



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL



ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
PROGRAMA DE POSGRADO EN INGENIERÍA 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

Septiembre 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



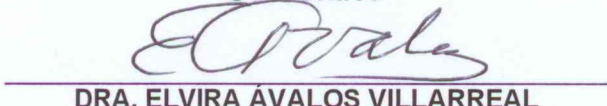
DR. RICARDO TEJEIDA PADILLA

Tercer Vocal



DR. JORGE ARMANDO ROJAS RAMÍREZ

Secretario



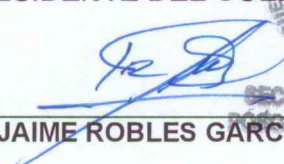
DRA. ELVIRA ÁVALOS VILLARREAL

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

Lázaro Félix Trinidad
Catalina Hernández Chable

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.

Contenido

Resumen.....	(v)
Abstract.....	(vi)
Lista de Figuras.....	(vii)
Lista de Tablas.....	(ix)
Simbología y nomenclatura.....	(x)
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación del proyecto de tesis.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.3.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos particulares.....	4
1.4 Metodología de investigación.....	4
1.5 Consideraciones y limitaciones del proyecto de investigación.....	9
1.5.1 Consideraciones.....	9
1.5.2 Limitaciones.....	9
1.6 Presentación del reporte de investigación.....	10
1.7 Productos de la investigación.....	11
1.8 Conclusiones del Capítulo.....	12
CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	13
2.1 La importancia del petróleo.....	13
2.2 Teoría General de Sistemas (TGS) y Sistemas complejos.....	13
2.2.1 TGS.....	13
2.2.2 Teoría de sistemas complejos.....	15
2.3 Investigación de operaciones (IOs).....	15
2.4 Teoría de Estructuras-Conceptos básicos.....	16
2.4.1 Antecedentes.....	16
2.4.2 Esfuerzos y deformaciones.....	17
2.4.3 Teoría de elasticidad.....	17
2.4.3.1 Estados de tensiones y deformaciones.....	17
2.4.3.2 Campo de deformaciones.....	19
2.4.3.3 Densidad de energía elástica.....	20
2.4.3.4 Ecuaciones diferenciales de equilibrio.....	20
2.4.3.5 Relación esfuerzo deformación.....	21
2.4.4 Análisis de esfuerzos.....	22
2.4.4.1 Definición de esfuerzos.....	22
2.4.4.2 Esfuerzos axiales en amarraduras de plataformas marinas.....	23
2.4.4.3 Concentración de esfuerzos en nodos de plataformas marinas.....	23
2.4.4.4 Esfuerzos críticos.....	23
2.4.4.5 Esfuerzos residuales.....	25
2.4.4.6 Esfuerzos críticos en cilindros a compresión.....	25
2.4.5 Teoría de la plasticidad.....	27
2.4.5.1 Esfuerzo plástico.....	27
2.4.5.2 Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas.....	28

2.4.6 Esfuerzos térmicos	30
2.5 Seguridad estructural.....	30
2.6 Investigación sobre diferentes aspectos de seguridad estructural en plataformas marinas.....	34
2.6 Técnicas de monitoreo de integridad estructural (IE)	37
2.7 Conclusiones del Capítulo	38
CAPÍTULO 3. METODOLOGIA DE INVESTIGACIÓN	39
3.1 Antecedentes sobre la investigación de operaciones (IOs)	39
3.2 Metodología de la IOs	40
3.2.1 Planteamiento del problema	41
3.2.2 Construcción del modelo.....	43
3.2.2.1 Ejemplo de un modelo matemático	44
3.2.2.2 Ejemplo del proceso de construcción del modelo de una plataforma marina.....	44
3.2.2.3 Ejemplo del modelo conceptual asociado con la integridad estructural (IE)	47
3.2.3 Deducción de una solución	48
3.2.4 Prueba del modelo y evaluación de la solución	49
3.2.5 Ejecución y control de la solución	51
3.3 Conclusiones del Capítulo	52
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	53
4.1 Complejos petroleros de México	53
4.1.1 Complejo Chicontepec.....	53
4.1.2 Complejo Cantarell	53
4.1.3 Complejo KU-MALOOB-ZAAP	54
4.2 Plataformas marinas	57
4.1.1 Descripción de una plataforma	59
4.3 Conclusiones del Capítulo	63
CAPÍTULO 5. APLICACIÓN NUMERICA DEL CASO DE ESTUDIO.....	64
5.1 La metodología de investigación y el caso de aplicación cuantitativa	64
5.2 Construcción del modelo de la plataforma marina bajo estudio	65
5.2.1 Definición de la geometría de estructura	65
5.2.2 Definición de cargas y otras consideraciones	65
5.2.2.1 Cargas involucradas en la integridad estructural y propiedades del material	65
5.2.2.2 Cargas ambientales	67
5.2.2.3 Cargas y combinaciones.....	69
5.3 Fases 3 y 4 de la metodología de investigación	71
5.4 Resultados del análisis estructural del caso de estudio.....	74
5.5 Conclusiones del Capítulo	87

CAPÍTULO 6. INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS	89
6.1 La metodología de investigación y el caso de aplicación cuantitativa	89
6.2 La importancia de la integridad estructural (IE).....	89
6.3 Revisión y evaluación de métodos existentes de control de la integridad estructural.....	89
6.3.1 Método de control de IE.....	90
6.3.1.1 Monitoreo de emisiones acústicas (MEA).....	90
6.3.1.2 Sistema de detección de fugas (DF)	91
6.3.1.3 Monitoreo del aire (MEA)	91
6.3.1.4 Sistema de posicionamiento global (SPG)	91
6.3.1.5 Medidor de fatiga (MIF)	92
6.3.1.6 Detección continua de inundación (MCMI): control interno	92
6.3.1.7 Detección continua de inundación (MCMI): control externo.....	92
6.3.1.8 Respuesta de frecuencia natural (MFNR).....	93
6.3.1.9 Huellas acústico-dactilares (TAHD)	93
6.3.1.10 Control de cadena de amarre ("mooring) (CCA)	93
6.3.1.11 Monitoreo de tensión	94
6.3.2 Evaluación de riesgos, consecuencias y técnicas de control de IE	94
6.3.2.1 Clima extremo.....	94
6.3.2.2 Incendio y explosión.....	95
6.3.2.3 Los riesgos geológicos/geotécnicos.....	96
6.3.2.4 Corrosión/degradación del material.....	96
6.3.2.5 Caída de objetos	96
6.3.2.6 Las colisiones de buques.....	98
6.3.2.7 Fatiga.....	98
6.3.2.8 La pérdida de la estación de precisión.....	98
6.3.2.9 Cambios de procesos	99
6.4 Capacidad de las técnicas de control de IE.....	99
6.5 Limitaciones de las técnicas de inspección existentes	99
6.6 Mecanismos de daño para las cuales un sistema de monitoreo puede complementar a las inspecciones existentes	101
6.6.1 Estructuras bajo el agua.....	101
6.6.1.1 Fisuras de superficie.....	101
6.6.1.2 Grietas-a través de espesor	102
6.6.1.3 Grietas de gran superficie y empotradas.....	102
6.6.1.4 Aflojamiento de pernos	103
6.6.1.5 Ruptura.....	103
6.6.2 Zona "Splash"	103
6.6.1 Las superestructuras.....	103
6.7 Componentes estructurales difíciles de inspeccionar	106
6.8 Gestión de la integridad estructural de plataformas marinas fijas	107
6.8.1 Descripción del modelo de GIE	108
6.8.1.1 Política de la GIE.....	108
6.8.1.2 Estrategia de GIE	108
6.8.1.3 Estrategia de control.....	108
6.8.1.4 Programa de inspección.....	108
6.8.1.5 Evaluación estructural	109
6.8.1.6 Mantenimiento.....	109
6.8.1.7 Gestión de la información.....	109
6.8.1.8 Auditoria y revisión	109
6.9 Conclusiones del Capítulo	110

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO	111
7.1 Conclusiones.....	111
7.1.1 Conclusiones acerca de los resultados de análisis cuantitativo.....	112
7.1.2 Conclusiones acerca de los resultados del aspecto cualitativo de la investigación.....	113
7.1.2.1 Conclusiones acerca de los factores de riesgo a la IE de las plataformas marinas	113
7.1.2.2 Conclusiones acerca de los resultados de la IE	114
7.1.3 Conclusiones acerca de la metodología de investigación.....	115
7.2 Futuro trabajo.....	118
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
ANEXOS:.....	131
Anexo-A: Accidentes en estructuras de plataformas marinas.....	131
Anexo-B: Sistemas y sistemas complejos	137
Anexo-C: Método de rigideces	143
Anexo-D: Esfuerzos térmicos, deformación plástica y fatiga	147
Anexo-E: Método de elemento finito (MEF)	155
Anexo-F: Resultados adicionales sobre esfuerzos críticos.....	161
Anexo-G: Resultados adicionales sobre deformación plástica	168
Anexo-H: Resultados adicionales sobre deformación térmica	174
Anexo-I: Resultados en base a la teoría de sistemas complejos.....	180
Anexo-J: Inspección no destructiva	184
Anexo-K: Ejemplos de fotografías de inspección estructural en plataformas marinas.....	198
Anexo-H: Productos del proyecto de investigación.....	201

SEGURIDAD E INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS

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.

SAFETY AND STRUCTURAL INTEGRITY OF OFFSHORE PLATFORMS

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 Gulf of Mexico.

Lista de Figuras

Figura 1.1. Metodología de investigación. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	5
Figura 2.1. Modelo conceptual de la revisión de la literatura.....	13
Figura 2.2. Componentes de fuerzas internas. (Pytel y Singer, 1987)	16
Figura 2.3. Deformación axial. (Gere, 2002)	17
Figura 2.4. Esfuerzo interno. (Mckenzie, 2006)	18
Figura 2.5. Diagrama de tensión y deformación para el acero dulce. (Strelkov, 1978)	18
Figura 2.6. Fuerzas distribuidas sobre el volumen. (Torres, et al., 2004).....	19
Figura 2.7. Densidad de energía. (Vable, 2003)	20
Figura 2.8. Esfuerzos en punto. (Pov, 1996).....	23
Figura 2.9. Esfuerzo axial. (Ruiz, 2003)	23
Figura 2.10. Gráfica de la curva de Euler. (Shanly, 1971)	25
Figura 2.11. Representación esquemática de los tres tipos de curvas de esfuerzos. (Navarro y Madrigal, 2009)	28
Figura 2.12. Junta estructural tipo K-T. (Bea y Young, 1993; Murphy, et al., 2004)	29
Figura 3.1. Fases de la metodología de la IOS. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	41
Figura 3.2. Fase-1: Planteamiento del problema. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	42
Figura 3.3. Fase-1: Construcción del modelo. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	43
Figura 3.4. Modelo simplificado del proceso de análisis estructural	45
Figura 3.5. Definición del tipo de elemento a estudiar	45
Figura 3.6. Definición de las propiedades del material	46
Figura 3.7. Definición de los nodos estructurales	46
Figura 3.8. Generación del modelo en 3D.....	47
Figura 3.9. Enfoque estratégico de integridad estructural (IE).....	48
Figura 3.10. Fase-3: Deducción de una solución. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	49
Figura 3.11. Fase-4: Prueba del modelo y evaluación de la solución. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	50
Figura 3.12. Fase-5: Ejecución y control de la solución. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	51
Figura 4.1. Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste (García Cuellar, et al., 2004)	54
Figura 4.2. Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste (García Cuellar, et al., 2004)	55
Figura 4.3. Localización de pozos y líneas de sección stratigráficas estudiadas en la Sonda de Campeche, sur del Golfo de México. (Cantú Chapa, 2008).....	56
Figura 4.4. Ejemplo de un complejo de plataformas marinas.....	56
Figura 4.5. Ejemplo de operaciones con grúas en una plataforma marina. (Pemex, 2008)	58
Figura 4.6. Ejemplo de operaciones en una plataforma marina. (Pemex, 2008)	58
Figura 4.7. Ejemplo de operaciones en un complejo de plataformas marinas. (Fotogalería, 2011).....	59
Figura 4.8. Superestructura y subestructura de una plataforma marina fija. (Chakrabarti, et al., 2005)	60
Figura 4.9. Ejemplo de conexión tubular de la estructura de una plataforma. (API, 2000)	61
Figura 4.10. Ejemplos de conexiones tubulares típicos de estructuras de plataformas marinas. (API, 2010).....	62
Figura 4.11. Nodos estructurales tipo "Y" y "T". (API, 2000).....	62
Figura 4.12. Nodos estructurales tipo "X" y "K". (API, 2000)	63
Figura 5.1. Fase-2: Construcción del modelo. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975)	64
Figura 5.2. Marco estructural de la plataforma bajo estudio.....	65
Figura 5.3. Elementos del modelo general. (Modelo generado por Ansys).....	70
Figura 5.4. Modelo general con condición de frontera. (Modelo generado por Ansys)	71

Figura 5.5. Fases-3 y 5: Metodología de investigación. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975).....	72
Figura 5.6. Resultados obtenidos de esfuerzos en los elementos estructurales de la plataforma bajo estudio	73
Figura 5.7. Comportamiento de esfuerzos críticos en los elementos estructurales tubulares de la plataforma	75
Figura 5.8. Parámetro matemático de Donnell.....	76
Figura 5.9. Modelo de plataforma generado por el software ANSYS	77
Figura 5.10. Deformación plástica en nodos estructurales tubulares de la plataforma marina (Modelo generado por Ansys)	78
Figura 5.11. Deformación plástica en nodos estructurales	79
Figura 5.12. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro espesor	80
Figura 5.13. Factores de concentración de esfuerzos a compresión (KC y tensión (KT) en la pared cilíndrica (ver Fig. 5.6).....	81
Figura 5.14. Factor de concentración de esfuerzo elástico en el nodo estructural.....	81
Figura 5.15. Esfuerzo de relajación	82
Figura 5.16. Esfuerzo térmico en los nodos estructurales.....	83
Figura 5.17. Esfuerzo de deformación térmica	84
Figura 5.18. Termofluencia	85
Figura 5.19. Rapidez de deformación	86
Figura 5.20. Esfuerzo de deformación térmica	86
Figura 6.1. Metodología de investigación en el contexto del Capítulo.....	88
Figura 6.2. Riesgos estructurales de plataformas marinas costa fuera	95
Figura 6.3. Modelo GIE	109
Figura 7.1. Factores de riesgo de estructuras de plataformas marinas fijas.....	114
Figura 7.2. metodología de investigación	116

Lista de Tablas

Tabla 1.1. Etapas, actividades y salidas de las fases de la metodología de investigación	6
Tabla 4.1. Tipos de plataformas marinas. (Pemex, 2009)	57
Tabla 5.1. Propiedades físicas del material. (ASM, 1998)	66
Tabla 5.2. Cargas gravitacionales-Nivel + 19.100 m (ver Fig. 5.2).....	66
Tabla 5.3. Cargas gravitacionales-Nivel + 27.939 m (ver Fig. 5.2).....	67
Tabla 5.4. Parámetros meteorológicos y oceanográficos-condiciones de operación. (API-RP-2A, 2000).....	68
Tabla 5.5. Parámetros meteorológicos y oceanográficos-condiciones de tormenta. (API-RP-2A, 2000).....	68
Tabla 5.6. Tipos de carga y combinaciones.....	69
Tabla 5.7. Esfuerzos en elementos tubulares de la plataforma fija bajo estudio.....	74
Tabla 5.8. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma	76
Tabla 5.9. Esfuerzos de deformación térmica.....	82
Tabla 6.1. Técnicas de IE y los factores de riesgo de integridad estructural	97
Tabla 6.2. Capacidad de monitoreo de las técnicas de IE.....	99
Tabla 6.3. Limitaciones de las técnicas de inspección existentes	100
Tabla 6.4. capacidad de monitoreo de las técnicas de IE.....	102
Tabla 6.5. Tecnologías de inspección actuales de inspección detallada.....	104
Tabla 6.6. Tecnologías de inspección-por chequeo/proyectada	104
Tabla 6.7. Evaluación de las tecnologías actuales de inspección	105
Tabla 6.8. Tecnologías complementarias de IE.....	106
Tabla 6.9. Componentes estructurales difíciles de inspeccionar	107

Nomenclatura y Simbología

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	Noroeste
SNM	Superficie nivel medio del mar
NTCDF	Norma Técnicas Complementarias del Distrito Federal

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^i	Deformación
α	Angulo de deformación
P	Carga
$R_{A,B}$	Reacciones
D	Desplazamiento
σ	Tensión normal
ε	Alargamiento unitario
L	Longitud del elemento
u	Deformación unitaria o desplazamiento
Δ	Vector que contienen las deformaciones
U	Energía de deformación
U_0	Densidad de energía de deformación
V	Volumen del cuerpo
ε^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	Coficiente del estado de esfuerzo
E	Modulo de Elasticidad o Young
ν	Poisson del acero
P	Fuerza externa
A	Área sobre el cual se distribuye la carga
r	Radio de giro
σ_{cr}	Esfuerzo crítico
D/t	Relación diámetro-espesor
K_c	Constante
z	Parámetro de Batdorf
t	Espesor de la placa
R	Radio

σ	Esfuerzo real
ε	Deformación real.
ε^p	Deformación plástica
ε	Deformación elástica
σ_o	Coefficiente
m	Exponente de endurecimiento por deformación
k	Valor característico del material
$f(\sigma)$	Invariante cuadrático
σ^i	Vector de tensión
σ	Tensor de tensiones
g_{ij}	Componentes del tensor métrico del espacio
Q^2	Vector de tensión
λ	Deformación plástica total equivalente
M_p	Momento plástico
W_C	Carga de colapso
β y τ	Parámetros Geométrico
D	Diámetro mayor
d	Diámetro menor
g	Separación
σ_{yy} , σ_{xy} y σ_{xx}	Esfuerzos
δ_o	Alargamiento
t_o	Intervalo de tiempo
σ_o	Esfuerzo de tensión inicial
η	Viscosidad de corte
A''	Área de números de átomos
α	Tensión inversa
n	Valores del exponente
Δt^I	Cambios de temperatura en cada nodo
ε_{ii}^0	Estado inicial de deformaciones restringidas
σ_{ii}^0	Estado de esfuerzo en tensión no equilibrado
W	Energía interna de deformación
Δt	Incremento del tiempo
Δt^M	Cambio térmico medio
K_e	Matriz de rigidez del elemento
h	Espesor del cilindro
R_d	Rapidez de termofluencia
Δ_d	Incremento de deformación
ΔT^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
ϕ	Factor de resistencia correspondiente a
γ_i	Factor de carga correspondiente a Q_i
ϕR_n	Resistencia de diseño
$\sum \gamma_i Q_i$	Resistencia requerida para las cargas factorizadas
σ_{nodo}	Esfuerzo del nodo
v	Factor por el tipo de nodo
v_2	Factor por la calidad de la unión
σ_{adm}	Esfuerzo de fluencia del material base
σ_{Sadm}	Esfuerzo admisible de la unión
R_R	Característica de la resistencia
μ_R	Resistencia media
V_R	Coefficiente de variación
R y K_R	Constante

INTRODUCCIÓN

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 en materia 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.

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 (Galano, et al., 1995; Bea & Young, 1993; Vughts, 1990; Vinge & Haver, 1994; Grant, et al, 1995). La mayor parte de estos han sido motivados, por la necesidad de garantizar un diseño confiable de las estructuras tubulares. Así mismo han ocurrido redefiniciones en lo concerniente a los esfuerzos para las conexiones soldadas con autógena entre los miembros de acero estructural tubular, tales como las estructuras de plataformas costa fuera de producción de crudo y gas. 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.

La compresión de los esfuerzos en sus uniones tubulares ha llevado a la necesidad de un diseño robusto y a mejorar las metodologías de evaluaciones estructurales (Dier, 2005). 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 (Nazari and Durack, 2007; Marshall, 2004; Talie-Faz, 2002; Jaurrieta, et al., 2003; Hooi, 2006). En los nodos se forma una alta concentración de esfuerzos y aumento de esfuerzos residuales generando grietas; además, en estas zonas de intersecciones de los elementos estructurales, las juntas se consideran completamente rígidas (Filho, et al. 2004), de modo que es muy común la presencia de defectos en la soldadura debido a la discontinuidad, generándose la fatiga a consecuencia de cargas cíclicas (Sibaja y Ramírez, 2003; Bomel, 1999; Ocel et al., 2004, Plumier, et al. 1998, Yao, 1961). Así mismo, los esfuerzos residuales son uno de los factores más importantes para la resistencia a la fatiga (Young, et al. 2007; Lloyd's, 1997; Hernández, et al., 2004, Yu, 2002).

En estas conexiones los esfuerzos de deformación plástica generan tensiones residuales, estas siguen existiendo incluso después de que se deje de imponer cargas externas; formándose así una articulación plástica en el sistema al exceder completamente su esfuerzo de fluencia. El control de este esfuerzo de fluencia es uno de los aspectos más importantes de los materiales para la aplicación en ingeniería estructural (Roylance, 2001;

Becker, et al., 2000). Esta articulación plástica se localiza, en las intersecciones de los sistemas de elementos estructurales que implican un cambio de la geometría (Chen, et., al., 1988, 2003). Al exceder la fuerza de fluencia ocurre un flujo plástico (flujo plástico se puede definir como el comportamiento en el cual la deformación en un elemento sufre cambio mientras la carga permanece esencialmente invariable) no uniforme, y es más probable que un material fluya plásticamente a un alto nivel de esfuerzo (Byers y Sinder, 1975), generándose dicho flujo plástico local en los nodos (Xin et. al., 2004). El conocimiento de este parámetro permite realizar un análisis de esfuerzos y deformaciones pertinentes en donde intervienen grandes deformaciones plásticas, determinando las curvas límites de metales; esto es para predecir la fractura mecánica bajo carga monótona como cíclica (Vergara, 2004; Alonso, 2002).

Las estructuras tubulares cilíndricas huecas de las plataformas marinas están sometidos a subsidencias de aumento de cargas externas (fuerza de ola, vibración mecánica de equipos, fuerza sísmica, corrientes marinas altas en tiempo de tormenta; ver sección 3). 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 (Skallerud, et al., 1990).

