. Cada vez que se evalúa la matriz  $[B]$ , se calcula la contribución a la matriz de rigidez en la forma  $[B]^T [D][B]t$ , y

la matriz de rigidez final es la suma de las cuatro contribuciones. Para evaluar  $[B]$  en cada punto gaussiano, se requiere calcular el jacobiano de la transformación en ese punto gaussiano. Las coordenadas nodales son:

$$\{x^e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 10 \\ 10 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \{y^e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \\ 6 \end{Bmatrix} \quad (\text{B1})$$

La matriz de elasticidad para esfuerzo plano es:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{12} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.989 & 3.296 & 0 \\ 3.296 & 10.989 & 0 \\ 0 & 0 & 3.846 \end{bmatrix} \times 10^6 \quad (\text{B2})$$

Punto gaussiano 1: la localización del punto gaussiano es:  $\xi = -0.57735$  y  $\eta = -0.57735$ . Empleando las siguientes ecuaciones, se evalúa la matriz jacobiana:

$$J_{11} = \{x^e\}^T \frac{\partial N^T}{\partial \xi}$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1-\eta)x_1 + (1-\eta)x_2 + (1+\eta)x_3 - (1+\eta)x_4] \quad (\text{B3})$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 + (1+0.57735)10 + (1-0.57735)10 - (1-0.57735)] = 5$$

De la forma similar se tiene

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 + (1+0.57735)0 + (1-0.57735)6 - (1-0.57735)6] = 0$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 - (1-0.57735)10 + (1-0.57735)10 + (1+0.57735)0] = 0$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 - (1+0.57735)0 + (1-0.57735)6 + (1+0.57735)6] = 3 \quad (\text{B4})$$

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (\text{B5})$$

El determinante se podría determinar cómo:

$$|\det J| = J_{11}J_{22} - J_{21}J_{12} = 15 \quad (\text{B6})$$

Sea  $dA = dxdy = |\det J|d\xi d\eta = |\det J|w_1w_1 = 15$ . Notar que los pesos en este caso son  $w_1 = 1$ . Las matrices  $[G]$  y  $[H]$  calculadas de acuerdo con

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B7})$$

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (\text{B8})$$

Aplicando la ecuación (B7) y (B8) tenemos:

$$[G] = \begin{bmatrix} -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 & -0.1057 & 0 \\ -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B9})$$

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 & -0.1057 \\ 0 & -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 \end{bmatrix}$$

De modo que los renglones de  $[B]$ , son:

$$\begin{aligned} [J_{11}^* J_{12}^*][G] &= [-0.07890 + 0.07890 + 0.02110 - 0.2110] \\ [J_{21}^* J_{22}^*][H] &= [0 - 0.1314 - 0.03520 + 0.03520 + 0.1314] \\ [J_{21}^* J_{22}^*][G] + [J_{11}^* J_{12}^*][H] &= [-0.1314 - 0.0789 - 0.0352 + 0.0789 + 0.0352 + 0.0211 + 0.1314 - 0.0211] \end{aligned} \quad (\text{B10})$$

Por lo que la matriz  $[B]$  evaluada en el primer punto gaussiano 1 es:

$$[K]_i = [B]_i^T [D][B]_i t dA \quad (\text{B11})$$

Donde  $dA$  está definido de esta forma:

$$[K]_1 = \begin{bmatrix} 4.044 & 2.221 & -1.516 & -0.921 & -1.083 & -0.595 & -1.444 & -0.704 \\ & 6.413 & -0.704 & 0.808 & -0.595 & -1.718 & -0.921 & -5.503 \\ & & 2.193 & -0.595 & 0.406 & 0.188 & -1.083 & 1.111 \\ & & & 1.1267 & 0.2469 & -0.2166 & 1.2698 & -1.718 \\ & & & & 0.290 & 0.159 & 0.387 & 0.188 \\ & & & & & 0.460 & 0.246 & 1.474 \\ & & & & & & 2.1409 & -0.595 \\ & & & & & & & 5.747 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{B12})$$

Punto gaussiano 2

(B13)