Lo anterior 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, siendo ésta el dilema de la estabilidad del cilindro axialmente comprimido (Liu, 1988; Grecea, 2003). Por otro lado, se ha demostrado que el factor de concentración de esfuerzos disminuye mientras que las tensiones en la discontinuidad se incorporan al rango plástico (Hardrath., et al. 1951). Así mismo se ha estudiado el comportamiento plástico de un cilindro circular delgado con cortes bajo cargas de momentos para la distribución de tensión alrededor del corte (Poursaeidi, et al., 2004), también ha sido tema de mucha investigación incluyendo la definición de los esfuerzos últimos, y combinación de acciones de cortante, momento de flexión y fuerza axial.

Actualmente, los estudios se concentran en simulaciones numéricas de elementos estructurales y procesos de conformado de metales, en los cuales se 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 (Aparicio, et al., 2007; Sekulovic, et al., 2004; Sanjuán y Juha, 2004; Timoshenko, 1957). 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 (Dugdales y Ruiz, 1973; Baerheim, et al., 1998; Murthy, et al. 2004).

Por otro lado, en el contexto más general (a nivel de toda una plataforma marina o complejo de plataformas costa fuera), las instalaciones petroleras son objeto de deterioro constante debido a factores de riesgos asociados, por ejemplo, con: la corrosión, incendios, caídas de objetos, explosiones, grietas de fatigas o daños mecánicos que pueden disminuir significativamente la integridad estructural de las mismas. Hasta ahora se han realizado

pocos estudios de la confiabilidad teniendo en cuenta el daño estructural en los elementos. Cuando la estructura de una plataforma marina falla o colapsa, normalmente hay pérdidas significativas en términos de vidas humanas, instalaciones e impactos negativos al medio ambiente, tal y como se ha demostrado en varios accidentes que han ocurrido en los últimos años. (Ver por ejemplo el Anexo-A).

1.2 Justificación del proyecto de 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 (Becker, et al., 2000; Vergara, 2004; Dier, 2005; Nazari A., & Durack, 2007). 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 (Young y Zheng, 1990). 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; ver por ejemplo, Liu (1988), Sekulovic, et al., (2004), Grant, et al., (1995), Bejorn, et al., (1990), entre otros.

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 (Grecea, et al, 2003), 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 (Sekulovic y Danilovic, 2004; Poursaeidi, et al., 2004). 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 (Poursaeidi, et al., 2004; Sibaja y Ramirez, 2003; Sanjuan y Juha, 2004). 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. (Sanjuan y Juha, 2004; Marshall, 2004; Bea y Young, 1993).

El presente proyecto se enfoca al estudio del comportamiento mecánico estructural de los elementos estructurales de un caso particular de una plataforma marina de un activo de explotación de crudo y gas ubicada en el Golfo de México. También, se aborda el tema de la integridad estructural (IE) de dichas instalaciones, mediante una revisión exhaustiva del estado del arte en cuanto a las tecnologías existentes en relación al control de IE de plataformas marinas fijas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Llevar a cabo un análisis estructural de una plataforma marina fija, así como la evaluación de las tecnologías existentes de monitoreo de la integridad estructural (IE) de plataformas marinas.

1.3.2 Objetivos específicos

- Llevar a cabo una revisión crítica de la literatura relacionada con las investigaciones que se han llevado a cabo en el área de seguridad estructural de plataformas marinas.
- Llevar a cabo una revisión exhaustiva y crítica de la literatura relacionada con las tecnologías existentes de monitoreo de Integridad estructural (IE) de plataformas marinas fijas.
- Llevar a cabo una recopilación de datos en campo de la plataforma marina bajo estudio.
- Llevar a cabo un análisis estructural de la plataforma fija bajo estudio.
- Llevar a cabo una evaluación de los principales resultados del análisis estructural de la plataforma marina.
- Evaluar las tecnologías existentes de monitoreo de IE de plataformas marinas fijas.
- Documentar los resultados de la investigación.

1.4 Metodología de la investigación

En este proyecto de investigación se adoptó la metodología de Investigación de Operaciones (IOs) para el desarrollo de la investigación (Ackoff y Sasieni, 1975). La adopción de la metodología de IOs se debió fundamentalmente a sus características y orientación a la solución de problemas. En resumen, las características esenciales de la IOs son las siguientes: (a) su orientación de *sistemas*; b) el uso de equipos interdisciplinarios, y c) la aplicación del método científico. (Ackoff y Sasieni, 1975).

La orientación de la IOs a *sistemas* (ver Capítulo 2), se basa en el hecho de que, en los *sistemas*, el comportamiento de cualquier 'parte', puede afectar a todas las demás 'partes' que conforma dicho *sistema*; sin embargo, no todos los efectos son importantes o susceptibles de detección. Por lo tanto, la esencia de esta orientación estriba en el hecho de que el enfoque a los problemas de organización es opuesto a lo que implica "reducir la magnitud de un problema". En general, bajo esta perspectiva, el investigador amplía el concepto inicial del problema que se intenta resolver. En este contexto, el presente proyecto de investigación no sólo se enfoca a aspectos muy puntuales en cuanto a los problemas mecánico estructurales que se presentan en estructuras de plataformas marinas (por ejemplo, el análisis de esfuerzos críticos, etc.), pero esta investigación también, se centra en una

evaluación cualitativa de otros factores de riesgo que pueden afectar dichas instalaciones; tales como: incendios, explosiones, caídas de objetos, etc. (ver sección 6.3.2.1 del Capítulo 6). Además, se abarcó también, técnicas de control de Integridad Estructural (IE) con aplicación a plataformas marinas fijas, donde se identificaron las ventajas y desventajas de las técnicas existentes. Desde esta perspectiva, se tienen una visión más general (de sistemas) a los problemas asociados con fallas de estructuras de las plataformas marinas de producción de petróleo y gas.

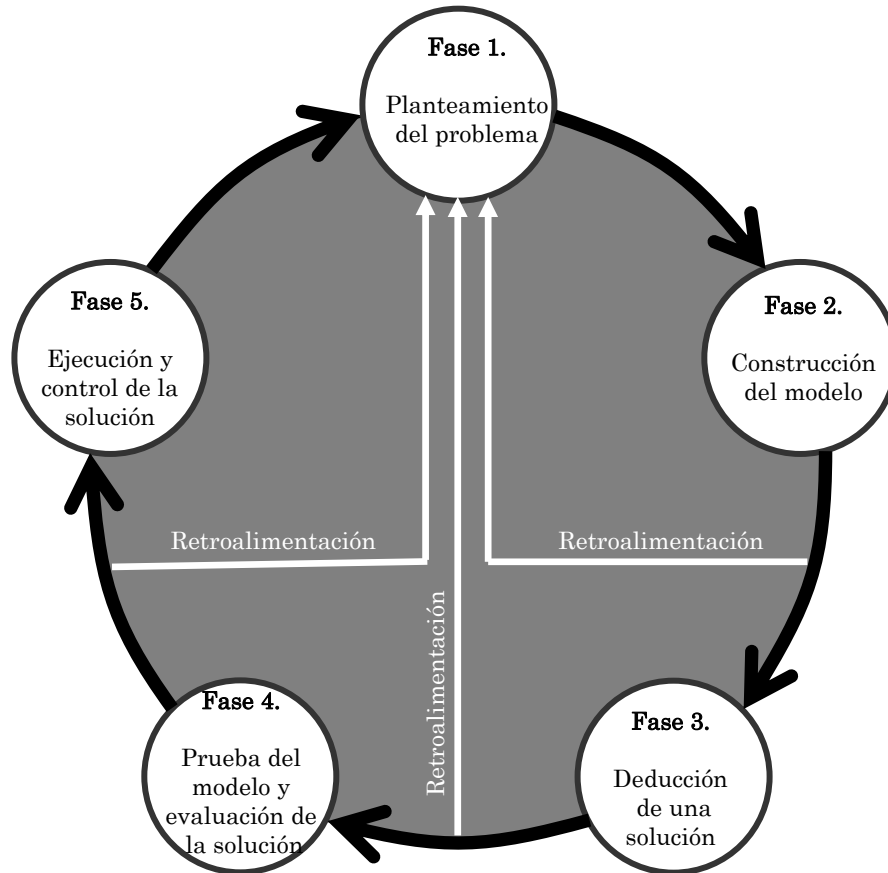


Figura 1.1. Metodología de investigación. (Adaptada de Ackoff y Sasieni, 1975).

En la metodología de IOs se argumenta también que se tiene la percepción de que los estudios del *método científico*, se cita la *experimentación* como algo esencial para llevar a cabo dichos estudios. Sin embargo, la experimentación en el sentido estricto, a menudo es imposible en la práctica, cuando se trata, por ejemplo, de organizaciones de tipo industrial como el caso del presente proyecto de investigación. Una plataforma marina (en el caso más simple) o bien un complejo de plataformas marinas no pueden someterse a una *experimentación* (por ejemplo para determinar el posible daño de la estructura de plataforma en caso de una explosión o incendio). Por lo consiguiente, en la mayoría de los casos, debe usarse un método de investigación que no implique experimentación sobre el *sistema* total. Lo anterior se puede lograr mediante el uso de *modelos*, definidos en el sentido amplio de la palabra, como una representación de la *realidad* que se desea estudiar. En el presente proyecto de investigación se ha usado el software ANSYS, el cual contiene los modelos matemáticos para simular el comportamiento estructural de una plataforma

marina bajo diferentes condiciones de carga. El Capítulo 3, para una discusión detallada de la metodología de IOs en el contexto del presente proyecto de investigación.

La Figura 1.1 presenta las etapas de la metodología y la Tabla 1.1 presenta una breve descripción de cada etapa, así como las actividades y resultados de cada etapa o fase de las mismas. Las etapas de la metodología son las siguientes (ver Fig. 1.1):

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

A continuación se presenta una muy breve descripción de cada una de las etapas. Sin embargo, detalles de cada etapa en el contexto del proyecto de investigación se presenta en el Capítulo 3.

Tabla 1.1 Etapas, actividades y salidas de las fases de la metodología de investigación.

Etapas de la Metodología	Actividades llevadas a cabo	Resultado de la etapa de la metodología
Fase 1: Planteamiento del problema	Revisión exhaustiva de literatura en relación a: a) investigación concerniente a diferentes factores asociados con el comportamiento de estructuras bajo diferentes fenómenos; causas de fallas de las estructuras. (Ver sección 1.1 de este Capítulo; Capítulos 2y 4; Anexos A, C, D, y E). b) investigación relacionada con los diferentes métodos de control e inspección de integridad estructural (IE). Ver Capítulo 6 y Anexos A, J y K.	Visión clara de la problemática a investigar, así como los actores involucrados.
Fase 2: Construcción del modelo	De la revisión de la literatura se cubrieron los modelos matemáticos asociados con la teoría de estructuras. Mismos que se encuentran en el software ANSYS usado en el presente proyecto de tesis. Ver Capítulos 4 y 5.	Se generó el modelo estructural de plataforma marina donde se manipularon las diferentes variables para entender el comportamiento de la misma bajo diferentes condiciones, por ejemplo, de carga. Ver Capítulos 4 y 5
Fase 3: Deducción de una solución	Se llevaron a cabo una gran cantidad de simulaciones mediante el uso del software ANSYS. En base a lo anterior se obtuvieron los resultados que se presentan en el Capítulo 5 y Anexos F, G, y H.	Ver resultados en el Capítulo 5
Fase 4: Prueba del modelo y evaluación de la solución	La consideración que se tomó en cuenta en esta etapa es que los modelos matemáticos que han sido formulado para el estudio de estructuras de plataformas marinas han sido ampliamente validados.(ver Capítulo 3 y la sección 1.5 de Limitaciones de esta investigación).	Ver Capítulo 3 y Secciones 1.5 y 1.7
Fase 5: Ejecución y control de la solución	Ver Capítulo 7.	Ver Capítulo 7

Planteamiento de problema: se refiere en la formulación del problema, así como la identificación de los actores involucrados en el problema, incluyendo al mismo investigador.

Construcción de un modelo: esta etapa se refiere al uso de diferentes tipos de *modelos* para *experimentar* la *realidad*, que se está investigando.

Deducción de una solución: consiste esencialmente en obtener una solución a la problemática que se está estudiando/investigando.

Prueba del modelo y evaluación de la solución: esta etapa consiste en una evaluación del *modelo* y de la *solución*. Es claro que la pregunta que surge en esta etapa es: ¿Cómo sabemos que el *modelo* es adecuado/confiable? Es claro que un modelo con deficiencias puede generar resultados (y en consecuencia) soluciones erróneas. (Ver Capítulos 3 y 7 para detalles de la discusión acerca de estas preguntas).

Ejecución y control de la solución: consiste en mantener las variables críticas dentro de los niveles aceptables.

La Tabla 1.1 resume las actividades realizadas así como los resultados de cada etapa de la metodología adoptada en este proyecto de investigación

Resultados relevantes:

a) Caso del análisis cuantitativo (ver Capítulo 5)

- Del análisis estructural, se puede argumentar que los esfuerzos críticos obtenidos no representan significativamente un riesgo de colapso de la estructura de la plataforma.
- Del análisis de esfuerzos en los nodos estructurales de la plataforma bajo estudio, se observa que las uniones soportan una considerable cantidad de esfuerzos que pueden llegar en un momento dado a 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 (Fig. 5.14 del Capítulo 5).
- En muchas ocasiones al considerar factores de seguridad mayores al "óptimo", se incurre en un aumento considerable en los costos de construcción de dichas estructuras. Sin embargo, como en muchos otros aspectos, la pregunta es ¿Cuál es el valor óptimo? Dado lo anterior, en la práctica cuando se diseña una plataforma de este tipo normalmente se toma un valor de esfuerzo, por ejemplo, en los nodos de un valor de 0.85.
- Este análisis confirma una vez más el por qué las estructuras de este tipo se diseñan con un factor de seguridad del orden de 0.72; obviamente esto hace que los costos sean muy elevados.

b) Caso del análisis cualitativo (ver Capítulo 6)

- Las plataformas de producción de petróleo y gas se encuentran sometidas a un número considerable de factores de riesgo que pueden (y han conducido como por ejemplo, los accidentes descritos en el Anexo-A) conducir a fallas de dichas

estructuras. En este proyecto de tesis se han identificado los siguiente factores de riesgo a las que se encuentran sometidos las instalaciones costa fuera:

- a) Clima extremo
- b) Incendio y Explosión
- c) Los riesgos geológicos / geotécnicos
- d) Corrosión/degradación del material
- e) Caída de objetos
- f) Las colisiones de buques/helicópteros/aviones
- g) Cambios en procesos

Conclusiones acerca de los resultados de la IE

- De la revisión se ha encontrado que técnicas han sido desarrolladas y se encuentran disponibles para el monitoreo de los parámetros relacionados con la integridad estructural de instalaciones costa fuera, éstos son los siguientes:
 - a) Monitoreo de emisiones acústicas (MEA)
 - b) Detección de fugas (DF)
 - c) Monitoreo de espacio de aire (MEA)
 - d) Monitoreo por sistema de posicionamiento global (SPG)
 - e) Monitoreo de frecuencia natural de respuesta (MFNR)
 - f) Control de la cadena de amarre ("mooring") (CCA)
 - g) Monitoreo de tensión (MT)
- Se encontró también que los métodos que requieren de un mayor desarrollo antes de convertirse en tecnologías altamente confiables de IE son las siguientes:
 - a) Monitores de índices de fatiga (MIF)
 - b) Monitoreo continuo de 'miembro' inundado (MCMI)
 - c) Toma acústica de huellas dactilares (TAHD)
- La importancia de las técnicas de control de IE de instalaciones de plataformas marinas costa fuera como un requisito fundamental en la "extensión de vida útil" de dichas instalaciones se ha abordado también si dichas técnicas pueden ser aplicables a áreas difíciles de acceso de dichas instalaciones. Se concluye que dichas técnicas de monitoreo pueden ser utilizadas para detectar los mecanismos de daño en los elementos difíciles de inspeccionar mediante las técnicas convencionales. Estos incluyen (Ver Capítulo 6):
 - a) Secciones soldadas de los pilotes
 - b) Uniones de anillo endurecido
 - c) Elementos en las zonas de salpicadura
 - d) Componentes de aguas profundas

1.5 Consideraciones y limitaciones del proyecto de investigación

1.5.1 Consideraciones

Caso de aplicación cuantitativa

- En este proyecto de investigaron los esfuerzos críticos en los elementos estructurales de una plataforma marina fija. Esto es, los resultados obtenidos no son genéricos o bien aplicables a otros tipos de plataformas, tales como las semi-sumergibles, o las de concreto, o flotantes.
- En este trabajo de tesis se evalúan los esfuerzos críticos en los nodos estructurales de una plataforma marina tipo fija bajo las condiciones, por ejemplo, de cargas gravitacionales (cargas verticales), cargas ambientales (o cargas laterales), etc., mostradas en las Tablas 5.2, 5.3 y 5.4 del Capítulo 5. Al igual que en el caso anterior los resultados obtenidos deben ser considerados bajo el contexto de las consideraciones señaladas anteriormente. De hecho se puede argumentar que los resultados obtenidos son válidos solamente dentro del contexto de este trabajo de tesis.

Caso de aplicación cualitativa

- Al igual que en el caso anterior, la revisión de la literatura concerniente a las técnicas de control de integridad estructural (SI) se llevó a cabo considerando en la mayoría de los casos para plataformas marinas tipo fijo. Aunque en algunos casos se menciona a las plataformas del tipo semi-sumergibles.
- Los resultados de esta evaluación son lo suficientemente genéricos y pueden ser aplicables a otros tipos de plataformas marinas que operan en ambientes marinos.

1.5.2 Limitaciones

Caso de aplicación cuantitativa

- En el este proyecto de investigación no se consideraron explícitamente factores de riesgo, tales como cargas debidos a terremotos y así como cargas por impacto de embarcaciones y daños mecánicos por picaduras de corrosión y abolladuras de elementos estructurales.
- Además, tampoco se consideraron efectos de explosiones e incendios o bien posibles efectos de caídas de objetos a la estructura de la plataforma.
- 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 anticorrosivas y catódica no sea suficiente para el incremento de vida útil.

- Abolladuras, que son des-configuraciones 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.

1.6 Presentación del reporte de investigación

Este reporte de investigación está organizado en siete capítulos y el contenido de los mismos se describe a continuación:

- **El Capítulo 1**, presenta los antecedentes, justificación y los objetivos planteados en el proyecto de tesis. También, presenta en forma condensada la justificación del trabajo de tesis; así como la justificación de la metodología de investigación adoptada para el desarrollo del proyecto de tesis. El Capítulo, también expone las limitaciones y consideraciones del proyecto. Finalmente, se presentan los principales productos del proyecto de investigación.
- **El Capítulo 2**, presenta la revisión de la literatura relacionada con diferentes estudios e investigaciones relacionadas con la seguridad en las estructuras de plataformas marinas, así como aspectos teóricos sobre la teoría general de sistemas, estructuras, sistemas complejos, entre otros. También, se presenta una breve descripción de algunos aspectos relevantes a los factores de riesgo de IE de plataformas marinas fijas.
- **El Capítulo 3**, presenta una descripción detallada de la metodología de investigación de operaciones (IOs), la cual ha sido adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación. La metodología se discute en el contexto del proyecto de tesis.
- **El Capítulo 4**, presenta una breve descripción del caso de estudio. En general, se presentan algunos aspectos relevantes de la ubicación geográfica del campo petrolero donde se ubica la plataforma marina fija bajo estudio. Así como también se presentan algunos detalles de uniones de algunos miembros estructurales típicos de este tipo de plataformas.
- **El Capítulo 5**, presenta los detalles del análisis estructural de la plataforma marina fija bajo estudio. Los detalles de las consideraciones de carga, entre otros, a la que se encuentra sometida dicha instalación se detallan en el mismo capítulo.
- **El Capítulo 6**, presenta los resultados de la investigación relacionada con las técnicas de monitoreo de integridad estructural (IE); así como las principales conclusiones del mismo.
- **El Capítulo 7**, presenta las conclusiones más relevantes del proyecto de investigación. Al mismo tiempo se exponen el futuro trabajo.

- **Anexos**, presentan información adicional relevante al trabajo de tesis. A continuación se listan los Anexos considerados en este reporte:

Anexo-A: Accidentes en estructuras de plataformas marinas

Anexo-B: Sistemas y sistemas complejos

Anexo-C: Método de rigideces

Anexo-D: Esfuerzos térmicos, deformación plástica y fatiga

Anexo-E: Método de elemento finito (MEF)

Anexo-F: Resultados adicionales sobre esfuerzos críticos

Anexo-G: Resultados adicionales sobre deformación plástica

Anexo-H: Resultados adicionales sobre deformación térmica

Anexo-I: Resultados en base a la teoría de sistemas complejos

Anexo-J: Inspección no destructiva

Anexo-K: Ejemplos fotográficas de inspección estructural en plataformas marinas.

Anexo-L: Productos del proyecto de investigación

1.7 Productos de investigación

Los productos de investigación derivados de este proyecto se listan a continuación (ver Anexo-L):

- ☞ **Félix Hernández, J. L.**, Santos Reyes, J. (2011). Artículo aceptado para publicación en una revista indizada (ISI-JCR).
- ☞ **José Lourdes Félix Hernández,** Rafael A. Corona y Jaime Reynaldo Santos Reyes. (2010). Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas, *Ingeniería estructural*, vol. 43, 44-53.
- ☞ **José Lourdes Félix Hernández,** Jaime R. Santos Reyes y Ma. Zonia Tapia García. (2010). Deformación elástica, plástica y térmica (EPT) en nodos tubulares estructurales. *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.
- ☞ **Félix, J. L.,** Alvarado, R., Santos, J. (2009). Plastic and elastic deformation analysis of structural joints of offshore platforms. *Proc of the XVIII International Materials Research Congress (IMRC 2009)*, 16-20 August, 2009, Cancún, México.
- ☞ **Félix Hernández, J. L.** y Santos Reyes, J. R. (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, ISBN: 978-84-692-8516-9.
- ☞ **J. L. Félix Hernández,** J. Santos Reyes. (2008). "Stress assessment of the structural elements of the ku-maloob-zaap offshore platform". *Proceedings of the XVII International Materials Research Congress (IMRC 2008)*, August 17 -21, 2008, Cancun, México

- ☞ **José Lourdes Félix Hernández** 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.)*, Noviembre 7 y 8, 2008, Veracruz, Ver.

1.8 Conclusiones del Capítulo

El Capítulo ha expuesto la problemática que se aborda en el presente proyecto de tesis. También se expone la justificación de la metodología empleada así como las principales conclusiones del proyecto de tesis. Finalmente, los principales productos de investigación son expuestos lo cual indica que el proyecto ha cumplido con los objetivos planteados.

La revisión de la literatura se detalla en el siguiente Capítulo 2.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

En resumen, el presente capítulo contiene una presentación de la revisión de literatura concerniente a conceptos básicos sobre la teoría estructural, seguridad e integridad estructural, así como investigación relevante a las mismas. La Figura 2.1 resume el contenido del Capítulo. En la sección 2.1, el capítulo comienza con una breve descripción de la importancia del petróleo. La sección 2.2 presenta una introducción a los conceptos de la teoría general de sistemas (en el Anexo-B se presentan más detalles de los mismos). Se introduce también la teoría sobre investigación de operaciones (IOs), la cual es relevante en este proyecto de tesis, y ésta se expone muy brevemente en la sección 2.3. Los conceptos básicos de la teoría de estructuras se presenta en la sección 2.4. Una introducción al área de seguridad estructural se presenta en la sección 2.5. La sección 2.6. presenta una descripción de algunos trabajos de investigación sobre diferentes aspectos de seguridad estructural con aplicación a plataformas marinas que se han publicado en la literatura. Una breve introducción sobre las técnicas de integridad estructural (IE) se presenta en la sección 2.7. Finalmente, la sección 2.8 presenta las conclusiones más relevantes de la revisión de la literatura.

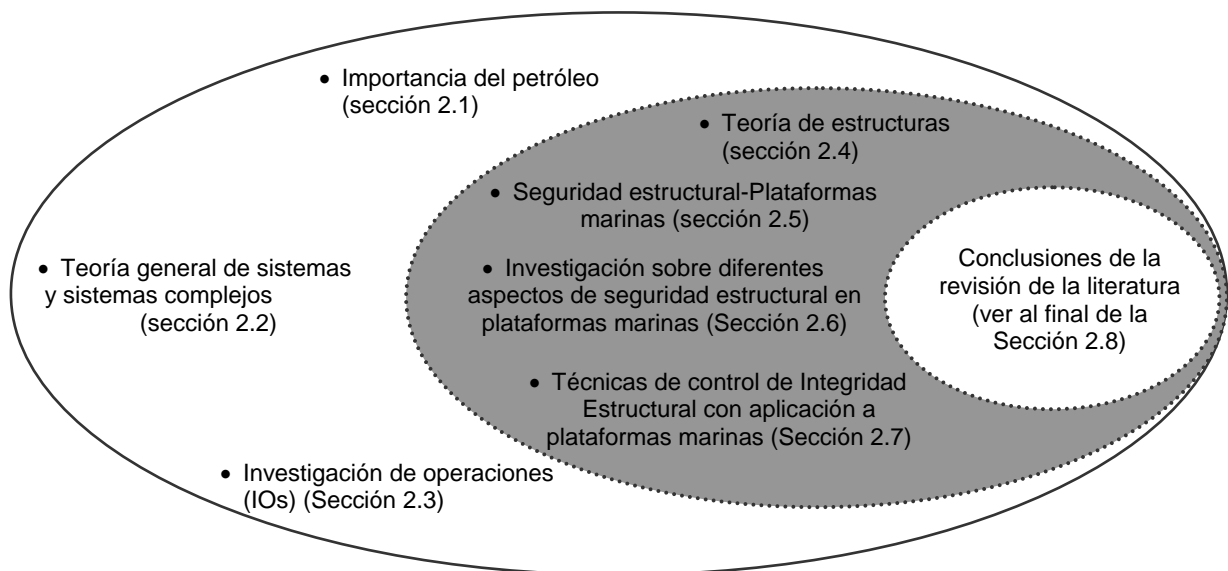


Figura 2.1. Modelo conceptual de la revisión de la literatura.

2.1 La importancia del petróleo

El petróleo es la fuente de energía más importante de la sociedad en la actualidad y de una u otra de sus muchas formas lo usamos cada día de nuestras vidas. La importancia del petróleo no ha dejado de crecer desde sus primeras aplicaciones industriales a mediados del siglo XIX, y ha sido el responsable de conflictos bélicos en algunas partes del mundo como por ejemplo en el Medio Oriente. El petróleo y su gama casi infinita de productos derivados

le convierten en uno de los factores más importantes del desarrollo económico y social en todo el mundo. Dada la alta dependencia que el mundo tiene del petróleo, la inestabilidad que caracteriza al mercado internacional y las fluctuaciones de los precios de este producto, han llevado a que se investiguen energías alternativas, aunque hasta ahora no se ha logrado una opción que realmente lo sustituya. (Kraus, 1998). A continuación se listan algunos puntos importantes de la importancia del petróleo.

- a) El petróleo y su gama casi infinita de productos derivados le convierten en uno de los factores más importantes del desarrollo económico y social en todo el mundo.
- b) El petróleo y las decisiones estratégicas que sobre él se toman por los países productores influyen en casi todos los componentes de coste de una gran parte de los productos que consumimos. Cuando sube el precio del petróleo se produce una subida de los costos, de forma más o menos inmediata, en casi todos los sectores productivos y, en consecuencia, se nota en los precios de los bienes de consumo.
- c) La extracción y producción de petróleo está en manos de unos pocos países productores y es controlada por la OPEP (Organización de Países Exportadores de Petróleo), quienes con sus decisiones influyen en los distintos mercados en los que se fijan los precios mínimos del crudo.
- d) Por todo ello, es muy importante el impacto del petróleo en la economía mundial y en las de los diferentes países que dependen en gran medida de esta materia prima.

Normalmente se publican una serie de estadísticas de las reservas mundiales de petróleo []. Por ejemplo, un reporte de la BP (British Petroleum, por sus siglas en inglés), informó que a finales del 2009, las reservas mundiales probadas de petróleo ascendieron a 1333.1 miles de millones de petróleo. De acuerdo a las estadísticas, destaca que, por ejemplo, que Arabia Saudita, posee el 56.6% de las reservas mundiales. El 77.2 % los acumulan los países pertenecientes a los países miembros de la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP). (BP-SRWE, 2010).

2.2 Teoría General de Sistemas (TGS) y Sistemas complejos

2.2.1 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 cree 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 Wilhelm Leibniz, Immanuel Kant, Etienne Bonnot de Condillac, Augusto Comte y Pepper Stephen Coburn.

Ha habido una gran cantidad de libros y artículos publicados acerca de los orígenes, conceptos y desarrollo de la ciencia de sistemas (Emery, 1981; Bertalanffy, 1981; Forrester, 1961; Kim, 1993; Flood, 2001; Checkland, 1981; Checkland y Scholes, 1990; Blanchard, 1995; Gigch, 1997, entre otros.). Por ejemplo, el concepto de "sistema abierto", el cual fue definido como sistema que intercambia materia con el medio circundante, que exhibe importación y exportación, constitución y degradación de sus componentes materiales. Dicho concepto de "sistema abierto" fue acuñado en el primer tercio de este siglo por el biólogo Ludwig von Bertalanffy (1981), 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.

El Anexo-B presenta información adicional sobre diferentes conceptos que han sido desarrollado a través de los años.

2.2.2 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 (ver por ejemplo, Reynoso, 1998; Laszlo, 2003; entre otros). 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 auto-organizativa. 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. (Ver por ejemplo, Reynoso, 1998; Laszlo, 2003; Maldonado, 2003, entre otros.).

El concepto de "fractales" fue introducido en 1986, Mandelbrot (1997), quien propuso la siguiente definición al conjunto fractal: "un conjunto en que las partes son similares al total, en algún sentido". Una gran cantidad de publicaciones existen en la literatura concernientes a la gama de aplicaciones que ha tenido la aplicación de la teoría fractal a diferentes aplicaciones. El Anexo-B presenta información adicional de la teoría fractal. (Ver Anexo-B).

2.3 Investigación de operaciones (IOs)

Otro de los conceptos importantes que incorporan el concepto de sistemas (y que es de relevancia en el presente proyecto de investigación) es el área concerniente a la Investigación de Operaciones (IOs) (Churchman, et al., 1957; Churchman, 1992; Ackoff y Sasieni, 1975). La actividad conocida como IOs se cree que tiene sus orígenes mucho antes de la Revolución Industrial. Por otro lado, cuando la máquina substituyó al hombre como fuente de energía así como un desarrollo considerable en los sistemas de comunicación le dieron un gran impulso a la industria, que comenzó a crecer a hasta alcanzar el grado de avance que conocemos en nuestros días. Una gran variedad de definiciones se han presentado para la IOs; sin embargo, Ackoff y Sasieni (1975), por ejemplo, han propuesto que la IOs se le puede considerar como: a) la aplicación del método científico; b) por equipos interdisciplinarios; y c) a problemas que comprenden el control de sistemas organizados hombre-máquina, para dar soluciones que sirvan mejora los propósitos de la organización *como un todo*. Los detalles de la IOs se presentan en el Capítulo 3.

2.4 Teoría de Estructuras-Conceptos básicos

Esta sección presenta a detalles algunos conceptos básicos sobre la teoría estructural. La sección puede ser considerada como la base teórica en la cual se basa este trabajo de tesis.

2.4.1 Antecedentes

La estructura puede comprenderse como un subsistema dentro del sistema principal constituido por la obra global. Su función es absorber solicitaciones (Carga muerta y cargas vivas) que se derivan del buen funcionamiento de la construcción (Nilson, 2001). 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].

En el diseño de las estructuras se toman muchas consideraciones, entre las cuales los objetivos principales que se deben lograr (Sieh, 1986):

- 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.
- 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.

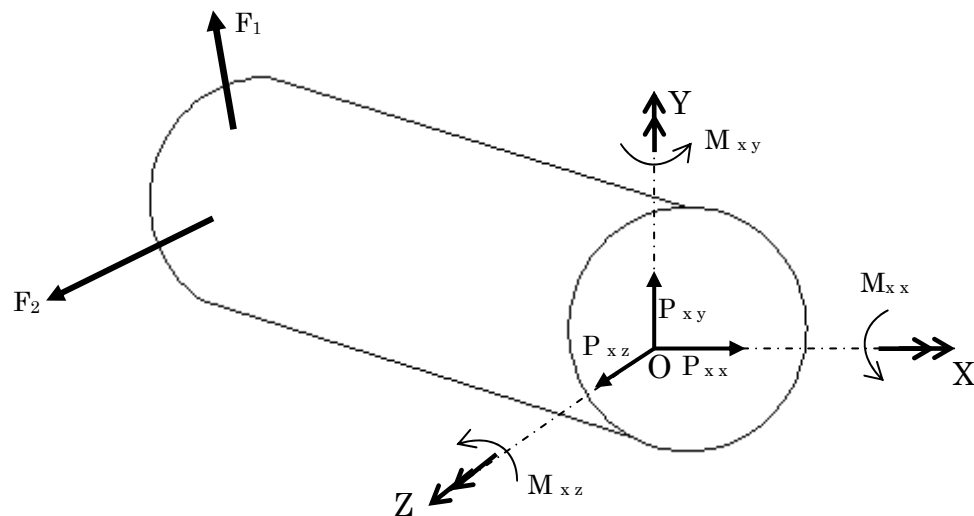


Figura 2.2. Componentes de Fuerzas internas. (Pytel y Singer, 1987).

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 (Fig. 2.2).

2.4.2 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 2.3, se muestra tal cambio de forma estructural.

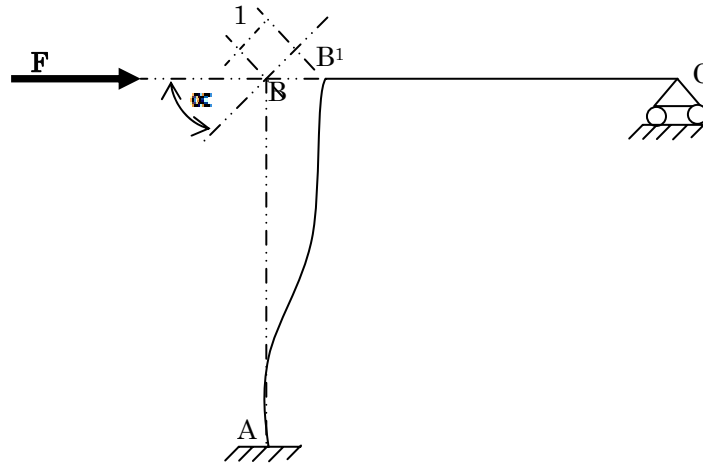


Figura 2.3. Deformación axial. (Gere, 2002).

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 (Gere, 2002). 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.

2.4.3 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).

2.4.3.1 Estados de tensiones y deformaciones

El análisis estructural de un elemento (ver, Figura 2.3) nos permite determinar su respuesta estructural cuando esta se ve afectada a las diferentes acciones, durante su vida útil. 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. (McCormac, 1996; Ruiz y Diaz, 2003).

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 σ está relacionada con la fuerza P mediante la siguiente ecuación y en donde es el área de la sección del material, ver la Figura 2.4 (Mckenzie, 2006).

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Esta sección, debido al esfuerzo, se alarga. A este alargamiento se le nombra unitario ε en el sentido longitudinal. Generando aumento en la fuerza P y llevando los valores σ y ε a un grafico, en donde sus ordenadas miden en tensión (σ) y el de las abscisas deformaciones unitarias (ε), como se muestra en la Figura 2.5.

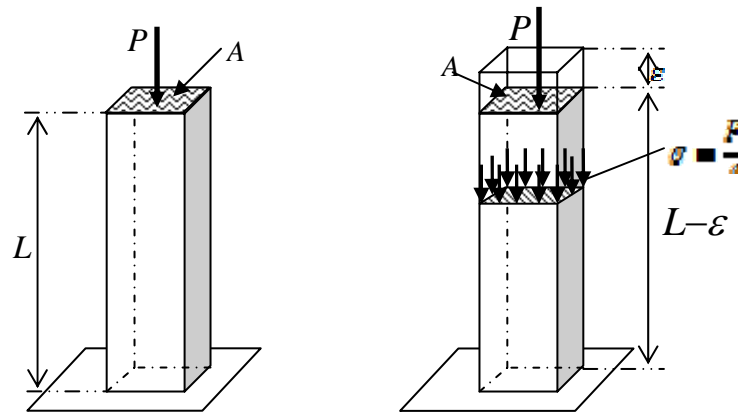


Figura 2.4. Esfuerzo interno. (Mckenzie, 2006).

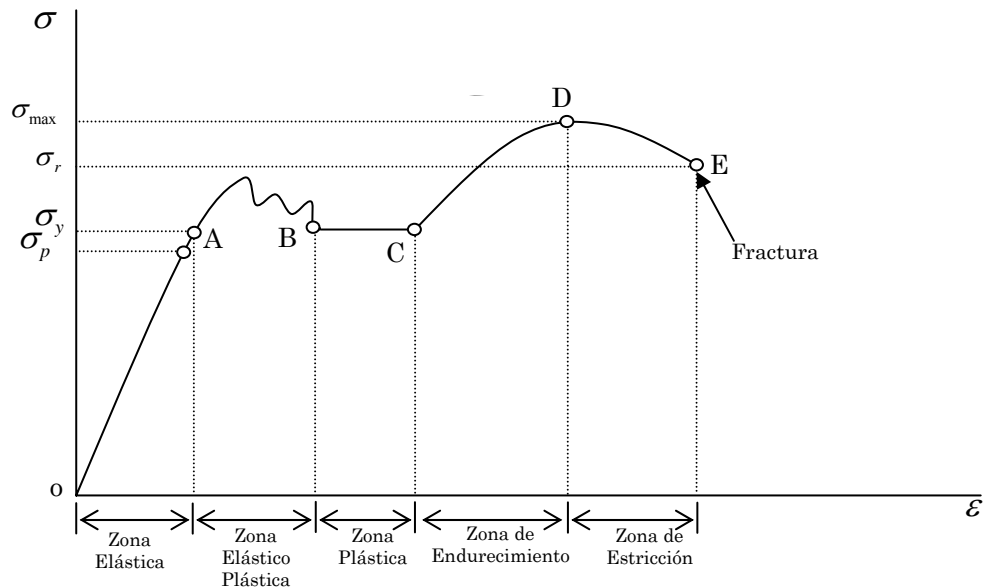


Figura 2.5. Diagrama de tensión y deformación para el acero dulce. (Strelkov, 1978).

Siendo así, que, para esfuerzos pequeños la tensión σ y la deformación ε 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), del dominio de $0-\sigma_p$ existe proporcionalidad con la deformaciones unitarias (Strelkov, 1978), 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.

2.4.3.2 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 Δ 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) .

$$u = \begin{Bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{Bmatrix} \quad \Delta = \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \dots \\ \Delta_N \end{Bmatrix} \quad (2.2)$$

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

$$\varepsilon = [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]^T \quad (2.3)$$

Donde

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \end{aligned} \quad (2.4)$$

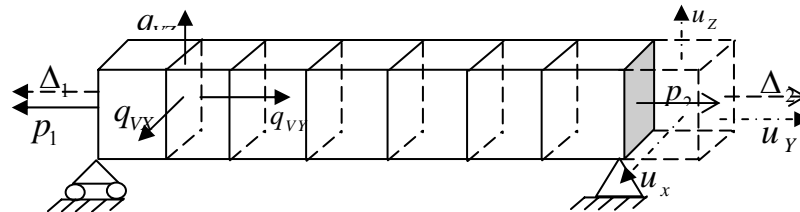


Figura 2.6. Fuerzas distribuidas sobre el volumen. (Torres, et al., 2004).

2.4.3.3 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:

$$U = \int_v U_0 dV \quad (2.5)$$

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 2.7, del cual se obtiene la siguiente ecuación.

$$U_0 = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon \quad (2.6)$$

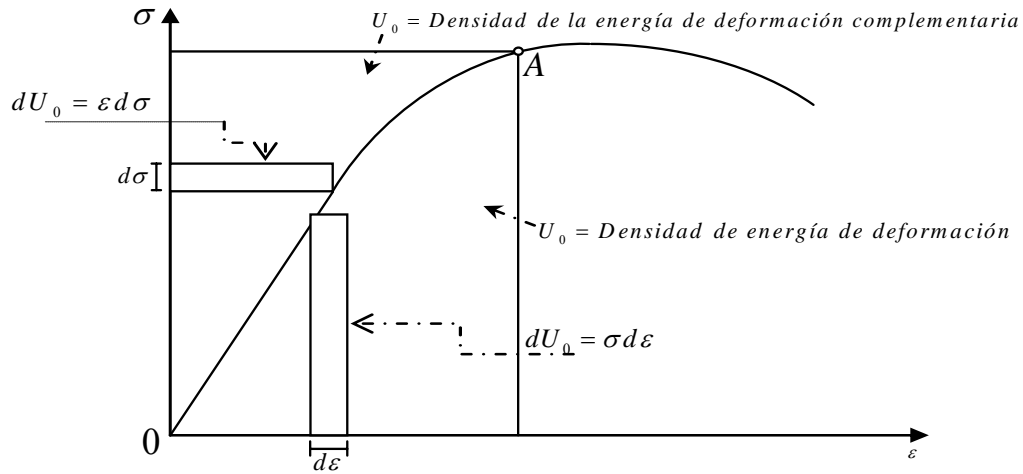


Figura 2.7. Densidad de energía. (Vable, 2003).

El módulo 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.

2.4.3.4 Ecuaciones diferenciales de equilibrio

Si un cuerpo se encuentra en estado de equilibrio, cada punto de él debe estar en equilibrio. Las ecuaciones de equilibrio se obtienen haciendo la sumatoria de las fuerzas en las direcciones x_1 , x_2 y x_3 iguales a cero ya que el punto O está en equilibrio, obteniéndose las ecuaciones (Feodosiev, 1997).

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{21}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{31}}{\partial x_3} + b_1 &= 0 \\
\frac{\partial \sigma_{12}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{22}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{32}}{\partial x_3} + b_2 &= 0 \\
\frac{\partial \sigma_{13}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{23}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial x_3} + b_3 &= 0
\end{aligned} \tag{2.7}$$

Y del tensor de deformaciones es:

$$\varepsilon^t = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6\} = \{\varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{33}, \gamma_{23}, \gamma_{31}, \gamma_{12}\} \tag{2.8}$$

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.

2.4.3.5 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 ν . 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 (Feodosiev, 1997; Pfeiffer y Kulak, 1999). 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:

$$\{\sigma\} = [C]\{\varepsilon\} \tag{2.9}$$

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

$$\{\varepsilon\} = [C]\{\sigma\} \tag{2.10}$$

De forma explícita es:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E & -\nu/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & 1/E & -\nu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\nu/E & -\nu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.11)$$

O bien, invirtiendo ha C , se obtiene:

$$\{\sigma\} = [C]^{-1} \{\varepsilon\} \quad (2.12)$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & \nu E/(1+\nu)(1-2\nu) & (1-\nu)E/(1+\nu)(1-2\nu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} \quad (2.13)$$

Ver ejemplo de aplicación de deformación en el Anexo-C.

2.4.4 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.

2.4.4.1 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. El análisis estructural como el diseño, requieren de la determinación de esfuerzos y deformaciones. El esfuerzo se define como la fuerza por unidad de área. En la Figura 2.8, se puede observar una fuerza externa p actuando sobre el sólido.

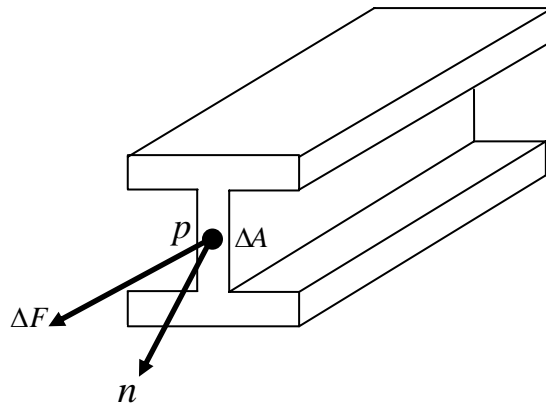


Figura 2.8. Esfuerzos en un punto. (Pov, 1996).