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 & -0.3943 & 0 \\ -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B13})$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0211 & 0 & 0.0211 & 0 & 0.0789 & 0 & -0.0789 & 0 \\ 0 & -0.1314 & 0 & -0.0352 & 0 & 0.0352 & 0 & 0.1314 \\ -0.1314 & -0.0211 & -0.0352 & 0.0211 & 0.0352 & 0.0789 & 0.1314 & -0.0789 \end{bmatrix}$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 2.140 & 0.595 & 0.387 & -0.246 & -1.083 & -1.269 & -1.444 & 0.921 \\ & 5.747 & -0.188 & 1.474 & -1.111 & -1.718 & 0.704 & -5.503 \\ & & 0.290 & -0.159 & 0.406 & -0.246 & -1.083 & 0.595 \\ & & & 0.460 & -0.188 & -0.216 & 0.595 & -1.718 \\ & & & & 2.193 & 0.529 & -1.516 & 0.704 \\ & & & & & 1.126 & 0.921 & 0.808 \\ & & & & & & -2.2215 & -2.221 \\ & & & & & & & 6.4138 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{B14})$$

Punto gaussiano 3.

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15 \quad (\text{B15})$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.3943 & 0 & 0.0789 & 0 & 0.0211 & 0 & -0.0211 & 0 \\ -0.1057 & 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0789 & 0 & 0.0789 & 0 & 0.0211 & 0 & -0.0211 & 0 \\ 0 & -0.0352 & 0 & -0.1314 & 0 & 0.1314 & 0 & 0.0352 \\ -0.0352 & -0.0789 & -0.1314 & 0.0789 & 0.1314 & 0.0211 & 0.0352 & -0.0211 \end{bmatrix} \quad (\text{B16})$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 2.193 & 0.595 & -1.516 & 0.704 & -1.083 & -1.111 & 0.406 & -0.188 \\ & 1.126 & 0.9215 & 0.808 & -1.269 & -1.718 & -0.2469 & -0.2166 \\ & & 4.044 & -2.221 & -1.444 & 0.704 & -1.083 & 0.595 \\ & & & 6.413 & 0.921 & -5.503 & 0.595 & -1.718 \\ & & & & 2.140 & 0.595 & 0.387 & -0.2469 \\ & & & & & 5.7476 & -0.1888 & 1.4747 \\ & & & & & & 0.2904 & -0.1595 \\ & & & & & & & 0.4605 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{B17})$$

Punto gaussiano 4.

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 & -0.3943 & 0 \\ -0.1057 & 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{B18})$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0211 & 0 & 0.0211 & 0 & 0.0789 & 0 & -0.0789 & 0 \\ 0 & -0.0352 & 0 & -0.1314 & 0 & 0.1314 & 0 & 0.0352 \\ -0.0352 & -0.0211 & -0.1314 & 0.0211 & 0.1314 & 0.0789 & 0.0352 & -0.0789 \end{bmatrix}$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.159 & 0.387 & 0.188 & -1.083 & 0.595 & 0.406 & 0.246 \\ & 0.460 & 0.246 & 1.474 & -0.595 & -1.718 & -0.188 & -0.216 \\ & & 2.14 & -0.595 & -1.444 & -0.921 & -1.083 & 1.269 \\ & & & 5.747 & -0.704 & -5.503 & 1.111 & -1.718 \\ & & & & 4.044 & 2.221 & -1.516 & -0.921 \\ & & & & & 6.413 & -0.704 & 0.8085 \\ & & & & & & 2.1937 & -0.5952 \\ & & & & & & & 1.1267 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{B19})$$

## Esfuerzos críticos

En la presente Tabla C1 a la C5, se muestra la tendencia del riesgo estructural, al exceder los esfuerzos de fluencia y tensión del acero del acero y en las Figuras C1 y C2 se muestran algunos de los comportamientos de los esfuerzos críticos.

Tabla C1. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
1	1	3	67852	2530-4080	✓
2	3	4	65713	2530-4080	✓
3	4	2	63574	2530-4080	✓
4	2	6	61618	2530-4080	✓
5	6	7	60347	2530-4080	✓
6	7	5	59077	2530-4080	✓
7	8	10	48795	2530-4080	✓
8	10	11	46686	2530-4080	✓
9	11	9	44578	2530-4080	✓
10	9	13	42596	2530-4080	✓
11	13	14	41421	2530-4080	✓
12	14	12	40245	2530-4080	✓
78	79	80	68859	2530-4080	✓
79	80	54	66615	2530-4080	✓
80	54	82	60958	2530-4080	✓
81	82	83	59596	2530-4080	✓
82	83	81	58235	2530-4080	✓
83	84	86	50903	2530-4080	✓
84	86	87	48701	2530-4080	✓
85	87	85	46499	2530-4080	✓
86	85	89	44243	2530-4080	✓
87	89	90	42978	2530-4080	✓
88	90	88	41714	2530-4080	✓