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. 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. Así mismo la fuerza necesaria para causar la fractura se le denomina carga última, ver Figura 2.5. 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. Además uno puede asumir que la deformación plástica ocurre cuando el máximo esfuerzo cortante alcanza un cierto valor.

2.4.4.2 Esfuerzos axiales en armaduras de plataformas marinas

Las estructuras de plataformas marinas de tipo "Jacket" son estructura formada por perfiles tubulares de acero conectados entre 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.

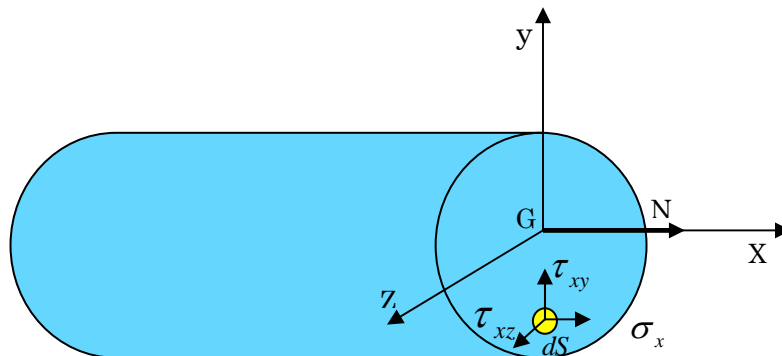


Figura 2.9. Esfuerzo axial. (Ruiz y Díaz, 2003).

$$\begin{aligned}
N &= \int_S \sigma_x dS; \quad T_y = \int_S \tau_{xy} dS = 0; \quad T_z = \int_S \tau_{xz} dS = 0 \\
M_t &= \int_S (\tau_{xz} y - \tau_{xy} z) dS \\
M_y &= \int_S \sigma_x z dS = 0; \quad M_z = -\int_S \sigma_x y dS = 0
\end{aligned} \tag{2.14}$$

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 2.9, 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.

2.4.4.3 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. (Hartmann y Katz, 2007).

$$\begin{aligned}
\sigma_{xx}(x, y) &= \frac{E}{ab(-1 + \nu^2)} [b(u_1 - u_3) + av(u_2 - u_8) + xv(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8) + (-u_1 + u_3 - u_5 + u_7)] \\
\sigma_{yy}(x, y) &= \frac{E}{ab(-1 + \nu^2)} [bv(u_1 - u_3) + a(u_2 - u_8) + x(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8) + yv(-u_1 + u_3 - u_5 + u_7)] \\
\sigma_{xy}(x, y) &= \frac{E}{2ab(1 + \nu)} [b(u_2 - u_4) + a(u_1 - u_7) + x(-u_1 + u_3 - u_5 + u_7) + y(-u_2 + u_4 - u_6 + u_8)]
\end{aligned} \tag{2.15}$$

2.4.4.4 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 2.10.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{(L/r)^2} \tag{2.16}$$

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 σ_{cr} es el esfuerzo critico, de acuerdo a la siguiente ecuación.

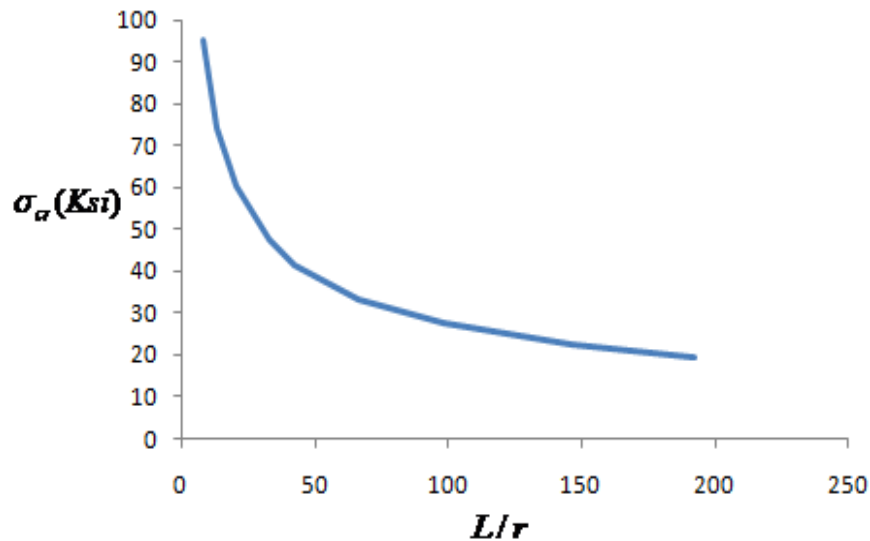


Figura 2.10. Gráfica de la curva de Euler. (Shanly, 1971).

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

$$\sigma_{cr} = \frac{K_c E}{D/t} \quad (2.17)$$

Donde D/t es la relación diámetro-espesor. La constante K_c tiene un valor teórico 1.2 (Askeland y Phole, 2004).

2.4.4.5 Esfuerzos residuales

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.

2.4.4.6 Esfuerzos críticos en cilindros a compresión

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

$$N_x = \frac{P}{2\pi r}, \quad N_{x\theta} = N_\theta = 0 \quad (2.18)$$

La introducción de estos valores en la ecuación 2.26

$$\nabla_w^8 = \frac{\nabla^4}{D} \left(N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{2}{r} N_{x\theta} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial \theta^2} + \frac{1}{r^2} N_\theta \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \right) - \frac{Et}{Dr^2} \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} \quad (2.19)$$

da como resultado

$$D\nabla^8 w + \frac{Et}{r^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^4} + \frac{P}{2\pi r} \nabla^4 \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = 0 \quad (2.20)$$

La solución de la ecuación (2.19) toma la forma de

$$w = \delta \left(\frac{\sin m\pi x}{L} \right) \sin n\theta \quad (2.21)$$

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 (σ_{cr}).

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{L} \right)^2 \left[\frac{m^2 + \bar{n}^2}{m^2} + \frac{12z^2}{\pi^4} \frac{m^2}{(m^2 + \bar{n}^2)^2} \right] \quad (2.22)$$

Donde z es el parámetro de Batdorf (Ferreira y Soares, 2004).

$$Z = \frac{L^2}{rt} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad (2.23)$$

y

$$\bar{n} = \frac{nL}{\pi r} \quad (2.24)$$

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 (2.23) con respecto a

$$\left(\frac{m^2 + \bar{n}^2}{m} \right)^2 \quad (2.25)$$

Entonces,

$$\left(\frac{m^2 + \bar{n}^2}{m} \right)^2 = \frac{2\sqrt{3}}{\pi^2} Z \quad (2.26)$$

de la cual (2.22) se obtiene el esfuerzo crítico

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{12} \left(\frac{t}{L} \right)^2 \frac{4\sqrt{3} L^2}{\pi^2 r t} \sqrt{(1-\nu^2)} \quad (2.27)$$

Resolviendo la ecuación (2.25), se tiene que la ecuación del esfuerzo crítico (el cual ha sido mostrado para un cilindro razonablemente largo ($L/R > 1$)) está dada por Charles (1962).

$$\sigma_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} E \frac{t}{r} \quad (2.28)$$

Para el módulo de Poisson ν del acero es de 0.3, por lo que sustituyendo el valor en la ecuación (2.28), se tiene que el esfuerzo crítico es

$$\sigma_{cr} = 0.6 E \frac{t}{r} \quad (2.29)$$

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

$$\sigma_{cr} = 2(0.6) E \frac{t}{D} = 1.2 \frac{Et}{D} \quad (2.30)$$

A partir de la ecuación de Donnell (ecuación (2.30) del esfuerzo crítico).

2.4.5 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. (Chakrabarty, 2006).

2.4.5.1 Esfuerzo plástico

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. La deformación plástica es descrita por la ecuación de Hollomon, en el comportamiento plástico de un acero al carbón, la ecuación es:

$$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^m \quad (2.31)$$

Donde σ es el esfuerzo real; σ_0 y m son el coeficiente y el exponente de endurecimiento por deformación de Hollomon, respectivamente; y ε es la deformación real. Las variables σ y ε , definen a cada uno de los puntos de la curva esfuerzo deformación real del material. El coeficiente σ_0 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:

$$\varepsilon^p = \varepsilon - \frac{\sigma_c}{E} \quad (2.32)$$

Donde ε^p , representa la deformación plástica, ε la deformación elástica, σ_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. (Navarro y Madrigal, 2009).

Tal material podría tener una curva similar a la primera etiqueta *I* de la Figura 2.11. 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.

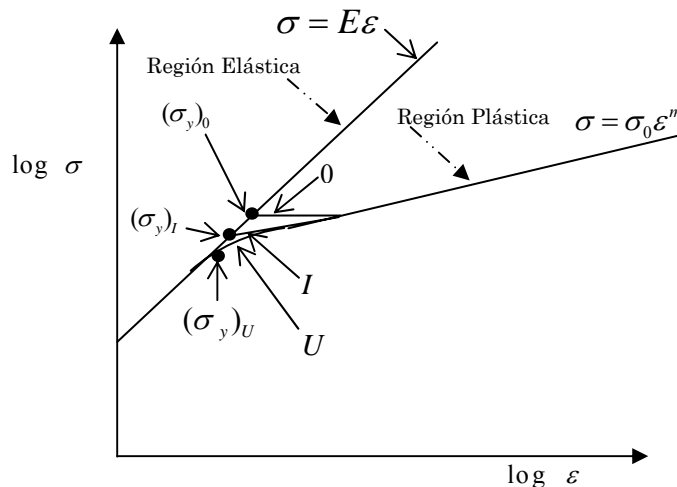


Figura 2.11. Representación esquemática de los tres tipos de curvas de esfuerzos. (Navarro y Madrigal, 2009).

2.4.5.2 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 (API, 2004; Sekulovic y Danilovic, 2004). 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, como se ve en la Figura 2.12, el esfuerzo por tensión aunado a los parámetros geométricos del nodo estructural K-T. (Bea y Young, 1993; Murphy, et al., 2004).

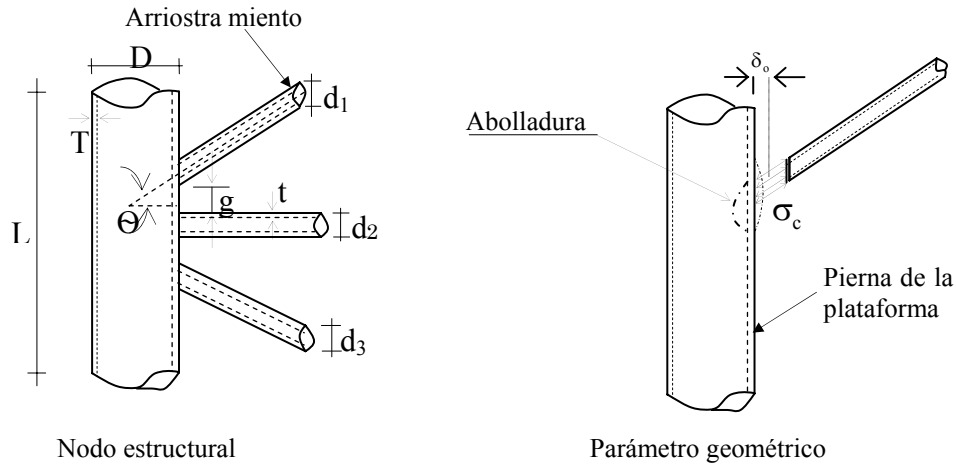


Figura 2.12. Junta estructural tipo K-T. (Bea y Young, 1993; Murphy, et al., 2004).

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.

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3D} \quad (2.33)$$

$$\tau = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{T} \quad (2.34)$$

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

$$g \geq t_1 + t_2 + t_3 \quad (2.35)$$

Los esfuerzos se obtienen de:

$$\sigma_{yy} = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2} \quad \sigma_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y} \quad \sigma_{xx} = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} \quad (2.36)$$

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

$$\frac{1}{R} = \frac{4(1-\nu^2)\sigma_c}{\pi E \beta} \quad (2.37)$$

$$\sigma_c = \frac{\pi E \beta}{\frac{D}{2} 4(1-\nu^2)} \quad (2.38)$$

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

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

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

$$\varepsilon^p = \frac{\Delta \sigma_c}{E} \left(\frac{t^2}{2} \right) - \frac{\frac{\pi E \beta}{\frac{D}{2}(1-\nu^2)}}{E} \quad (2.40)$$

2.4.6 Esfuerzo térmicos

Cuando un material se somete a cierta temperatura 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 (Shanley, 1971).

El Anexo-D, presenta más detalles de conceptos básicos sobre esfuerzos térmicos, deformación plástica y fatiga.

2.5 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 micro-defectos 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 (ver Anexo-D). 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. La relación 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. 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:

- 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.

$$R_a = \frac{R_n}{f_s} \quad (2.41)$$

Donde:

R_a = Resistencia Permisible 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,

$$R_a \geq R \quad (2.42)$$

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:

$$\phi R_n \geq \sum \gamma_i Q_i \quad (2.43)$$

Donde:

R_n = Resistencia nominal

Q_i = Efectos de carga

ϕ = Factor de resistencia correspondiente a R_n

γ_i = Factor de carga correspondiente a Q_i

ϕR_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 ϕ 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 γ_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 (Bowels, 1993; Álvarez, et al., 2005; Maranto, 2004). 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. (Mather, 1995; Maon y Keppel, 2004).

2.6 Investigación sobre diferentes aspectos de seguridad estructural en plataformas marinas

Una gran cantidad de artículos han sido publicados en cuanto a diferentes aspectos relacionados con la seguridad estructural de plataformas marinas; por ejemplo, aspectos diversos relacionados con la confiabilidad de todo tipo de estructuras de plataformas marinas (Lanning y Shen, 2000; Di Paola y Failla, 2003; Melchers, 2003; Tello, et al., 2003; Raizer, 2000; Tromans, et al., 1993; Hai-Haoung y Soares, 2003; Jardine, et al., 1996; Chandrasekaran, et al., 2007, Liaw y Zheng, 2003; Light, et al., 1995; Cole, et al., 2003; Bea, 1993; Bea, et al., 1997, 2001; Chryssanthopoulos, et al., 1986, 1987; Teigen y Naess, 2003; Holzar, 1985; Ronalds, et al., 2003; Hobbs, 1993; NGI, 1994; Cassidy, et al., 2003; 1994; MSL, 1995; Garbatov y Soares, 2002; Mortazavi y Bea, 1996; Thandavomoorthy, 2000; API, 1993; Dawson, 1993; Astley, 1992; Cornel, 1994; Barltrop, et al., 1993; Moan y Song, 2000; Gupta, et al., 2007; Chakrabarti, 2002; entre muchos otros.).

Por ejemplo, Moan y Song (2000), han investigado la confiabilidad de estructuras de plataformas marinas del Mar del Norte, considerando los efectos de 'oleaje'. De manera similar, Chandrasekaran, et al., (2007), ha investigado los coeficiente cinemáticos (C_d y C_m) en aguas profundas en condiciones de tormentas cuando los pilotes de las plataformas se encuentran sometidas a tensión (la investigación consideró una plataforma marina tipo trípode). Por otro lado, Gupta, et al., (2007), se enfocaron al estudio del daño por fatiga en la parte del ensamble de una plataforma, tomaron en consideración que estas plataformas son usadas para la explotación y extracción de hidrocarburos y además son estructuras móviles. Investigación sobre los efectos termales en las estructuras de plataformas, también ha sido reportado en la literatura; por ejemplo, Raizer (2000), ha propuesto un método para la determinación óptima de intervalos entre juntas termales; el autor realizó el estudio bajo un análisis probabilístico. Del mismo modo, Tello, et al., (2003), se ha enfocado 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. De manera similar, Melchers (2003), hace hincapié sobre la evaluación de la teoría de confiabilidad de sistemas estructurales costa fuera considerando el tiempo de deterioro de reducción de los esfuerzos estructurales en la aplicación de cargas múltiples.

Otros investigadores, como Ronalds [17], ha reportado su investigación relacionado con la confiabilidad del cajón estructural de una plataforma tipo monopod, considerando falla por momento flexionante y el de pandeo local; el estudio es llevado a cabo considerando el escenario de un severo ciclón tropical. Los resultados muestran que la falla se presenta debajo de la zona espesada de picaduras y esto es debido a la corrosión. Los autores reportan que el exponente de la altura de la ola varía 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. Ronalds, et al., [23], se enfoca 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.

Cassidy, et al., (2003), argumentan que la mayoría de la investigación llevada a cabo en materia de análisis estructural del "Jackup" de las plataformas marinas, usan modelos determinísticos 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 desde una perspectiva probabilística. En general, el autor argumenta que un 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.

Cole, et al., (2003), reportan resultados de su investigación relacionado con el esfuerzo y la fatiga para el caso de un una plataforma tipo "monopod" (estructura que consta de una sola pierna) costa afuera. El estudio considera dicha estructura bajo condiciones de aguas superficiales sujetos a fuerzas típicas de oleajes, del norte-oeste de Australia. El estudio reporta la probabilidad de falla por fatiga debido a la sobrecarga de tormenta, los riesgos más altos de falla se reportan como aquellos causados por corrosión. Tuty, et. al., (2002), por otro lado, realizan una investigación considerando 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); dicho estudio uso la teoría no lineal de ola para predecir la onda cinética en condiciones superficiales de agua. Para esto, los autores llevan a cabo una comparación de las siguientes teorías de onda: la teoría regular de la función de la corriente, la teoría de onda de senoidal, la teoría de Stokes, la teoría de Nueva Ola, etc. Otros autores (Bea, et al., 2001), estudian las alturas extremas de la cresta de la ola en condiciones de tormenta durante huracanes y en especial énfasis el efecto de los mismos en las cubiertas inferiores de las plataformas. Los autores presentan los resultados de un estudio de prueba del laboratorio y el desempeño de plataformas en el golfo de México que hayan sobrevivido y fallado durante las cargas de oleaje debidas a huracanes en sus cubiertas. Las modificaciones para las líneas directivas de fuerza de la ola de la cubierta en el API (American Petroleum Institute, por sus siglas en inglés) son discutidas y validadas con datos de prueba del laboratorio y desempeño del campo de la plataforma durante huracanes.

Teigen y Naess (2003), evalúan la respuesta de estructuras costa fuera tipo flotantes en aguas profundas, sujetas a cargas estocásticas del viento y de olas concurrentes. Además, los autores asocian a estas cargas con corrientes del océano, así mismo, toman 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. Las soluciones numéricas son presentadas para una gran variedad de parámetros, de tiempo y ambientales siendo un problema mayor del diseño de estructuras costa fuera en el de evaluar su respuesta máxima bajo condiciones ambientales extremas.

Hai-Houng y Soares (2003), 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); los

autores 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. Por otro lado, Garbatov y Soares (2002), presentan 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 la fractura. Dichos factores de riesgos 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. Los autores argumentan que los resultados de su investigación, pueden ser utilizados para actualizar la planificación de la conservación y estimaciones de confiabilidad de dichas estructuras.

Di Paola y Failla (2003), presentan un estudio estadístico 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 lineal, reemplazando la fuerza de Morrison por una función polinómica cubica de la velocidad liquida relativa de la estructura. Los autores tomaron en consideración la expansión de la serie de Voltarre con representación finita de la serie de Fourier para la aproximación de respuesta de sistema equivalente; de este modo, expresaron los coeficientes de Fourier del primer, segundo y tercer orden de respuesta estadística hasta el sexto orden para ser promediada de forma Gaussiana. Liaw y Zheng (2003), 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 costa fuera fijas, estas consideraciones les son útiles para la representación de la serie de Volterra ante fuerzas no lineales de ola.

Lanning y Shen (2000), reportan su investigación sobre las juntas soldadas, siendo esta zonas concerniente 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. Los autores 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. De tal modo, que los autores proponen un modelo 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, el cual varía frente al de la grieta. Lo anterior contribuye, según los autores, al 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.

Thandavamoorthy (2000), lleva a cabo una investigación experimental y numérica en la junta tubular, las cuales son puestas en tres anillos anulares para el estudio de sus esfuerzos bajo carga axial de compresión, aplicando el Método del Elemento Finito (MEF). De esta manera, el autor argumenta que puede predecir las deformaciones de las juntas que por contraste el ovalamiento y abolladuras al tomar en cuenta las características del endurecimiento del material. Chakrabarti (2002), por otro lado, realiza un 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 e impulso, teniendo en cuenta la inestabilidad en las oscilaciones de las torres así como las líneas flojas de amarre. Dicho análisis se realiza con tres categorías de fuerzas: vientos, corriente y olas, siendo estas no lineales; las olas pueden ser de frecuencias solas o compuestas de frecuencias múltiples. Según el autor, 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.

También ha habido una considerable investigación en diferentes aspectos relacionados con la cimentación, seguridad, confiabilidad, así como análisis estructural de plataformas fijas tipo "Jack-up", como el caso de estudio. Ver por ejemplo: Hambly y Nicholson (1991); Karunakaran, et al., (1992); Baker y Ramachandran (1981); Spidsøe y Karunakaran (1993); Barltrop y Adams (1991); Kassimali (1983); Bennett y Sharples (1987); Boon, et al., (1997); Bradshaw (1987); Brekke, et al., (1990); Grenda (1986); Carlsen, et al., (1986); Carter (1982); Daghigh, et al., (1997); Elzinga, y Tromans (1992); Forristall, et al., (1991); Frieze, et al., (1995); Gottardi y Butterfield (1993,1995); Hambly, et al., (1990); Harland, et al., (1997); Houlsby y Martin (1992); Hoyle (1992); Karunakaran, et al., (1994); Lade (1977); Nadim y Lacasse (1992); Nielsen, et al., (1994); Norris y Aldridge (1992); Puskar, et al., (1994); Reardon (1986); Rodenbusch (1986); Schotman (1989); Sharples, et al., (1989); Sigurdsson, et al., (1994); SNAME (1994); Stiff, et al., (1997); Stokes (1847); Vesic (1975); Young, et al., (1984); entre otros.

2.7 Técnicas de monitoreo de integridad estructural (IE)

El tema de integridad estructural es de gran importancia en la industria del petróleo, debido a que las instalaciones petroleras costa fuera se encuentran sometidas, entre otros factores, a ambientes altamente corrosivos. Además, estructuras como plataformas marinas están llegando o han excedido su vida de diseño original y esto plantea nuevos desafíos para la gestión de la integridad estructural (IE) de las mismas.

En la revisión de la literatura se ha encontrada una cantidad considerable de publicaciones al respecto (ISO, 1996, 2001, 2002, 2005, 2005, 2007; Stacey, et. al., 2002; DNV, 1991, 2000, 2003, 2007; ABS, 2003; API, 1974, 1991, 1993, 1997, 2000, 2007; NORSOK, 1997, 1998, entre otros). Sin embargo, los detalles del diagnóstico llevado a cabo de las técnicas existentes y su posible aplicación a plataformas marinas se presentan a detalle en el Capítulo 6.

2.8 Conclusiones del Capítulo

El presente Capítulo presentó una revisión de la literatura de los diferentes conceptos concernientes a la TGS, teoría de estructuras, entre otros. Lo anterior constituye la base teórica para el desarrollo de este proyecto de tesis. Además, se presentó también, el estado del arte de investigaciones que se han realizado en diferentes áreas concernientes a la seguridad estructural de plataformas marinas de producción de petróleo.

A continuación se listan las conclusiones más relevantes de la revisión:

- 1. La industria del petróleo es de gran relevancia para las economías de los países productores de los mismos (incluyendo nuestro país). Dado esto, no se pueden permitir pérdidas, económicas/instalaciones, etc. por accidentes. Así que es primordial definir estragáis de prevención de fallas; en particular lo concerniente a plataformas marinas;*
- 2. Ha habido una gran cantidad de estudios e investigación publicados en revistas científicas relacionadas con seguridad estructural, integridad estructural, etc. En este sentido, la información publicada ha sido de mucha utilidad para este proyecto de tesis; y*
- 3. La revisión de la literatura concerniente a conceptos de 'sistemas' ha ayudado a identificar a la metodología de IOs, como fundamental para el desarrollo del proyecto. La discusión de dicha metodología en el contexto del proyecto de investigación se presenta en el siguiente Capítulo 3.*

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En general, el presente Capítulo contiene una descripción de la metodología de la investigación de operaciones (IOs), la cual ha sido adoptada para el desarrollo del proyecto de investigación. En la sección 3.1, se presentan los antecedentes de la IOs. Las etapas de la metodología se describen en la sección 3.2. Finalmente, la sección 3.3 presenta las conclusiones más relevantes del Capítulo.

3.1 Antecedentes sobre la Investigación de Operaciones (IOs)

La actividad conocida como Investigación de Operaciones (IOs) se cree que tiene sus orígenes mucho antes de la Revolución Industrial (Churchman, 1972; Churchman, et al., 1957; Ackoff y Sasieni, 1975). Por otro lado, cuando la máquina substituyó al hombre como fuente de energía así como un desarrollo considerable en los sistemas de comunicación le dieron un gran impulso a la industria, que comenzó a crecer a hasta alcanzar el grado de avance que conocemos en nuestros días.

Una gran variedad de definiciones se han presentado para la IOs así como muchas razones por las que no se le puede definir. Sin embargo, Ackoff y Sasieni (1975) han propuesto que la IOs se le puede considerar como: a) la aplicación del método científico; b) solución de problemas por equipos interdisciplinarios; y c) a problemas que comprenden el control de sistemas organizados hombre-máquina, para dar soluciones que sirvan mejora los propósitos de la organización como un "todo" (Ackoff y Sasieni, 1975).

En general, se puede argumentar que se tiene la percepción de que los estudios del *método científico*, se cita a la *experimentación* como algo esencial para llevar a cabo dichos estudios. Sin embargo, la experimentación en el sentido estricto (es decir, manipulación física de las variables) a menudo es imposible en la práctica, cuando se trata, por ejemplo, de organizaciones de tipo gubernamental o industrial. En la industria del petróleo, por ejemplo, un complejo de plataformas marinas de producción de petróleo y gas (ver por ejemplo la plataforma marina de la Fig. 4.5 o bien el complejo mostrado en la Fig. 4.4, en el Capítulo 4) no puede someterse a una *experimentación* de las consecuencias que se pudieran tener, por ejemplo, a una serie de explosiones. Por supuesto, la *experimentación* es posible algunas veces, particularmente a una escala pequeña de ciertos subsistemas del sistema total; por ejemplo, la *experimentación* de los efectos que puede tener un incendio y explosión a los muros divisorios de módulos de compresión. Sin embargo, es muy difícil que un sistema total, como el de nuestro caso de estudio, pueda someterse a una *experimentación*. Por lo consiguiente, en la mayoría de los casos, debe usarse un método de investigación que no implique experimentación sobre el *sistema total*.

Otra de las características de la IOs, es la consideración de "equipos interdisciplinarios" para la solución del problema que se esta investigando (Ackoff y Sasieni, 1975). Esto es, la división del dominio del conocimiento en disciplinas específicas es un fenómeno relativamente reciente, producto del siglo XIX. Hasta fines del siglo XVII, era posible para un hombre aprender y retener todo o casi todo el conocimiento "científico" que había

acumulado la humanidad. Sin embargo, al iniciarse la segunda mitad del siglo pasado, por ejemplo, las ciencias naturales se dividieron en física y química; más tarde comenzó a separarse la biología, y justamente antes de que terminara el siglo, las ciencias sociales ocuparon el lugar que les correspondía. Cada una de estas ciencias, posteriormente, se ha dividido u subdividido. En la actualidad se tienen más de cien disciplinas científicas. (Ackoff y Sasieni, 1975).

Ackoff y Sasieni, (1975) argumentan que la humanidad se ha acostumbrado tanto a clasificar el conocimiento científico conforme a la organización, por ejemplo, departamental de las universidades, que se actúa como si la naturaleza estuviese también estructurada de este modo. No existen cosas tales como problemas físicos, problemas biológicos, problemas psicológicos, problemas económicos, etc. Solamente hay problemas y *las disciplinas científicas representan diferentes maneras de observarlos*. Dado lo anterior, es claro que no es posible incorporarlas todas las disciplinas creadas en cada proyecto de investigación. Pero es muy conveniente tener, en un grupo determinado, especialistas de tantas disciplinas como sea posible, para resolver un problema de investigación.

Finalmente, la orientación de la IOs a *sistemas*, se basa en el hecho de que, los sistemas organizados, el comportamiento de cualquier 'parte', por fin, llega a efectuar algo a todas las demás 'partes' que conforman el *sistema total* (ver sección 2.2 del Capítulo 2, así como el Anexo-B para más detalles de los conceptos teóricos sobre sistemas). No todos los efectos son importantes o susceptibles de detección. Por lo tanto, la esencia de esta orientación estriba en la búsqueda sistemática de interacciones significativas, cuando se evalúan las actividades o políticas de cualquier parte de la organización. A estas alturas, es claro que este enfoque a los problemas de organización es diametralmente opuesto a lo que implica "reducir la magnitud de un problema". Los analistas en IOs casi siempre amplían el concepto inicial del problema que se les presenta, para incluir interacciones que no están incorporadas a la formulación hecha por la administración. Para tratar estos problemas, ampliados y por ende más complicados, se han tenido que desarrollar nuevos métodos de investigación. (Ackoff y Sasieni, 1975).

En resumen, las características esenciales de la IOs presentadas anteriormente son las siguientes: (a) su orientación de sistemas; b) el uso de equipos interdisciplinarios, y c) la aplicación del método científico. Estas características han sido consideradas esenciales para el desarrollo de este proyecto de investigación.

3.2 Metodología de la IOs

Ackoff y Sasieni (1975) argumentan que el objetivo de la IOs no es solamente producir informes, sino mejorar la realización de los sistemas, los resultados de la investigación se deben *poner en ejecución* (si son aceptados por quienes deben tomar decisiones). Según los autores, en este punto se efectúa la última prueba y evaluación de la investigación; por tanto, en esta fase del estudio es donde el investigador tiene la mayor oportunidad para adquirir experiencia.

La metodología de IOs la conforman las siguientes fases o etapas: (ver Fig. 3.1):

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

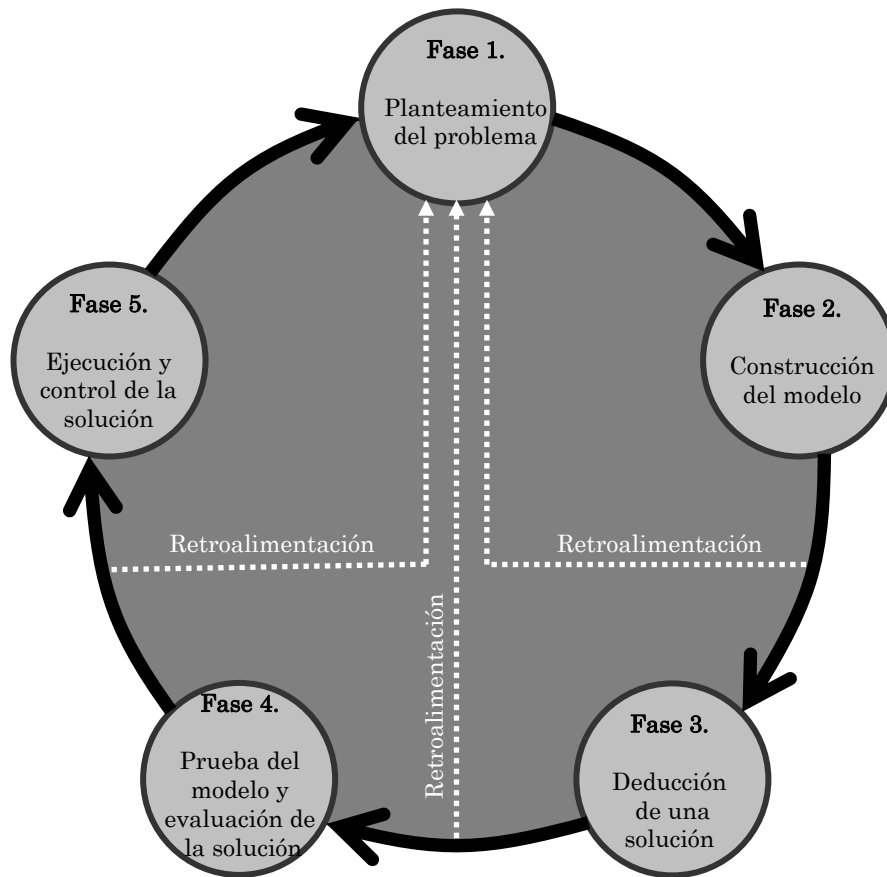


Figura 3.1. Fases de la metodología de la IOs. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

Los autores argumentan también que dichas etapas usualmente se inician en el orden enumerado, por lo general no terminan en ese mismo orden. Además, cada fase procede normalmente hasta que se termina el proyecto e interactúa en forma continua con las otras. Aunque se deben examinar por separado estas fases de la IOs, debe tenerse en mente que es probable que, en el transcurso del tiempo, las mismas se superpongan e interactúen en forma continua. Sin embargo, en este trabajo se argumenta que debe existir una retroalimentación en cada una de las etapas de la metodología. En principio, ninguna metodología puede considerarse "lineal", pero en cada etapa debe existir una retroalimentación continua. Lo anterior se ha agregado a las etapas de la metodología de IOs y se muestra explícitamente en la Fig. 3.1. Además, las etapas o fases aparecen interactuando de una manera cíclica.

A continuación se describe brevemente cada una de las etapas de la metodología.

3.2.1 Planteamiento del problema

De acuerdo a la metodología de IOs, la primera etapa consiste en entender la naturaleza del problema y así poder encontrar una solución al mismo (Fig. 3.2). En el contexto del presente

trabajo de tesis, el diagnóstico del problema se presenta en los Capítulos 2,4 y 6, así como el Anexo-A. En esencia, el Anexo-A se presentan algunos ejemplos de fallas estructurales de las plataformas marinas costa fuera. Dichos eventos representan de alguna manera los 'síntomas' del problema.

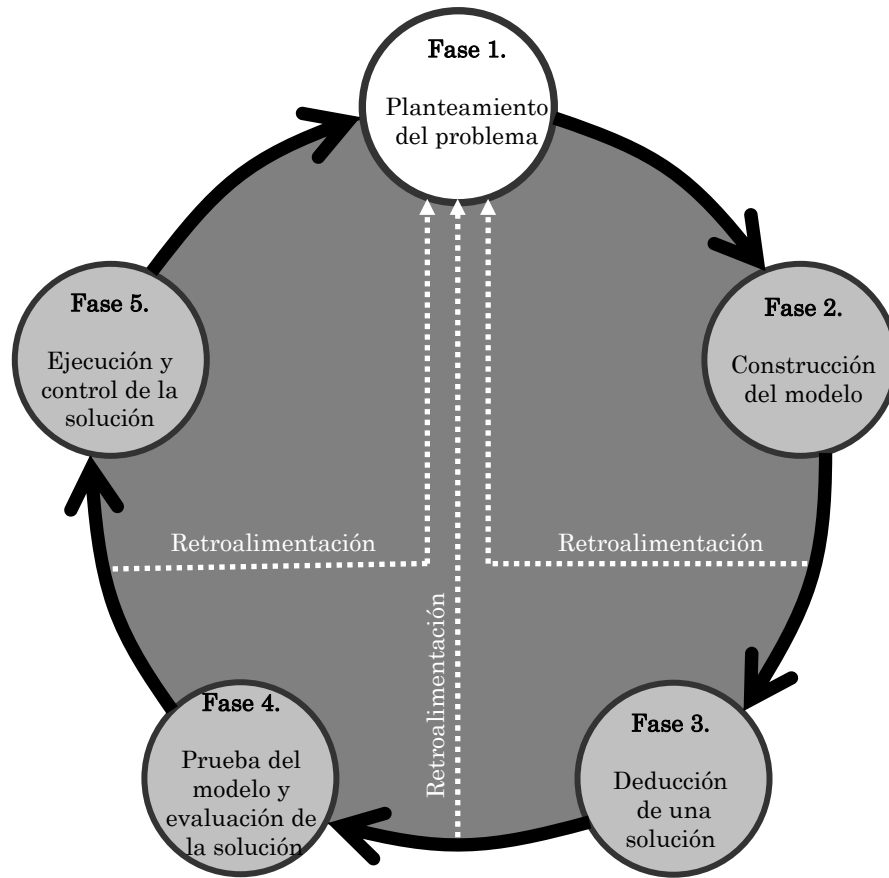


Figura 3.2. Fase-1: Planteamiento del problema. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

Por otro lado, las secciones 2.4, 2.5, 2.6 y 2.7 del Capítulo 2, presentan los resultados de la revisión exhaustiva de la literatura acerca de las investigaciones que se han llevado a cabo en el área de análisis estructural de plataformas marinas. También se llevó a cabo una diagnóstico sobre la integridad estructural (IE) de dichas instalaciones y esto se reporta en el Capítulo 6.

El problema fundamenta radica en la falla estructural de plataformas marinas fijas de producción de petróleo. En el presente estudio se han identificado dos aspectos para llevar a cabo la investigación:

- 1) Aspecto cuantitativo; análisis estructural de las estructuras de plataformas marinas. El análisis consiste en tratar de entender el efecto de las cargas sobre los elementos estructurales de la plataforma marina bajo estudio. (El Capítulo 5 presenta los resultados de esta investigación).
- 2) Aspecto mas general del problema (aspecto cualitativo). Aquí el énfasis fue en el proceso del diagnóstico de la integridad estructural (IE) de plataformas marinas. Se encontró que

existen varios factores de riesgo de integridad estructural; también se llevó a cabo una revisión sobre las principales técnicas de control de IE. Esto se reporta en el Capítulo 6.

Además, en esta etapa se deben de identificar las "variables controlables" (VC), las "variables no controlables" (el 'medio ambiente'). En el contexto de la tesis, las VC se consideraron las que se conocen como "cargas muertas"; por ejemplo el peso de los equipos, entre otros, que va a soportar la estructura. Dicha variable es controlable, en principio. Sin embargo, en la revisión de la literatura se encontró, por ejemplo, que cambios en los procesos, no es considerado explícitamente en el diseño de las estructuras de plataformas (ver capítulo 6 para más detalles del tema).

Las "cargas ambientales", efectivamente, son variables que no son controlables. Ejemplos de este tipo de variables son las cargas asociadas con olas, viento, colisiones, etc. (ver la sección 6.3.2 del Capítulo 6, para detalles de la discusión de estos factores de riesgo de IE).

3.2.2 Construcción del modelo

La segunda etapa de la metodología se muestra resaltada en un círculo de fondo en blanco de la Fig. 3.3.

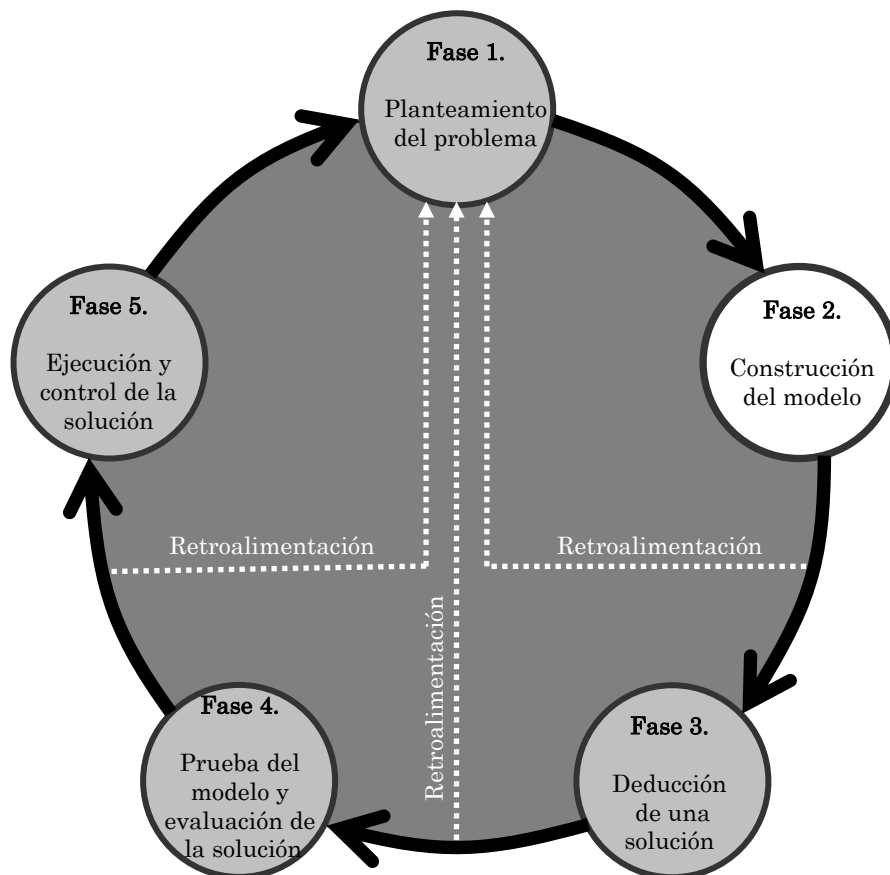


Figura 3.3. Fase-2: Construcción del modelo. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

De acuerdo a la metodología de la IOs, los *modelos* juegan un papel fundamental en la IOs. En general, los *modelos* proporcionan descripciones concentradas y explicaciones de las operaciones del sistema que representan. Así que, por medio del análisis o *experimentación* sobre ellos, se pueden determinar, generalmente, cómo afectan los cambios en el sistema relevante, a su operación. Estos procedimientos con frecuencia substituyen la *experimentación* sobre el sistema mismo. (Ver Sección 3.1, donde se discute sobre la *experimentación* sobre los *sistemas* de interés de IOs). Además, los proponentes de la metodología de IOs argumentan que los procedimientos para la construcción de *modelos* caen dentro de cinco patrones de acuerdo a la complejidad del sistema y el grado de acceso que tengan los investigadores a la estructura del mismo; estos son: 1) "examen directo de las operaciones del sistema"; 2) "analogía"; 3) "análisis de datos"; 4) "experimentación"; y 5) "realidad artificial".

En las siguientes subsecciones se muestran ejemplos de diferentes modelos empleados en este proyecto de investigación.

3.2.2.1 Ejemplo de un *modelo* matemático

En la Sección 3.1 se mencionó la imposibilidad de la experimentación cuando se trata de organizaciones, por ejemplo, de tipo industrial como es nuestro caso de estudio. Sin embargo, en este trabajo de investigación se construyeron representaciones del sistema "estructura de plataforma marina" y su operación (*modelos*) y sobre ellas se realizaron los efectos que pueden tener las diferentes cargas a las que se encuentran sometidos sus componentes.

Los *modelos* usados en este trabajo de tesis consistieron en modelos matemáticos relacionados con los esfuerzos, esfuerzos críticos, deformación plástica y térmica de los elementos estructurales de una plataforma marina (ver sección 2.4 del Capítulo 2, así como el Capítulo 5 para más detalles del análisis estructural de la plataforma marina del caso de estudio). Por ejemplo, la relación existente entre las tensiones y deformaciones unitarias dadas por el siguiente modelo matemático (Ver ecuación 2.1, sección 2.4 del Capítulo 2:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

El *modelo* representa la deformación que se origina, y en consecuencia, la tensión creada en un sólido elástico y se observa que dependen de la fuerza (P), la cual causa un estado de tensiones uniformes sobre cualquier sección del material (A). Claramente, se puede observar cómo se puede manipular las variables involucradas en dicho modelo. Por ejemplo, si se aumenta P, efectivamente, el valor de deformación (σ) aumentará. Por otro lado, éste disminuirá al aumentar la sección transversal del material (A).

En resumen, los modelos en este contexto representan un "laboratorio" donde el investigador puede manipular las variables involucradas en el proceso de investigación.