Tabla C2. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
174	130	173	1771.4	2530-4080	
175	173	174	1733.4	2530-4080	
176	174	175	1723.7	2530-4080	
177	175	176	1743	2530-4080	
178	176	177	1790.2	2530-4080	
179	177	178	1863.3	2530-4080	
180	178	179	1959.3	2530-4080	
181	179	180	2075.1	2530-4080	
182	180	181	2207.6	2530-4080	
183	181	182	2353.9	2530-4080	
184	182	183	2511.6	2530-4080	
185	183	184	2678.8	2530-4080	
186	184	185	2853.7	2530-4080	
187	185	186	3035.1	2530-4080	
188	186	187	3221.7	2530-4080	
189	187	9	3412.9	2530-4080	
190	114	188	1752.1	2530-4080	
191	188	189	1717.8	2530-4080	
364	350	349	2883.2	2530-4080	
365	351	353	71603	2530-4080	✓
366	353	354	69337	2530-4080	✓
367	354	352	67071	2530-4080	✓
368	352	356	61511	2530-4080	✓
369	356	357	60198	2530-4080	✓
370	357	355	58885	2530-4080	✓
371	349	358	2861.5	2530-4080	✓
372	358	359	2826.7	2530-4080	✓
364	350	349	2883.2	2530-4080	✓
381	352	368	3106.8	2530-4080	✓

Tabla C3. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
592	564	566	68629	2530-4080	✓
593	566	567	66470	2530-4080	✓
594	567	565	64311	2530-4080	✓
595	565	569	64311	2530-4080	✓
596	569	570	61035	2530-4080	✓
597	570	568	59762	2530-4080	✓
646	618	619	49168	2530-4080	✓
647	619	620	47138	2530-4080	✓
648	620	594	45109	2530-4080	✓
649	594	622	43179	2530-4080	✓
650	622	623	42038	2530-4080	✓
651	623	621	40897	2530-4080	✓
652	565	624	3041.4	2530-4080	✓
653	624	625	2829.3	2530-4080	✓
654	625	626	2621.7	2530-4080	
655	626	627	2419.8	2530-4080	
656	627	628	2225.2	2530-4080	
657	628	629	2040	2530-4080	
658	629	630	1866.9	2530-4080	
659	630	631	1709.7	2530-4080	
953	896	897	97750	2530-4080	✓
954	897	898	93895	2530-4080	✓
955	898	899	90041	2530-4080	✓
956	899	900	86187	2530-4080	✓
957	900	901	82332	2530-4080	✓
958	901	902	78478	2530-4080	✓
959	902	903	74624	2530-4080	✓
960	903	904	70770	2530-4080	✓
953	896	897	97750	2530-4080	✓

Tabla C4. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
961	904	905	66915	2530-4080	✓
962	905	906	63061	2530-4080	✓
963	906	892	59207	2530-4080	✓
964	621	908	76265	2530-4080	✓
965	908	909	72699	2530-4080	✓
966	909	910	69133	2530-4080	✓
967	910	911	65567	2530-4080	✓
968	911	912	62001	2530-4080	✓
969	911	912	58435	2530-4080	✓
970	913	914	54869	2530-4080	✓
971	914	915	51304	2530-4080	✓
972	915	916	47738	2530-4080	✓
973	916	917	44172	2530-4080	✓
974	917	918	40606	2530-4080	✓
975	918	919	37040	2530-4080	✓
976	919	920	33474	2530-4080	✓
977	920	921	29908	2530-4080	✓
978	921	907	26342	2530-4080	✓
979	12	923	74924	2530-4080	✓
980	923	924	71236	2530-4080	✓
981	924	925	67549	2530-4080	✓
982	925	926	63862	2530-4080	✓
983	926	927	60174	2530-4080	✓
984	927	928	56487	2530-4080	✓
985	928	929	52799	2530-4080	✓
986	929	930	49112	2530-4080	✓
987	930	931	45425	2530-4080	✓
988	931	932	41737	2530-4080	✓
989	932	933	38050	2530-4080	✓