3.2.2.2 Ejemplo del proceso de construcción del modelo de una plataforma marina

Un modelo de una estructura de plataforma marina puede definirse, en general, como una representación matemática del comportamiento de la estructura de su 'entorno'. Se puede expresar como una relación de "acción"- "respuesta".

Las "acciones" son *modelos* matemáticos de factores ambientales, tales como las cargas consideradas para el análisis del presente caso de estudio (ver Capítulos 5 y 6 para detalles de los mismos). La "respuesta" puede ser considerada como una medida de cambio en el estado de la estructura y se expresa comúnmente en términos de desplazamientos, deformaciones, tensiones y fuerzas (en el presente proyecto se analizaron los esfuerzos y deformaciones; ver Capítulo 5 para detalles de los mismos); la Figura 3.4 se representan estas relaciones.

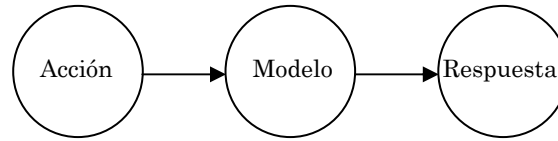


Figura 3.4. Modelo simplificado del proceso de análisis estructural.

En el presente proyecto de investigación se usó el software ANSYS (Ansys, 2010) para la construcción del modelo estructural de la plataforma marina bajo estudio. (Cabe destacar que como cualquier otro software, el software ANSYS contiene los modelos matemáticos asociados con un análisis estructural, como es el caso de plataformas marina). Por ejemplo, en la Figura 3.5, se muestra la definición de los tipos de elementos para el análisis ("pipe elastic straight16").

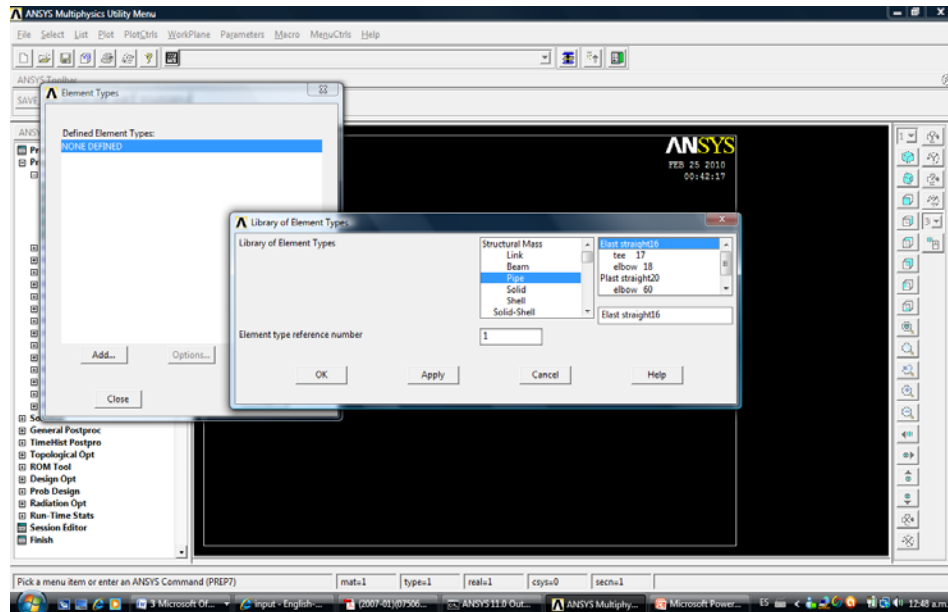


Figura 3.5. Definición del tipo de elemento a estudiar.

En la Figura 3.6, se definen las propiedades del material, tales como: módulos de elasticidad y 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. (Ver Capítulos 2 y 5, para más detalles de éstos conceptos).

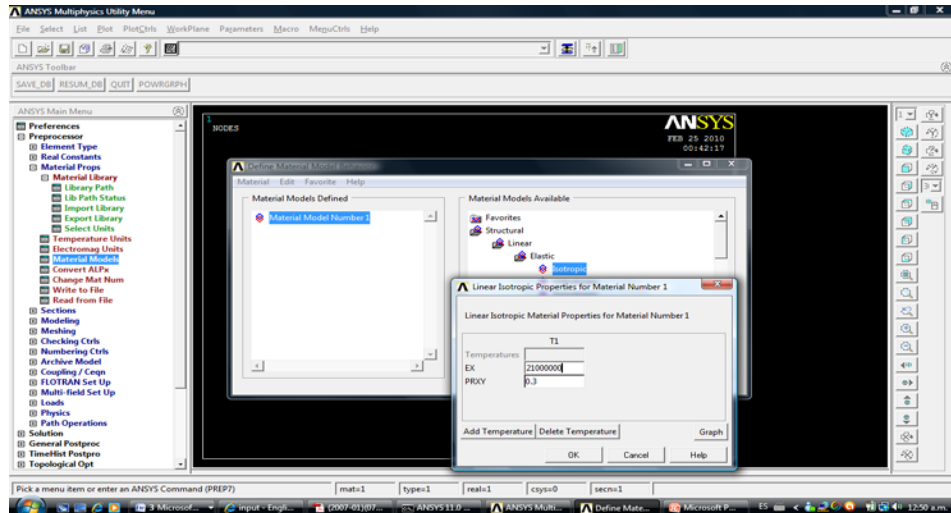


Figura 3.6. Definición de las propiedades del material

En la Figura 3.7, por otro lado, se definen los nodos estructurales, mismos que formaran los elementos estructurales.

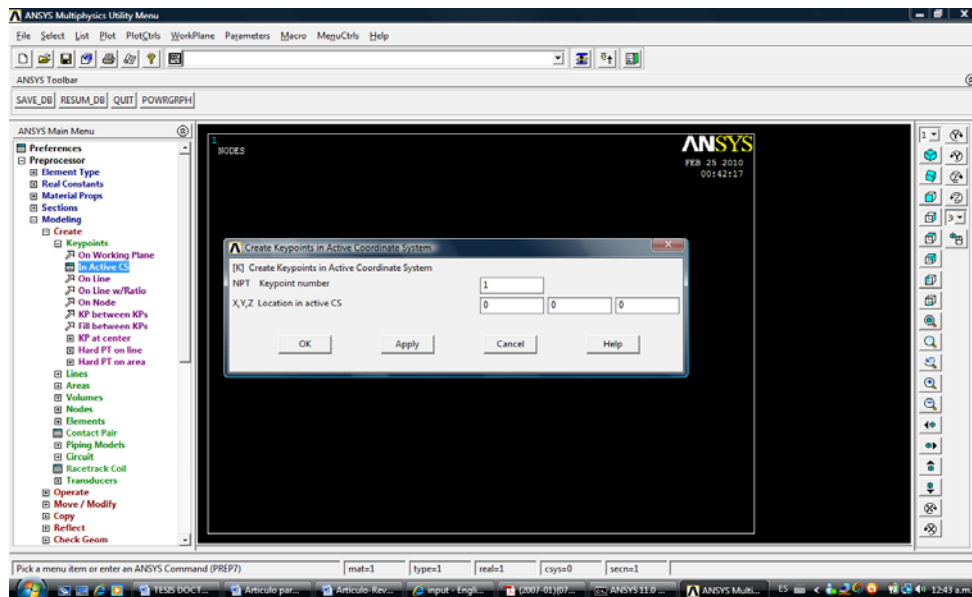


Figura 3.7. Definición de los nodos estructurales.

Finalmente, en la Figura 3.8, se muestra la generación del modelo estructural tridimensional (3D) de la plataforma marina del caso de estudio.

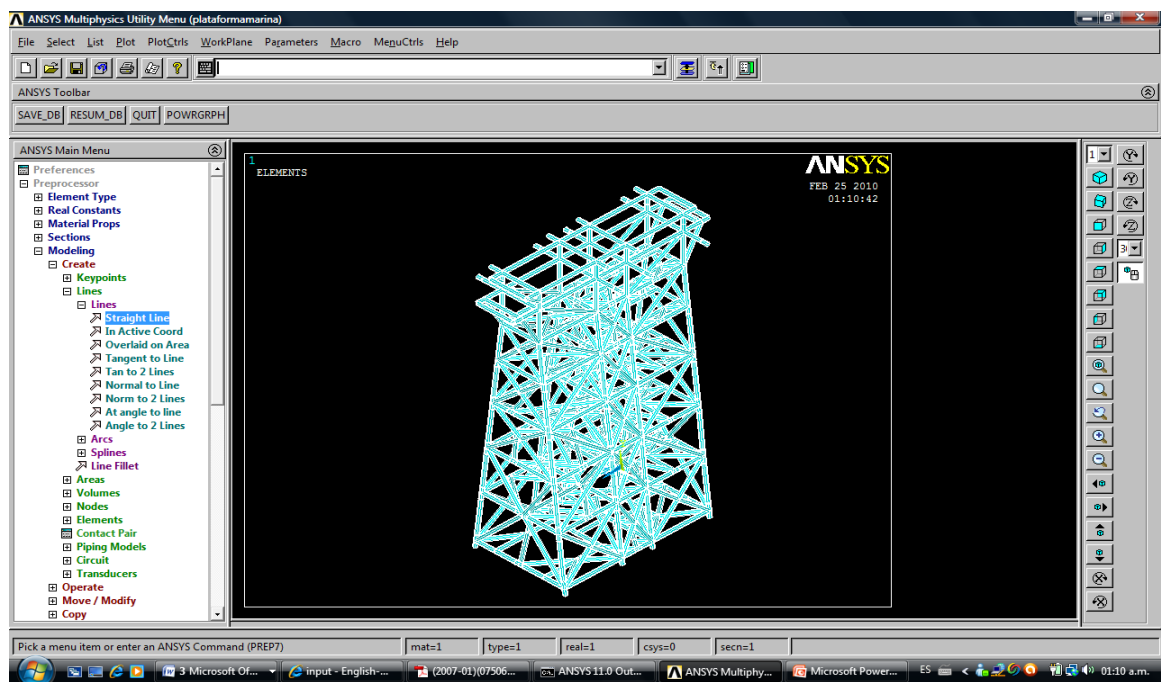


Figura 3.8. Generación del modelo en 3D.

3.2.2.3 Ejemplo de un modelo conceptual asociado con la integridad estructural (IE)

La integridad estructural (IE), es el proceso para demostrar la rigidez de una estructura en toda 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 IE, da la oportunidad de adoptar los principios de riesgo para el desarrollo de la estrategia de IE. La falla estructural, incide en la integridad de la misma siendo suficiente para hacer que una estructura sea inoperable. La consecuencia de las fallas 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 (ver Anexo-A). 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.

En el diseño de ingeniería no es posible garantizar la seguridad absoluta de una estructura debido a la incertidumbre 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 Figura 3.9 muestra un *modelo* conceptual del enfoque estratégico a la IE de plataformas marinas.

En resumen, se puede argumentar que los *modelos* nunca son tan complejos como los fenómenos que representan; están simplificados hasta donde es posible de manera que no pierdan significativamente su precisión. Para simplificar la representación del sistema que se estudia, las variables pueden omitirse, agregarse o simplificarse en su forma; las

relaciones también pueden modificarse para facilitar su manejo, y se pueden agregar a restar restricciones.

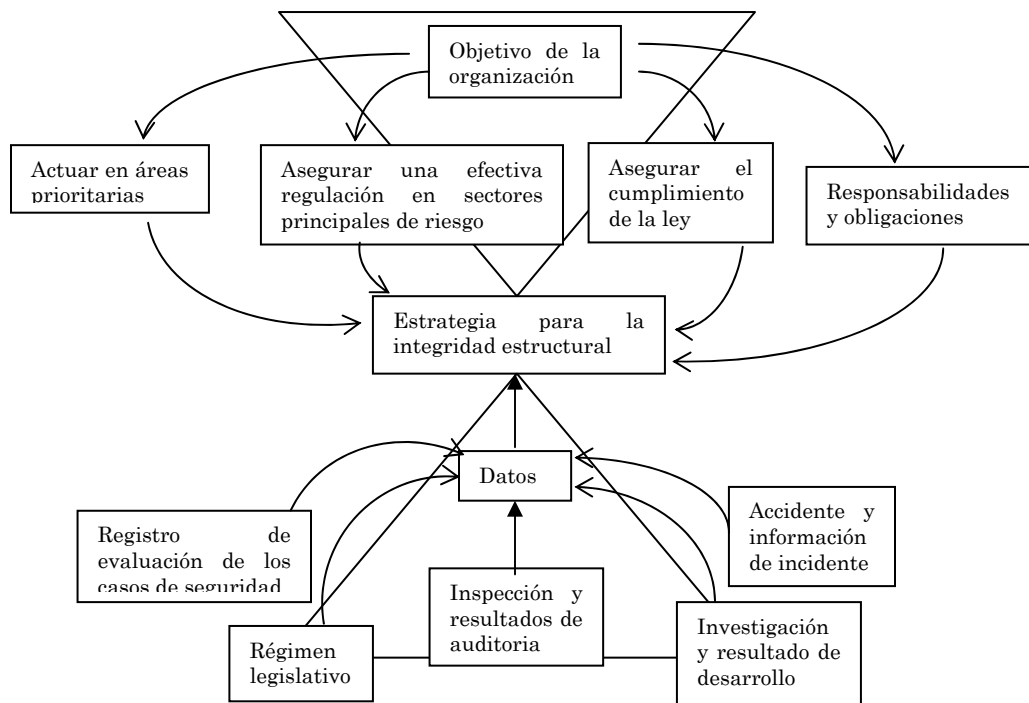


Figura 3.9. Enfoque estratégico de integridad estructural (IE).

3.2.3 Deducción de una solución

La fase o etapa 3 de la metodología de la IOs es la asociada con la "Deducción de una solución" y dicha etapa se muestra en la Figura 3.10. En general, 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.

Es claro que resolver un *modelo* consiste en encontrar los valores de las variables controlables o de estimarlos aproximadamente (ver Capítulo 5). En el presente proyecto de investigación se ha usado el software ANSYS para la construcción del modelo y una cumplido dicho objetivo, el modelo generado se sometió a una serie de simulaciones para encontrar la solución del problema; esto es los efectos que se tienen cuando los componentes estructurales de la plataforma marina está sujeta tanto a cargas "externas" como "internas". El Capítulo 5, presenta a detalle los principales resultados de la investigación.

En resumen, el proceso de simulación permitió operar el modelo construido para imitar a la *realidad*. (Ver sección 7.1.3 del Capítulo 7 sobre una discusión sobre *modelos*).

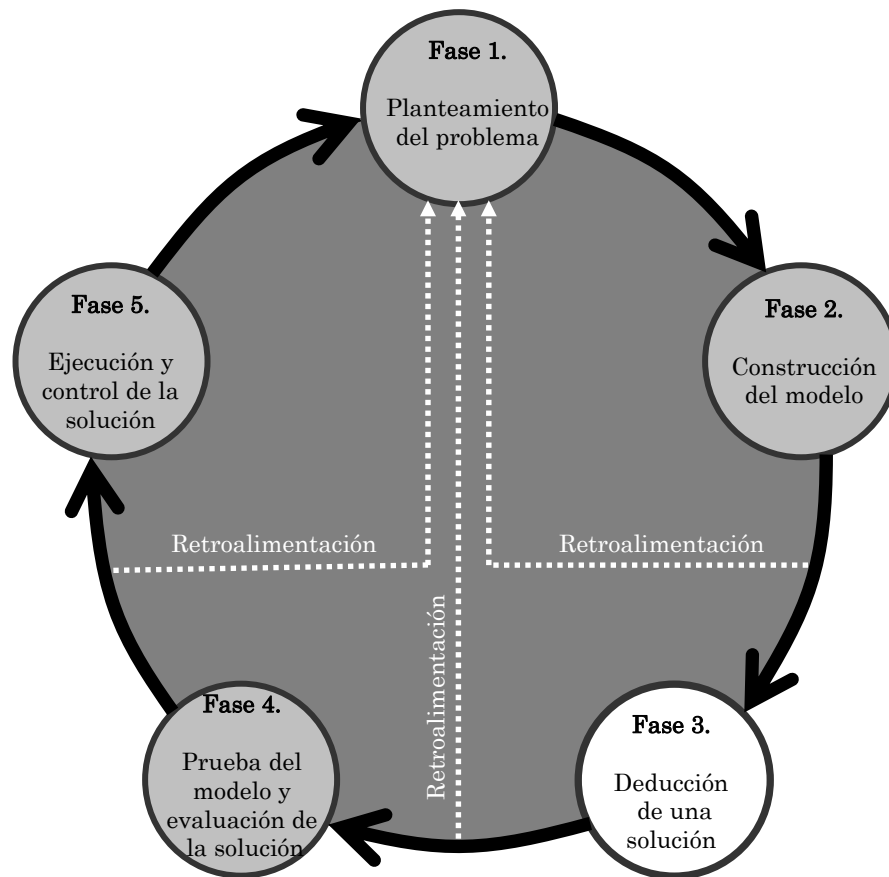


Figura 3.10. Fase-3: Deducción de una solución. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

3.2.4 Prueba del modelo y evaluación de la solución

La Figura 3.11 resalta la etapa de "Prueba del modelo y evaluación de la solución" de la metodología de la IOs. En el proceso de la construcción de *modelos* se pueden cometer errores en las consideraciones que se toman en la construcción de los mismos. Dado lo anterior, es de vital importancia minimizar dichas deficiencias para obtener los mejores resultados de los mismos.

Los proponentes de la metodología (Ackoff y Sasieni, 1975), argumentan que el investigador debe evaluar constantemente sus propias decisiones y procedimientos y no dar nada por supuesto sin examinar las bases sobre las que se aceptan y sin estar enterado de sus consecuencias (esto justifica una vez más la importancia de tener una continua retroalimentación antes de seguir con la siguiente etapa de la metodología. En dicho proceso de retro-alimentación se pueden detectar errores, deficiencias, por ejemplo, en el proceso de la construcción de *modelos*). Además, argumentan que el autoconocimiento metodológico, la habilidad para definir y medir, y el dominio de una amplia variedad de técnicas estadísticas son esenciales para producir soluciones efectivas a problemas reales. (Ackoff y Sasieni, 1975).

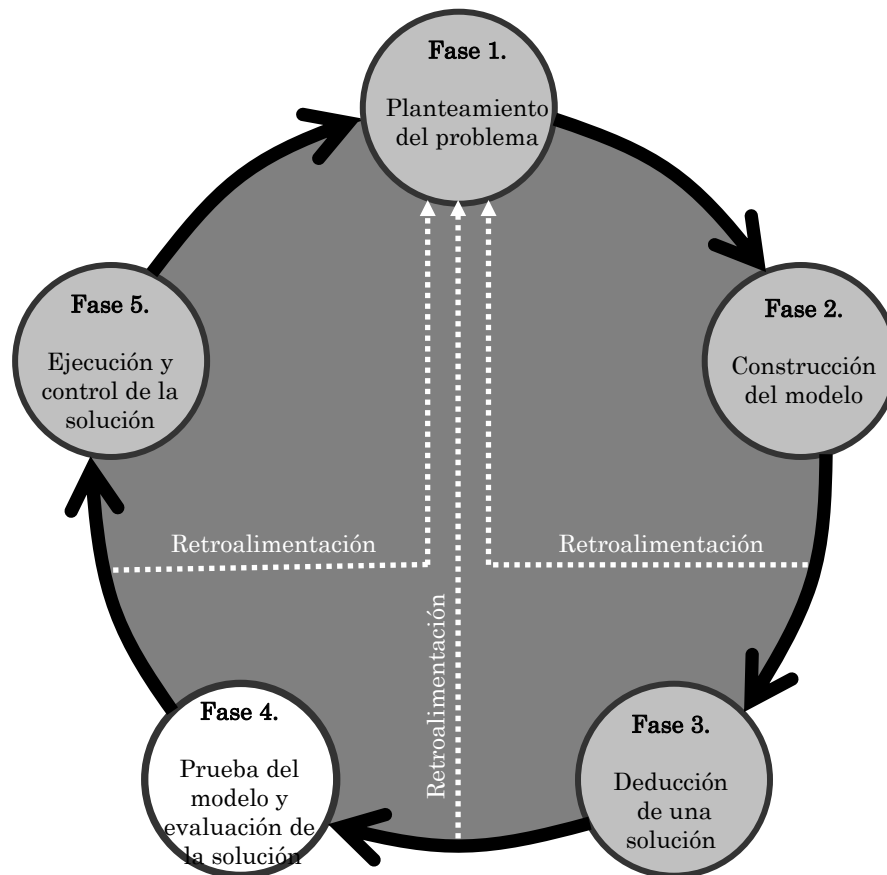


Figura 3.11. Fase-4: Prueba del modelo y evaluación de la solución.
(Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

Sin embargo, en este trabajo de investigación se argumenta que no es suficiente que el investigador evalúe constantemente sus decisiones y procedimientos en el proceso de la formulación de los *modelos* que se están usando en el proceso de investigación. Es de vital importancia que los resultados de los *modelos* generados se sometan a un arbitraje estricto de otros investigadores relacionados en el área (ver discusión sobre el carácter interdisciplinario de la IOs en la Sección 3.1). En el proceso de evaluación del modelo y por lo consiguiente de la solución en la publicación de los resultados en revistas de arbitraje puede ser considerado como una forma de evaluación del modelo y por lo consiguiente de la solución. (ver sección 7.1.3 del Capítulo 7 sobre una discusión sobre el tema). Lo anterior es considerado por muchos organismos académicos nacionales e internacionales en organizar eventos académicos de discusión sobre los modelos y los resultados de los mismos. En el contexto del proyecto de la tesis, cada año se llevan a cabo reuniones para discutir, entre otras cosas, la confiabilidad de los modelos de predicción que se usan en la industria del Petróleo.

3.2.5 Ejecución y control de la solución

La última etapa de la metodología, consiste en la ejecución y control de la solución, y dicha etapa se muestra en a Figura 3.12.