Tabla C5. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm <sup>2</sup>	Estado Crítico
1064	922	1006	10402	2530-4080	✓
1065	1006	1007	8871	2530-4080	✓
1066	1007	1005	7340.3	2530-4080	✓
1067	937	1009	11489	2530-4080	✓
1068	1009	1010	9946.7	2530-4080	✓
1070	952	1012	12552	2530-4080	✓
1071	1012	1013	12552	2530-4080	✓
1072	1013	1011	11077	2530-4080	✓
1073	907	1015	9602.7	2530-4080	✓
1074	1015	1016	12033	2530-4080	✓
1075	1016	1014	10552	2530-4080	✓
1076	1002	1018	9072.2	2530-4080	✓
1077	1018	1019	15435	2530-4080	✓
1064	922	1006	10402	2530-4080	✓
1065	1006	1007	8871	2530-4080	✓
1204	1141	1142	5454	2530-4080	✓
1205	1142	1139	5421.5	2530-4080	✓
1206	1139	1144	5423.7	2530-4080	✓
1207	1144	1145	5460.6	2530-4080	✓
1208	1145	1143	5531.6	2530-4080	✓
1209	1143	1147	5621.1	2530-4080	✓
1210	1147	1148	5734.7	2530-4080	✓
1211	1148	1146	8145.6	2530-4080	✓
1212	1146	1150	9931.2	2530-4080	✓
1219	1155	1156	3495.4	2530-4080	
1220	1157	1158	3079.8	2530-4080	
1221	1157	1158	2664.1	2530-4080	
1222	1158	1159	2248.5	2530-4080	
1223	1159	1160	1832.9	2530-4080	

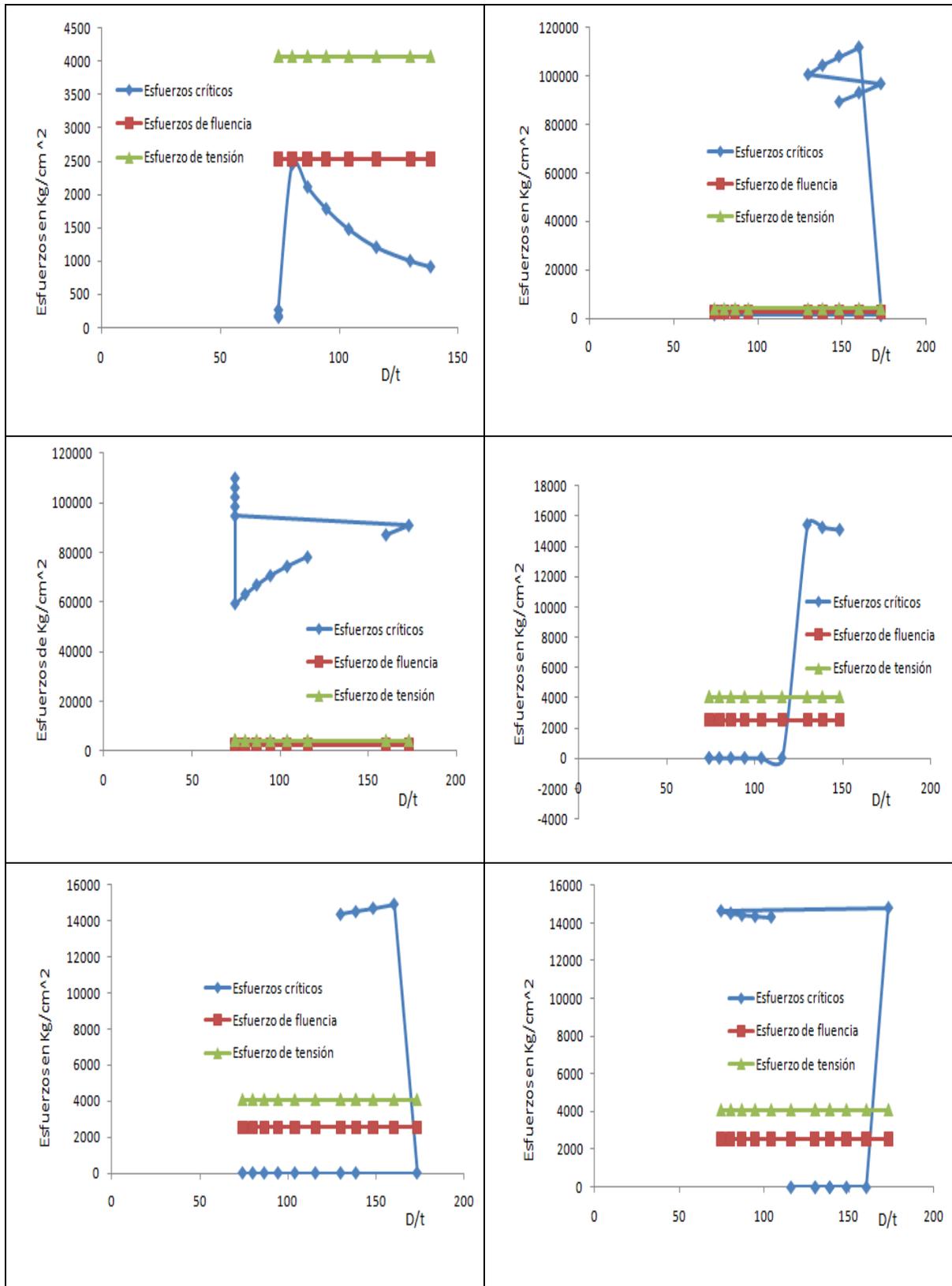


Figura C1. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

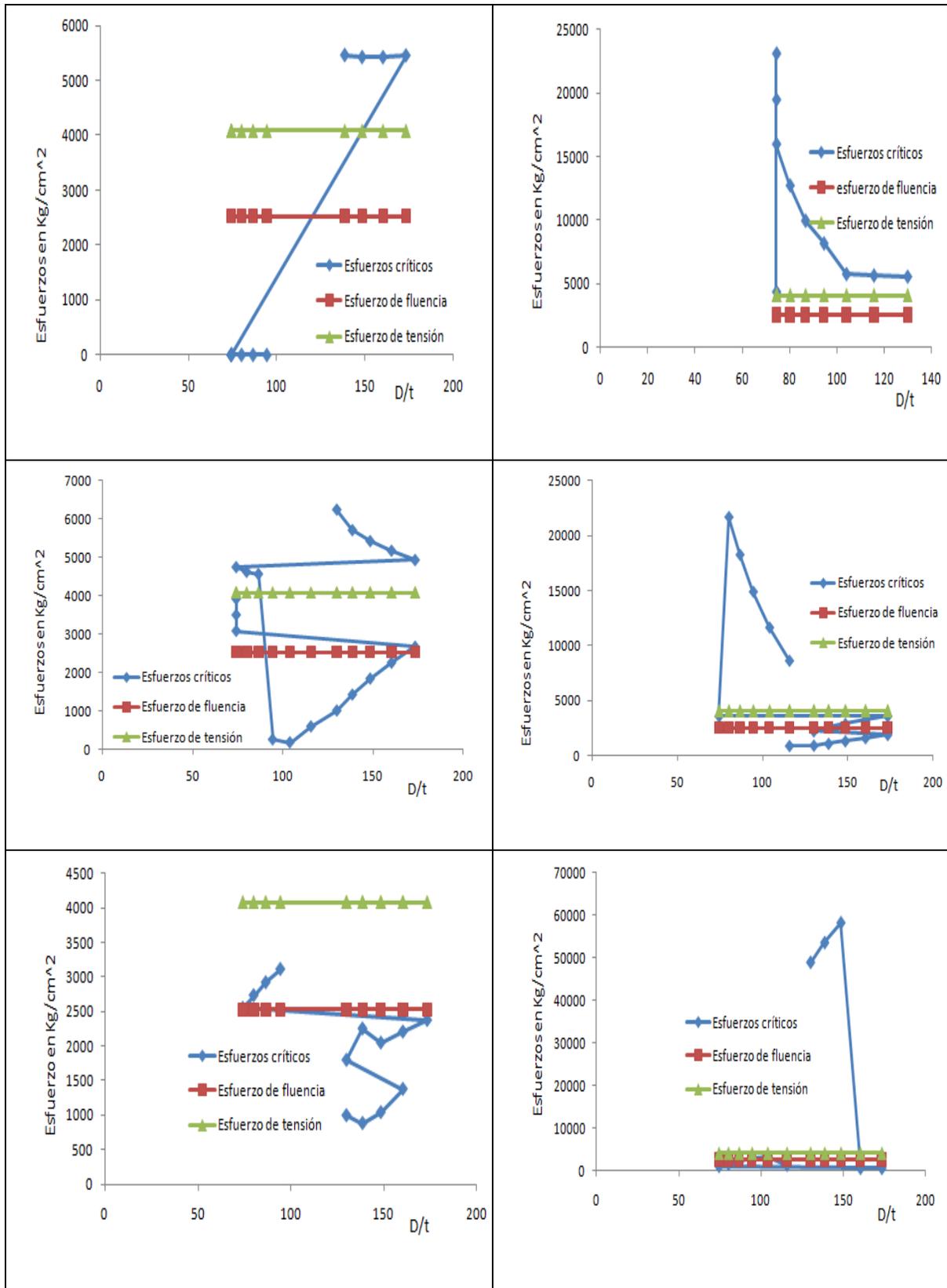


Figura C2. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares

## Esfuerzos complejos fractales

La gran plasticidad de la microestructura de la superficie rugosa (lo cual se observa en los procesos de deformación), determina en general valores de *KIC* o tenacidad a la fractura para un estado plano de deformación y modo I de separación; la tenacidad relativa de ciertos materiales estructurales se mide frecuentemente mediante el denominado Índice de Tolerancia al Tamaño de Grieta de la superficie rugosa.

Este índice se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\ell c = (K_{IC} / \sigma_{ys})^2 \quad (D1)$$

Donde  $\sigma_{ys}$  es el esfuerzo de fluencia en tensión, dado que en aplicaciones de ingeniería deberían de tolerar grandes defectos sin fallar; siendo estos en general valores altos de *KIC* y de difícil de evaluar. En tal sentido, un parámetro importante a ser tomado en cuenta durante los procesos de deformación plástica en materiales de gran tenacidad, es el tamaño de cavidad, el cual conduce a la morfología de fractura dúctil conocida como de (microvoids). Ahora bien, dada la gran importancia actual que tiene la Dimensión Fractal como una medida de la tenacidad podría relacionarse con aquélla a través del tamaño de cavidad, el cual determina el grado de irregularidad de las superficies rugosa.

La forma rugosa es la representación tipa del fractal, siendo esta de forma irregular, cuya irregularidad del material se manifiesta en superficie de fractura, esta irregularidad de superficie de fractura se manifiesta a través de la rugosidad y actualmente se cuantifica mediante el coeficiente de rugosidad o coeficiente de Hurst. El cual se haya relacionado con la dimensión fractal.