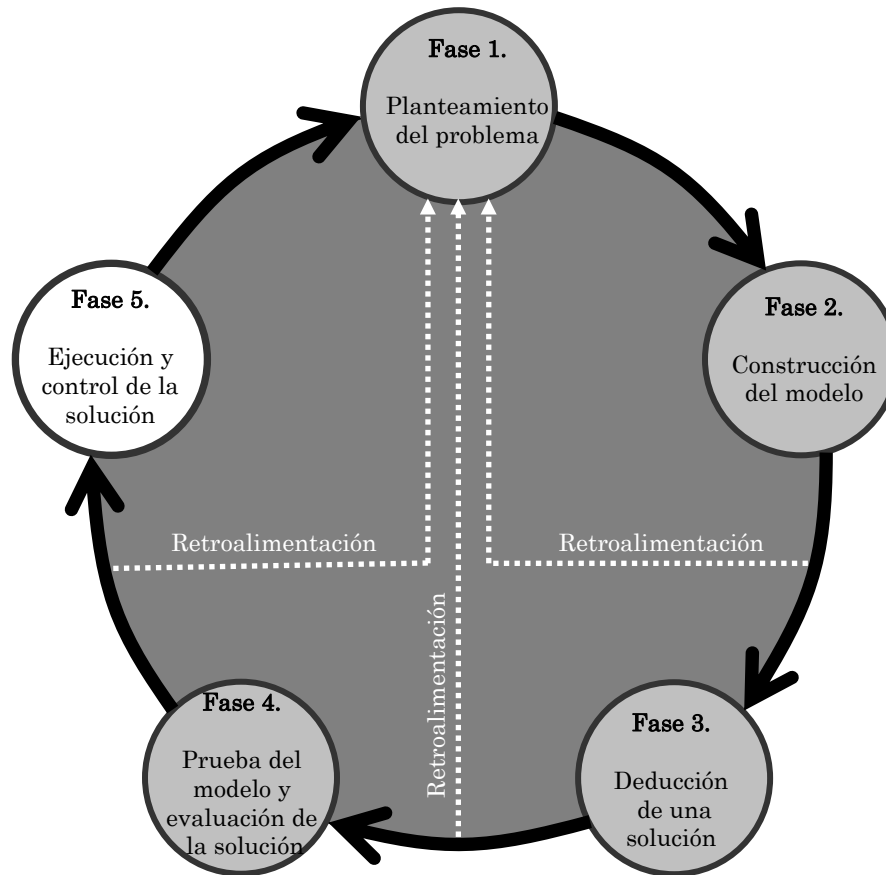


Figura 3.12. Fase-5: Ejecución y control de la solución. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, 1975).

Al inicio del Capítulo se mencionó que el objetivo primordial de la IOs es el de mejorar el rendimiento de sistemas. Los proponentes de la metodología argumentan que lo anterior no se puede lograr a menos que: 1) los administradores responsables del sistema acepten la solución proporcionada por la investigación; 2) la solución se implante correctamente, y 3) se mantenga eficiencia, aun cuando haya cambios en las condiciones.

La aceptación de una solución propuesta dependen, entre otras cosas, de lo bien que la entienda el administrador responsable y, también de que conozca el método por el cual se obtuvo. Dicha comprensión, depende, a su vez, de cuanto haya participado el administrador en el proceso de investigación. Cuando menos, debe *revisar* y *criticar* el trabajo a intervalos regulares y frecuentes. Por lo consiguiente, en este trabajo se argumenta que para "revisar" y "criticar" se tiene que tener el suficiente conocimiento en el área. El impacto que tienen tales juntas sobre los administradores depende, en gran parte, de la eficiencia de la comunicación de los investigadores con ellos. De aquí que la participación y la comunicación efectiva es la clave para obtener la aceptación de los administradores y la cooperación

necesaria de todos aquellos que pueden influir en la implantación de la solución. (Ackoff y Sasieni, 1975).

En relación a la implantación de la solución se debe planear y programar con cuidado. Por ejemplo, se deben preparar instrucciones detalladas para todos los participantes. Se espera que ellos sean capaces de comprender y seguir dichas instrucciones. Si la implantación se logra, utilizando la autoridad, sin que haya comprensión de su propósito, es fácil que la saboteen. La cooperación proporciona mejor implantación que la coacción. Se debe tratar de conseguir esta cooperación en la investigación, lo antes posible, para que quienes van a implantar los resultados o se ven afectados por ellos, sepan que sus intereses se han tomado en cuenta y puedan sentirse parcialmente responsables de la solución e identificarse con ella. dicha comprensión se logra solamente, al conocer a fondo el *sistema* y el *modelo* y también la manera en que se altera o simplifica el modelo que representa el sistema. La significación de la deformación o simplificación debe evaluarse repetitivamente. las evaluaciones repetidas de estas deformaciones y simplificaciones son parte esencial del control de la solución que, finalmente, se logra. (Ackoff y Sasieni, 1975).

Finalmente, debido a que el *sistema* y su *medio ambiente*, por lo general, cambian con frecuencia, es necesario controlar la solución para asegurar, en todo momento, un alto nivel de rendimiento. Deben detectarse cambios, y cuando sea necesario, la solución se debe ajustar a ellos, en forma adecuada. Los controles eficaces permiten no sólo comprender sino familiarizarse con la dinámica del sistema; esto, a su vez, puede conducir a mejoramientos del modelo y la solución derivada de él. (Ackoff y Sasieni, 1975).

3.3 Conclusiones del Capítulo

El capítulo ha presentado el marco metodológico para el desarrollo del presente proyecto de investigación. En particular, se han adoptado los principios generales que caracterizan a la metodología de IOs. Las conclusiones más relevantes del capítulo se pueden resumir como sigue:

- 1. Un sistema de tipo industrial como el caso de una plataforma marina no se puede usar la experimentación para dar una solución al problema dado.*
- 2. El uso de modelos juega un papel esencial para dar una solución a un problema dado para el caso de una plataforma marina.*
- 3. El enfoque al problema, por ejemplo, se integridad estructural de plataformas marinas debe de tener un enfoque de sistemas.*

Una breve descripción del contexto de la plataforma marina bajo estudio se expone en el siguiente Capítulo 4.

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

Este Capítulo presenta una breve descripción del contexto de la plataforma marina bajo estudio. El capítulo comienza con una breve descripción de los principales pozos petroleros de nuestro país y dicha información se presenta en la sección 4.1. Una breve introducción de las características principales de una plataforma marina como la del caso de estudio se presentan en la sección 4.2. Finalmente, las conclusiones del capítulo se presentan en la sección 4.3.

4.1 Complejos petroleros de México

México es el sexto mayor productor de petróleo en el mundo y el décimo en términos de exportación neta al 2007. Los principales yacimientos de petróleo y gas natural en México se localizan en las regiones marina y del sudeste, donde el petróleo y el gas natural están presentes en las mismas formaciones subterráneas. Por esta razón, la principal fuente de gas natural es el gas asociado que se extrae simultáneamente con el petróleo. El sector petrolero es crucial para la economía de México, los ingresos derivados del petróleo constituyen más del 10% de las exportaciones. Petróleos Mexicanos (PEMEX) estima diez años más de vida para los yacimientos petroleros que hoy se explotan.

Los principales yacimientos de petróleo y gas natural en México se localizan en las regiones marina y del sudeste, donde el petróleo y el gas natural están presentes en las mismas formaciones subterráneas. Por esta razón, la principal fuente de gas natural es el gas asociado que se extrae simultáneamente con el petróleo. Los principales complejos de pozos petroleros que tiene México son los siguientes (Pemex, 2009): {a} Complejo Cantarell; {b} Complejo Chicontepec; y {c} KU-Maloob-Zaap.

4.1.1 Complejo Chicontepec

También conocido como Paleocanal Chicontepec, es un campo petrolero en el estado de Veracruz. El Paleocanal fue descubierto en 1926 y tiene una superficie de tres mil 815 km². De 1952 al año 2002 se perforaron 951 pozos, de los cuales actualmente operan 102, con una producción de seis mil 800 barriles por día de crudo y 15 millones de pies cúbicos diarios de gas. (Pemex, 2009).

4.1.2 Complejo Cantarell

El yacimiento petrolero de Cantarell fue descubierto por el pescador Rudesindo Cantarell en 1976, se localiza a 80 kilómetros de la costa, en la Bahía de Campeche. Esta reserva se formó durante la era Cetácea, a partir del impacto del asteroide que creó el Cráter Chicxulub. Este complejo está constituido por los campos Nohoch, Chac, Akal, Kutz, Ixtoc y Sihil. Este yacimiento fue descubierto en 1976, desde el año en que comenzó su explotación en 1979 hasta 2006 ha producido 11,492 millones de barriles de aceite y 4,691 millones de millones de pies cúbicos de gas natural. Este complejo es una ciudad en el mar con todos los servicios que hay en tierra y cuenta en total con 190 pozos. Su producción durante el año 2003 lo colocó como el segundo productor más rápido, detrás del Campo "Ghawar" en Arabia Saudita. La producción de Cantarell podría disminuir de 2 millones de barriles diarios en

2003 a alrededor de 600 mil barriles en 2009. Este rápido declive es el resultado de mejores técnicas de extracción, las cuales ocasionan una mayor rapidez a expensas de la longevidad del yacimiento. Complejo Cantarell produce dos terceras partes del petróleo de México.

4.1.3 Complejo KU-MALOOB-ZAAP

PEMEX Exploración y Producción desarrollará, durante los próximos ocho años, el Proyecto Ku-Maloob-Zaap, en la Sonda de Campeche. 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 (Figs 4.1 y 4.2). 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, 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.



Figura 4.1. Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste. (García Cuellar, et al., 2004).

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 (Pemex, 2007), la Figura, 4.2 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. (García Cuellar, et al., 2004).

Este campo, 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.

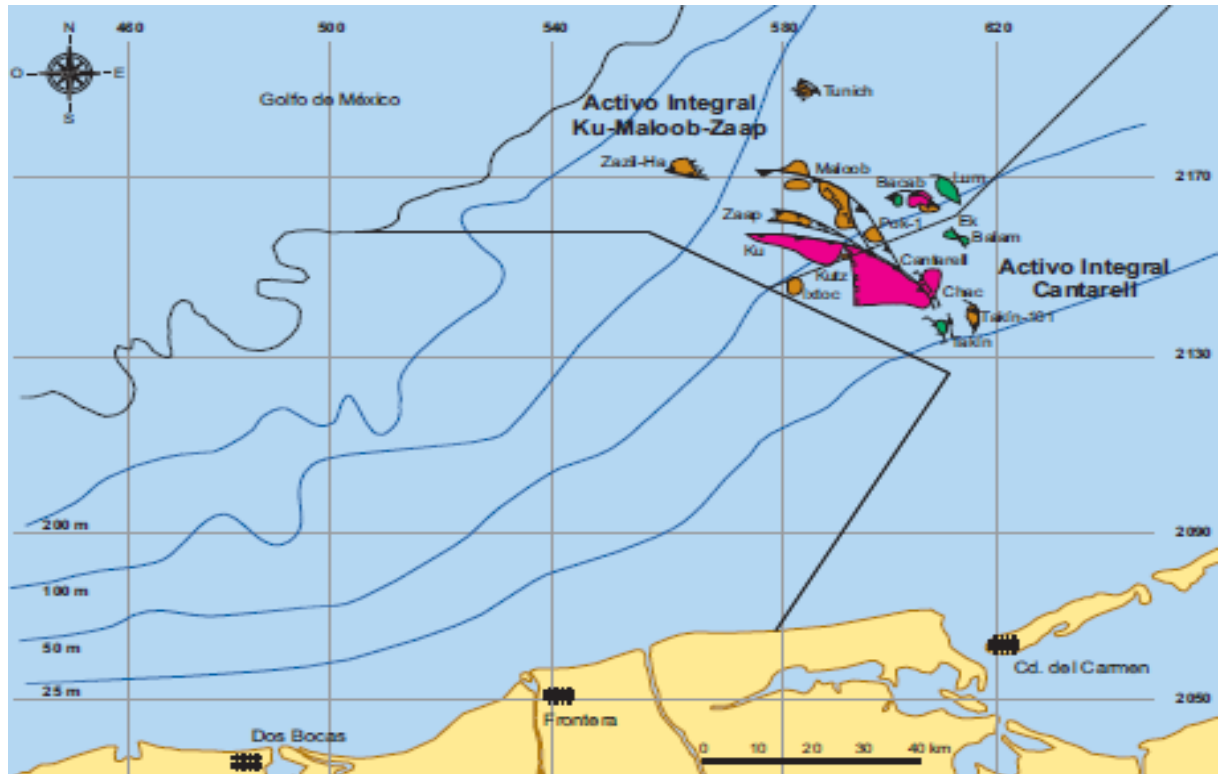


Figura 4.2. Ubicación geográfica de los activos integrales de la Región Marina Noreste. (García Cuellar, et al., 2004).

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. (García Cuellar, et al., 2004).



Figura 4.3. Localización de pozos y líneas de sección estratigráficas estudiadas en la Sonda de Campeche, sur del Golfo de México. (Cantú Chapa, 2008).

La Figura 4.4 muestra un ejemplo de un complejo de plataformas marinas interconectadas y localizadas en la Sonda de Campeche. Una de ellas es la que se está estudiando en este proyecto de investigación (para el propósito del siguiente proyecto dicha plataforma se conocerá como: "plataforma marina"; "plataforma bajo estudio").



Figura 4.4. Ejemplo de un complejo de plataformas marinas. (Pemex, 2008).

4.2 Plataformas marinas

Las plataformas marinas, por ejemplo, de perforación sirven de soporte a las torres de perforación, los utensilios y el equipo para las operaciones en alta mar o en aguas interiores, y las hay de distintos tipos, desde barcos y barcasas flotantes o sumergibles hasta plataformas fijas sobre soportes de acero utilizadas en aguas poco profundas y plataformas de gravedad grandes, flotantes, de hormigón armado, que se utilizan en aguas profundas. Una vez completada la perforación, las plataformas marinas se usan como soporte del equipo de producción (también conocidas como plataformas fijas). Las estructuras más grandes tienen capacidad para más de 250 operarios y demás personal de apoyo, para helipuertos y plantas de procesamiento, además de capacidad de almacenamiento de petróleo crudo y condensado de gas. Las Figuras 4.5 y 4.6 muestran ejemplos de plataformas marinas de producción de crudo y gas ubicadas en la Sonda de Campeche.

Las instalaciones de producción de una plataforma grande procesan el crudo, el gas y el condensado de las instalaciones satélite antes de su embarque en tierra.

Tabla 4.1. Tipos de plataformas marinas. (Pemex, 2009)

Tipos de Plataformas marinas	Total
Perforación	136
Producción	16
Enlace	11
Habitacional	17
Compresión	9
Almacenamiento	1
Telecomunicaciones	6
Control y servicios	1
Medición	1
Tratamiento y bombeo	1
Total	199

Normalmente el tipo de plataforma utilizado en la perforación submarina suele estar determinado por el tipo de pozo que se va a perforar (de exploración o de producción) y por la profundidad del agua. La Tabla 4.1 presenta un resumen del tipo de plataformas existentes en el Golfo de México. (Pemex, 2009).

Las Figs. 4.5 y 4.6 muestran los tipos de riesgos de integridad de las estructuras de plataformas marinas en las actividades que se llevan a cabo diariamente. Por ejemplo, en la Fig. 4.5 se puede apreciar las operaciones donde se involucran levantamiento de cargas mediante grúas. Ha habido casos cuando la carga, por ejemplo, la mostrada en la figura, se cae y claramente representa un riesgo a la integridad de la estructura. De manera similar, en la Fig. 4.6 se observa, por ejemplo, las operaciones donde está involucrada una "lancha" o pequeña embarcación, que también representa un riesgo a la estructura de la plataforma; por ejemplo en el caso de una colisión. Esta observación es de interés en el presente proyecto de tesis. Las secciones 6.3.2.5 y 6.3.2.6 del Capítulo 6 presentan una discusión de éstos riesgos. Además, el Anexo-A detalla algunos ejemplos de accidentes ocasionados por estos factores de riesgo.



Figura 4.5. Ejemplo de operaciones con grúas en una plataforma marina. (Pemex, 2008).



Figura 4.6. Ejemplo de operaciones en una plataforma marina. (Pemex, 2008).

4.2.1 Descripción de una plataforma

Como se mencionó anteriormente 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 edificios; por lo general su parte inferior es un muelle y la superior se ubica un helipuerto (ver por ejemplo Fig. 4.6). Con frecuencia estas instalaciones son verdaderos conjuntos modulares de varias plataformas (Fig. 4.4), 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 las Figuras 4.6 y 4.7.

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 (Fig. 4.8).



Figura 4.7. Ejemplo de operaciones en un complejo de plataformas marinas.
(Fotogalería, 2011).

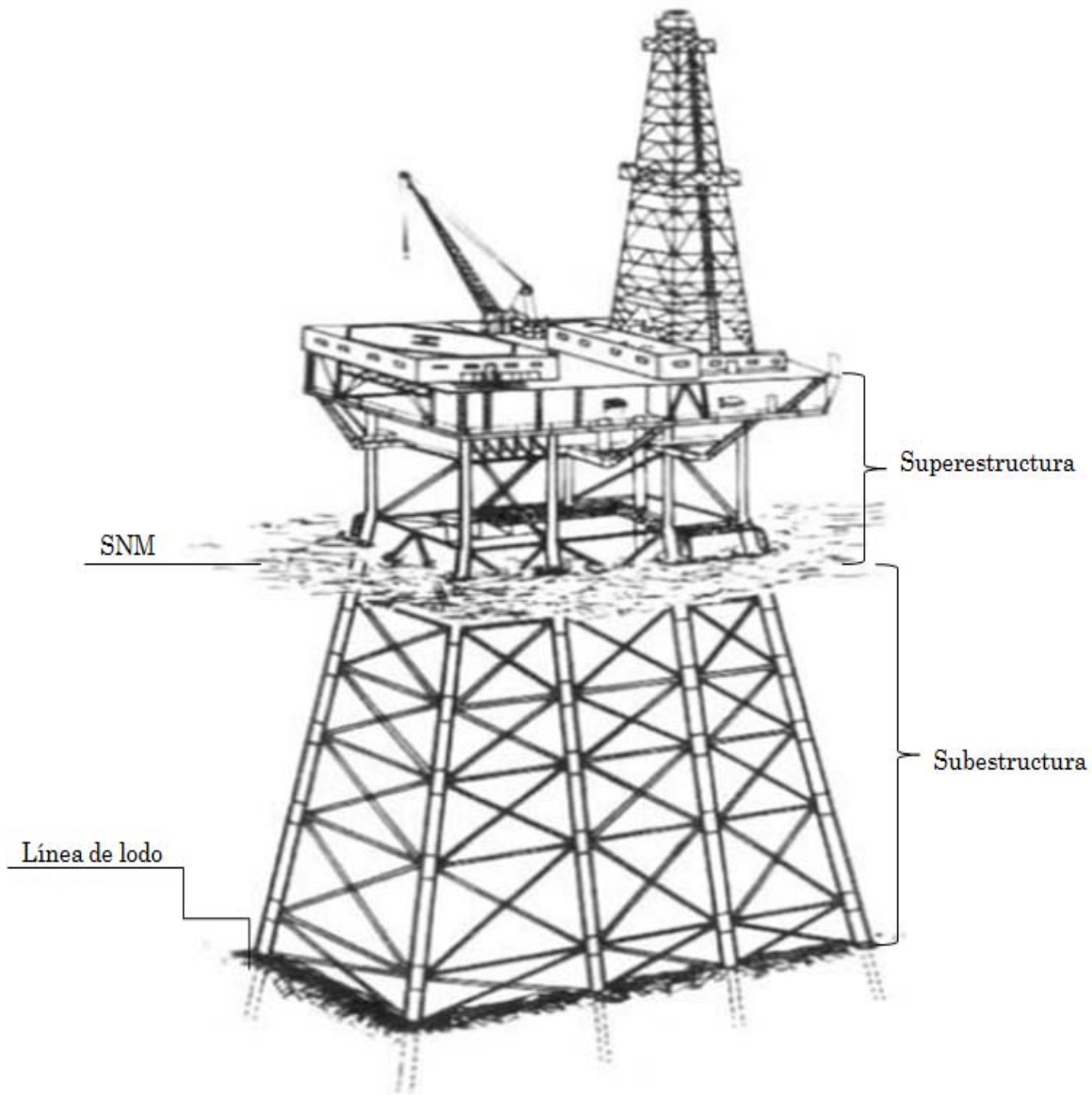


Figura 4.8. Superestructura y subestructura de una plataforma marina fija. (Chakrabarti, et al., 2005).

La superestructura (Fig. 4.8), 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 de producción. 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 y nodos tubulares (ver por ejemplo Figs 4.9, 4.10, 4.11 y 4.12), vigas armadas y perfiles laminados como vigas IR, canales y ángulos.

La subestructura (Fig. 4.8), 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 4.8. 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.

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 4.9.

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.