Para el análisis de estos esfuerzos en la superficie rugosa se realizo con el software Benoit, que ajusta la distribución de los esfuerzos en su dimensión fractal y exponente de Hurst de sus conjuntos de datos usando su método para el análisis de los patrones de autosimilar y los patrones de autoafin, siendo esto de teoría compleja. En la Tabla 1D, se muestran los esfuerzos generados por el software Benoit.

Tabla 1D. *Esfuerzos-teoría de sistemas complejos*

R/S	R-L	VG	Hprom	R/S	R-L	VG	Hprom
0.309	0.201		0.17	0.775	0.892	0.673	0.78
0.355	0.277	0.21	0.28066667	0.785	0.904	0.67	0.78633333
0.405	0.394	0.396	0.39833333	0.792	0.919	0.67	0.79366667
0.456	0.454	0.489	0.46633333	0.79	0.929	0.671	0.79666667
0.481	0.519	0.477	0.49233333	0.79	0.94	0.674	0.80133333
0.519	0.521	0.53	0.52333333	0.799	0.942	0.673	0.80466667
0.548	0.562	0.558	0.556	0.8	0.931	0.675	0.802
0.635	0.602	0.571	0.60266667	0.791	0.914	0.675	0.79333333
0.649	0.628	0.566	0.61433333	0.796	0.909	0.672	0.79233333
0.543	0.651	0.567	0.587	0.797	0.91	0.672	0.793
0.559	0.683	0.575	0.60566667	0.801	0.919	0.673	0.79766667
0.616	0.721	0.586	0.641	0.8	0.923	0.672	0.79833333
0.63	0.736	0.581	0.649	0.8	0.929	0.673	0.80066667
0.644	0.747	0.579	0.65666667	0.803	0.975	0.672	0.81666667
0.656	0.757	0.582	0.665	0.799	0.987	0.673	0.81966667
0.668	0.723	0.586	0.659	0.798	0.981	0.673	0.81733333
0.682	0.741	0.222	0.54833333	0.801	0.971	0.67	0.814
0.7	0.761	0.61	0.69033333	0.805	0.97	0.669	0.81466667

De modo que al generarse la plasticidad en los nodos como consecuencia de los altos esfuerzos, estos nodos se transforman en superficie de naturaleza rugosa, adquiriendo la forma geométrica fractal, definido por su auto-similar y estos pueden ser expresados con simples logaritmos.

Los esfuerzos complejos fractales rugosos, cabe destacar que el rango escalado R/S de estos esfuerzos siguen una caminata aleatoria sesgada o tendencia con ruidos estadísticos. La fuerza de la tendencia y el nivel de ruido de los esfuerzos pueden ser analizados a una escala de tiempo, esto es por cuanto H (exponente de Hurst), este por arriba de 0.50.

De este modo  $0.50 > H$ , en la Figura 1D, se observa el rango escalado en función de los esfuerzos en los nodos, que en un cierto nivel de tendencia logarítmica el material se ve insuficiente de soportar grandes esfuerzos y cambia en el rango crítico en decaimiento de sus esfuerzos.

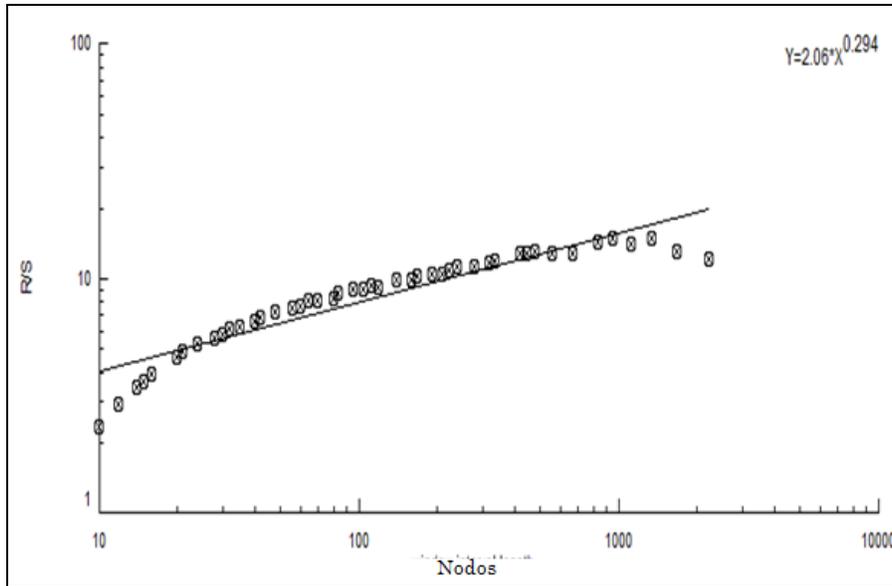


Figura 1D. Rango escalado de esfuerzos

Así mismo se observa en la Figura 2D, al exponente de Hurst acotado en  $0.5 < H < 1.0$ , la tendencia logarítmica de estos exponentes nos indica que los esfuerzos no deberían de sobrepasar el coeficiente de seguridad, de modo de que estos exponentes son unos indicativos para la prevención de la fisura en los elementos estructurales tubulares de la plataforma marina.

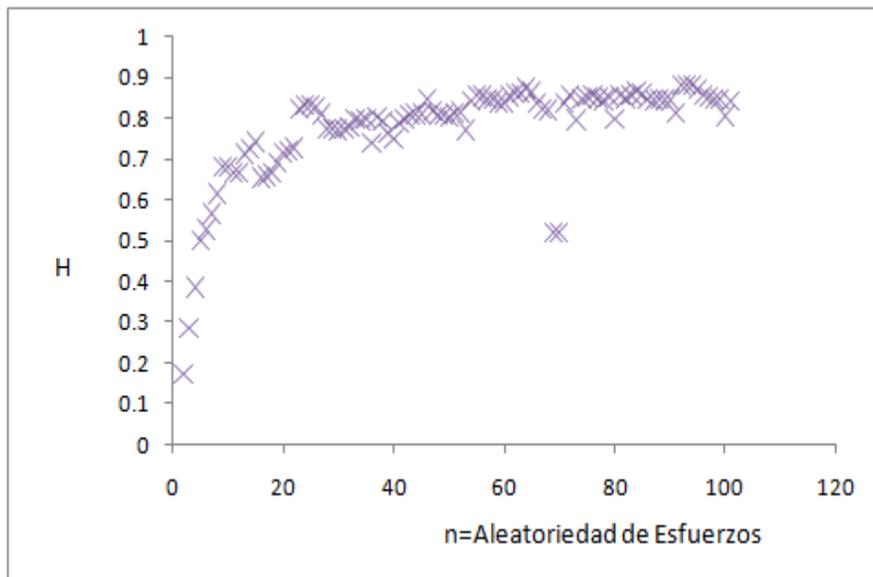


Figura 2D. Exponente de Hurst

Por lo que la Figura 3D, muestra las fluctuaciones de esfuerzos en los nodos, y que estos esfuerzos sobrepasan el esfuerzo de fluencia y el de tensión, esto crea gran incertidumbre en la plataforma marina que se encuentra en operación hasta el momento, indicando que no ha sufrido mayores cargas de sobreesfuerzo a la estructura que con lleve al colapso plástico y con ello pérdidas irreparables.

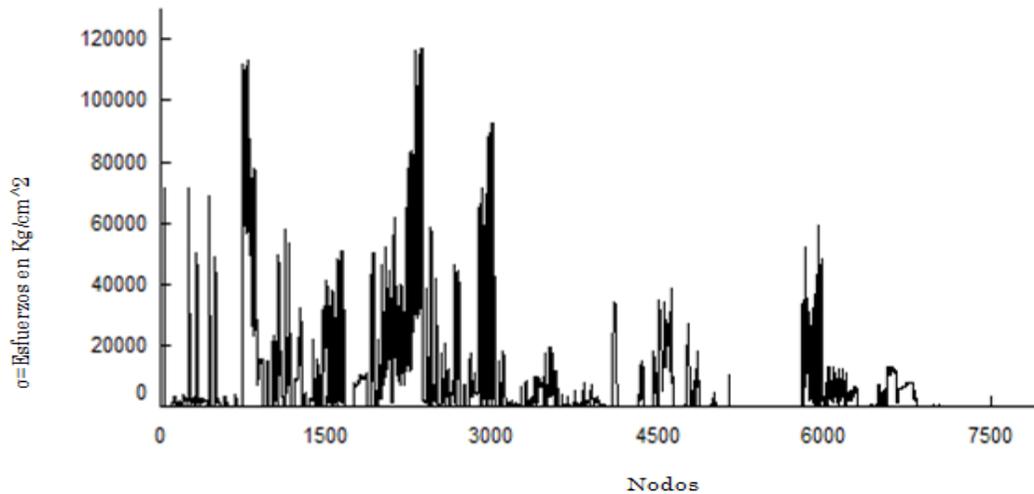


Figura 3D. Fluctuación de los esfuerzos en superficie rugosa

En la Figura 4D, se muestran los esfuerzos autosimilares en la superficie de arrugamiento, con el rango del exponente de Hurst acotado en  $0.5 < H$ , con 500 nodos y una lista de esfuerzos de 50.

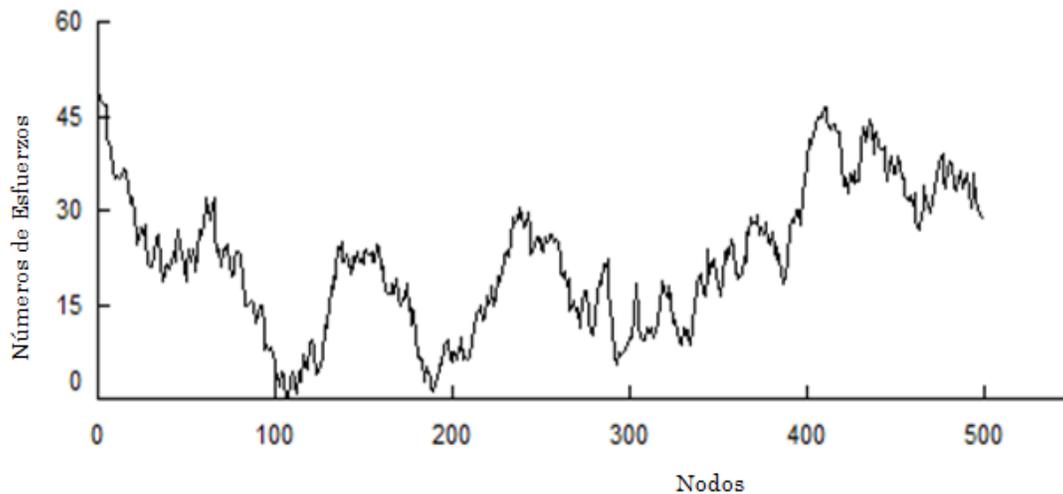


Figura 4D. Esfuerzos auto similares en la superficie rugosa

La Figura 3D, muestra los perfiles de alturas similares de la superficie rugosa debido a la alta concentración de esfuerzos en los nodos, siendo este un comportamiento autofin.