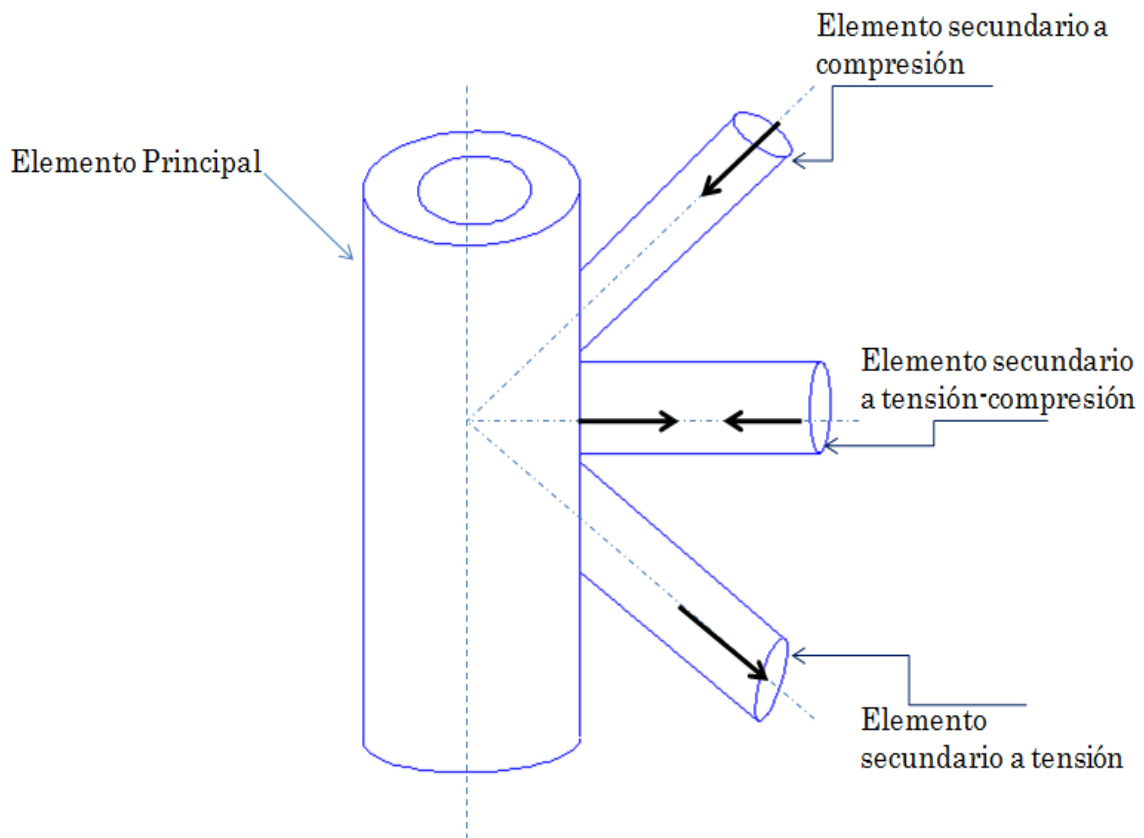


Figura 4.9. Ejemplo de conexión tubular de la estructura de una plataforma. (API, 2000).

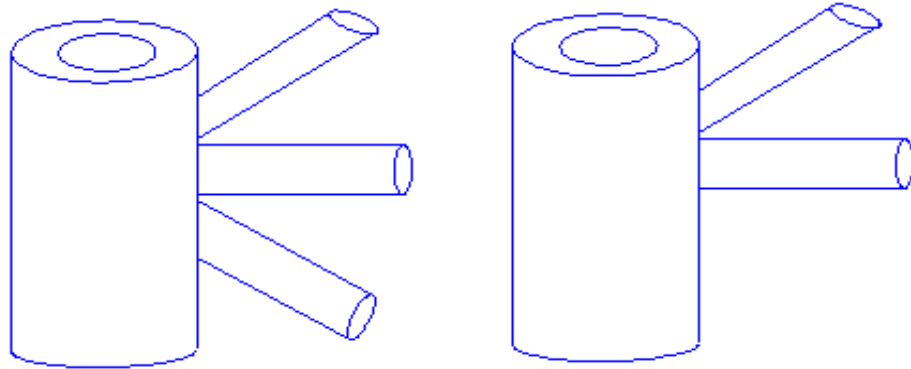


Figura 4.10. Ejemplos e conexiones tubulares típicos de estructuras de plataformas marinas. (API, 2000).

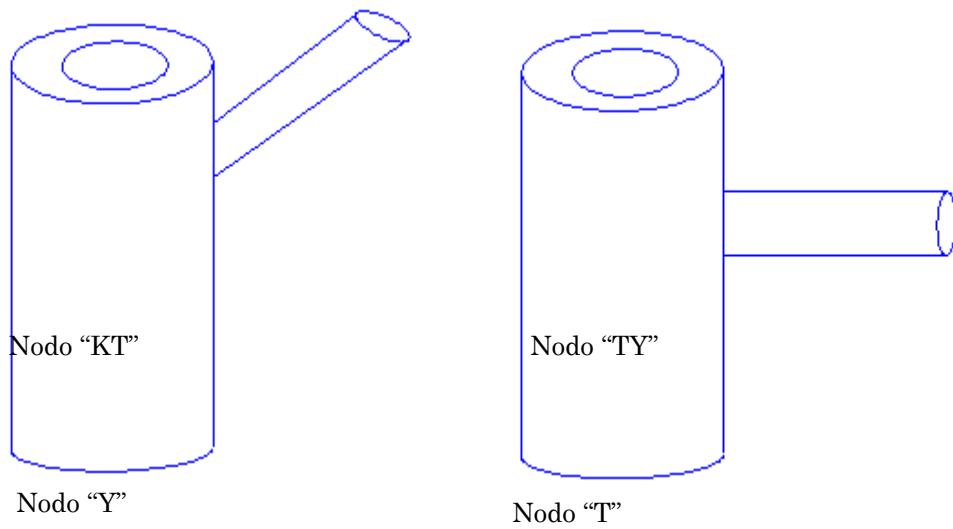


Figura 4.11. Nodos estructurales tipo "y" y "T". (API, 2000).

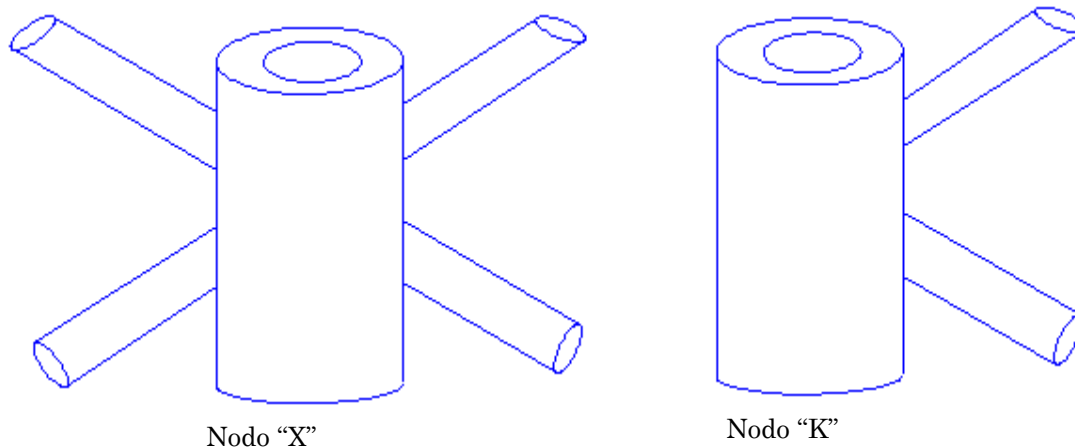


Figura 4.12. Nodos estructurales tipo "X" y "K". (API, 2000).

Del mismo modo, se generan diferentes configuraciones que se pueden obtener en nodos estructurales tubulares o 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 4.12, de los tipos de nodos comúnmente empleados en la subestructura de las plataformas marinas fijas de tipo "Jacket", que corresponde a nuestro caso de estudio. Finalmente, las características físicas, así como las características de cargas a las que se encuentra sometida la plataforma del caso de estudio se detallan en la sección 5.2.2. del siguiente Capítulo.

4.3 Conclusiones del Capítulo

En el Capítulo se ha presentado una breve descripción del contexto de la plataforma marina bajo estudio. Se describieron los campos petroleros existentes en nuestro país, entre otros. La conclusión más destacada de este capítulo es la complejidad y el alto nivel de riesgo de las actividades que se llevan a cabo en las plataformas marinas. Los riesgos asociados con dichas operaciones no solo son relevantes a los operarios pero también a la integridad estructural de las plataformas marinas, objetivo de este proyecto de investigación. Además, en su conjunto, las plataformas marinas, representan una pequeña planta industrial "aislada" en la mar; dicha planta tiene que tener un elevado grado de confiabilidad para garantizar la seguridad de sus trabajadores.

En el siguiente Capítulo se presentan los resultados del análisis estructural de la plataforma marina bajo estudio.

APLICACIÓN NUMÉRICA DEL CASO DE ESTUDIO

Este Capítulo presenta el análisis estructural del caso de estudio. El capítulo comienza con una breve descripción de metodología en el contexto del Capítulo y esto se expone en la sección 5.1. La sección 5.2 presenta las consideraciones para la construcción del modelo de la plataforma bajo estudio. Nuevamente, las fases 3 y 4 de la metodología de investigación se introduce nuevamente en la sección 5.3 Los resultados del análisis estructural se exponen en la sección 5.4. Finalmente, la Conclusión del Capítulo se presenta en la sección 5.5.

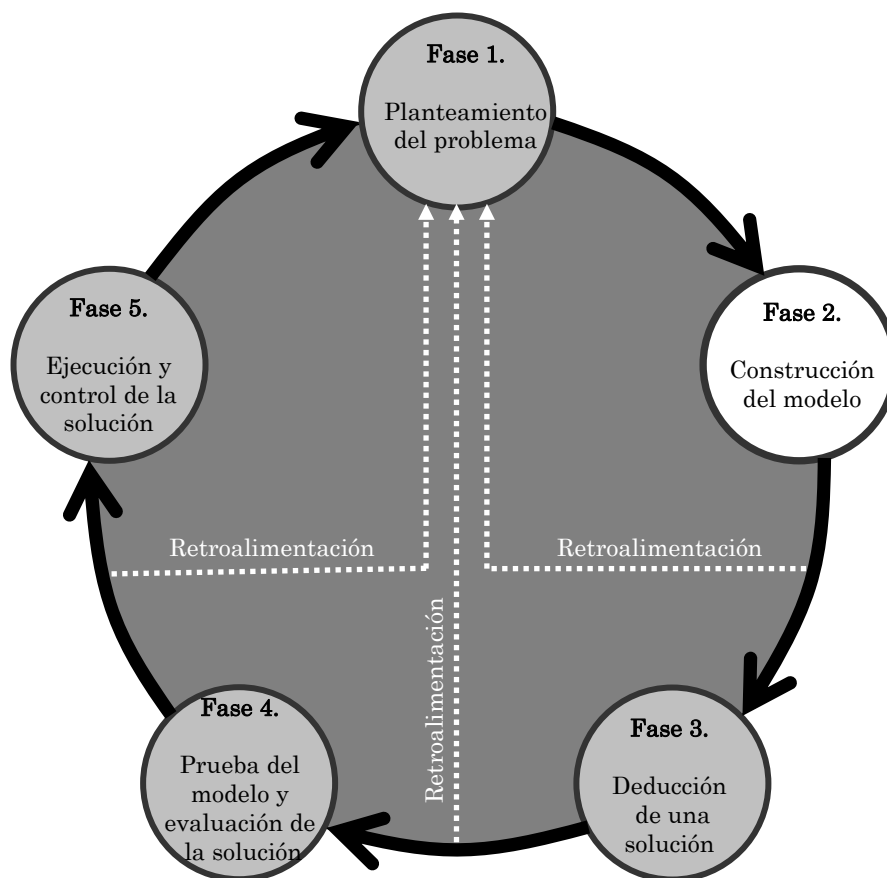


Figura 5.1. Fase-2: Construcción del modelo. (Adaptado de Ackoff y Sasieni, (1975)).

5.1 La metodología de investigación y el caso de aplicación cuantitativa

Este Capítulo presenta el análisis estructural de la plataforma considerada para el caso de estudio. Los resultados de las actividades llevadas a cabo se reportan en este capítulo y corresponden a las Etapas 2 y 3 de la metodología de investigación. Las actividades correspondientes a la Etapa 2, se exponen en la siguiente sección.

5.2 Construcción del modelo de la plataforma bajo estudio

5.2.1 Definición de la geometría de estructura

La estructura de la plataforma marina que se consideró para este estudio se muestra en la Figura 5.2. 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.

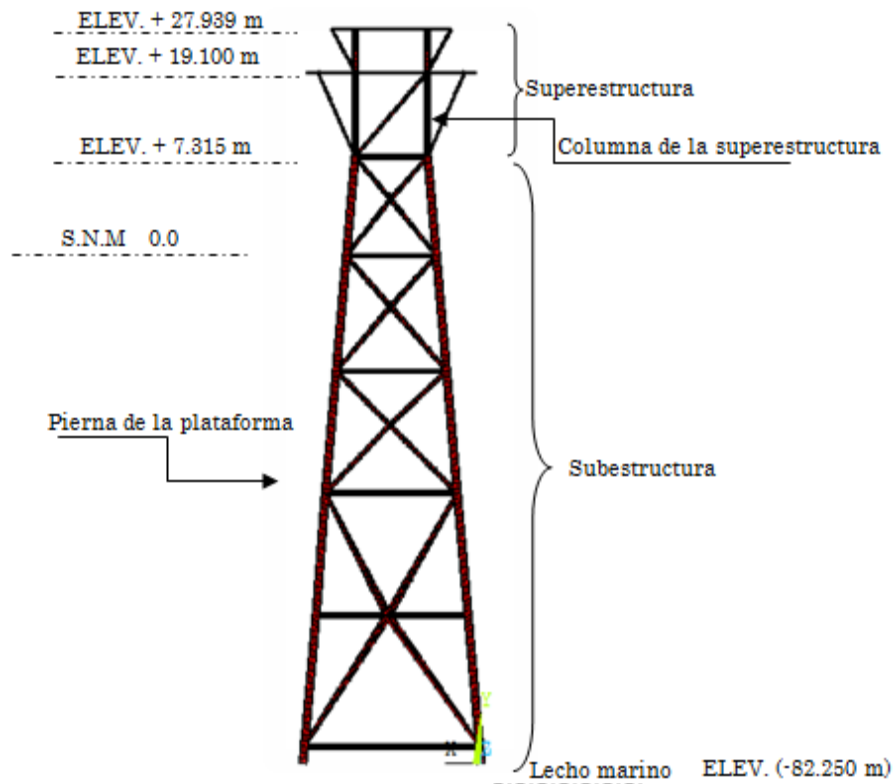


Figura 5.2. Marco estructural de la plataforma bajo estudio.

5.2.2 Definición de cargas y otras consideraciones

5.2.2.1 Cargas involucradas en la integridad estructural y propiedades del material

Para el proceso de análisis estructural de la plataforma marina fija, se consideraron todos los tipos de cargas posibles así como sus combinaciones más desfavorables, que puede experimentar la estructura. La Tabla 5.1 se presentan las propiedades físicas del material de la estructura; las tablas 5.2 y 5.3 presentan las cargas 'vivas' y 'muertas' que se consideraron en el análisis. La carga 'muerta' se consideró como una valor constante (160

Kg/m²). Las cargas 'vivas', por otro lado, están normalmente divididas en dos componentes, tales como: '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). 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 5.1. Propiedades físicas del material. (ASM, 1998).

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

Tabla 5.2. Cargas gravitacionales – Nivel + 19.100 m (ver Fig. 5.2).

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

Tabla 5.3. Cargas gravitacionales – Nivel + 27.939 m (ver Fig. 5.2).

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

5.2.2.2 Cargas ambientales

Las cargas ambientales son cargas que se generan como consecuencia de fenómenos meteorológicos (viento), oceanográficos (corriente y oleaje) y sísmico (ver Capítulo 6 para más detalles de los factores de riesgo de integridad estructural de plataformas marinas fijas).

De modo que las fuerzas de oleaje considerados en este estudio están basadas en las recomendaciones de la API (American Petroleum Institute) (API-RP-2A, 2000) y fueron considerados para las siguientes direcciones 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° y 315°; tanto para condiciones de operación como para operaciones de tormenta. Los coeficientes que se utilizaron para la ecuación de Morrison son las de los coeficientes de inercia (C_m) y el coeficiente de arrastre (C_d). En las Tablas 5.4 y 5.5 se muestran los parámetros meteorológicos y oceanográficos considerados en este análisis. (API-RP-2A, 2000).

Tabla 5.4. Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Operación. (API-RP-2A, 2000)

Parámetros	Diseño	Unidades
Periodo de retorno de referencia	10	Años
Altura máxima de ola	8.7	m
Altura de ola Significante	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 5.5. Parámetros meteorológicos y oceanográficos - Condiciones de Tormenta. (API-RP-2A, 2000)

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

5.2.2.3 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 5.6, se da conocer las combinaciones de cargas utilizadas para este análisis.

Tabla 5.6. Tipos de carga y combinaciones.

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. En las Figura 5.3 se muestra el modelo de la plataforma marina generada mediante el empleo del software ANSYS (Ansys, 2010). De igual manera, la Figura 5.4 se muestra el modelo con condiciones de frontera, generado por ANSYS.

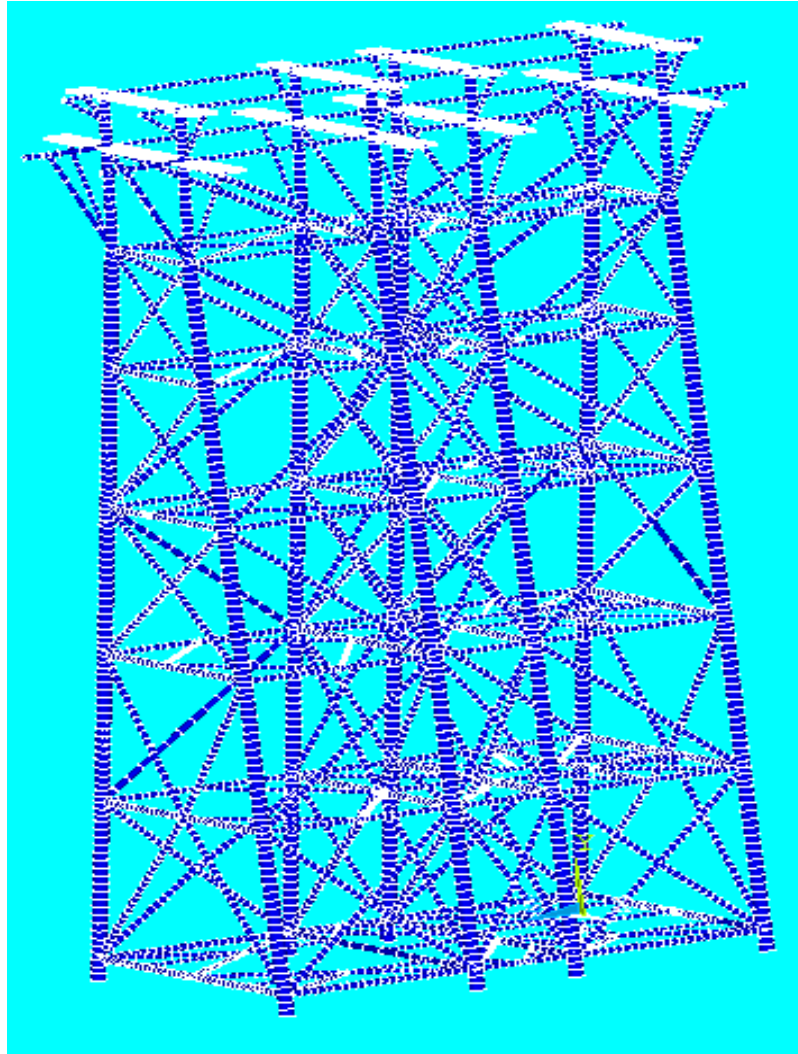


Figura 5.3. Elementos del modelo general. (Modelo generado por Ansys).

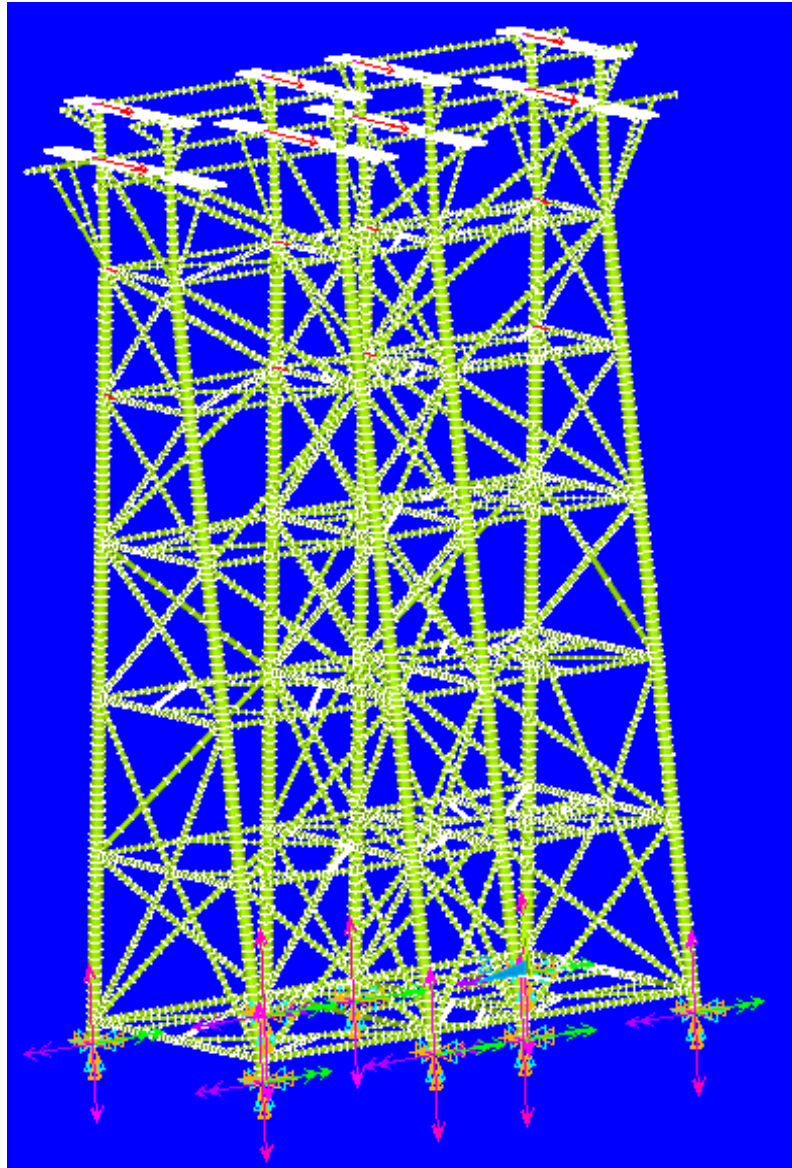


Figura 5.4. Modelo general con condición de frontera. (Modelo generado por Ansys).

5.3. Fases 3 y 4 de la metodología de investigación

En esta sección se presentan los resultados obtenidos correspondientes a las fases 3 y 4 de la metodología de investigación (ver Fig. 5.5.). En la sección anterior, correspondiente a la Etapa-1, se generó el modelo de la plataforma bajo estudio. Se definieron también las variables así como los valores correspondientes a las cargas.

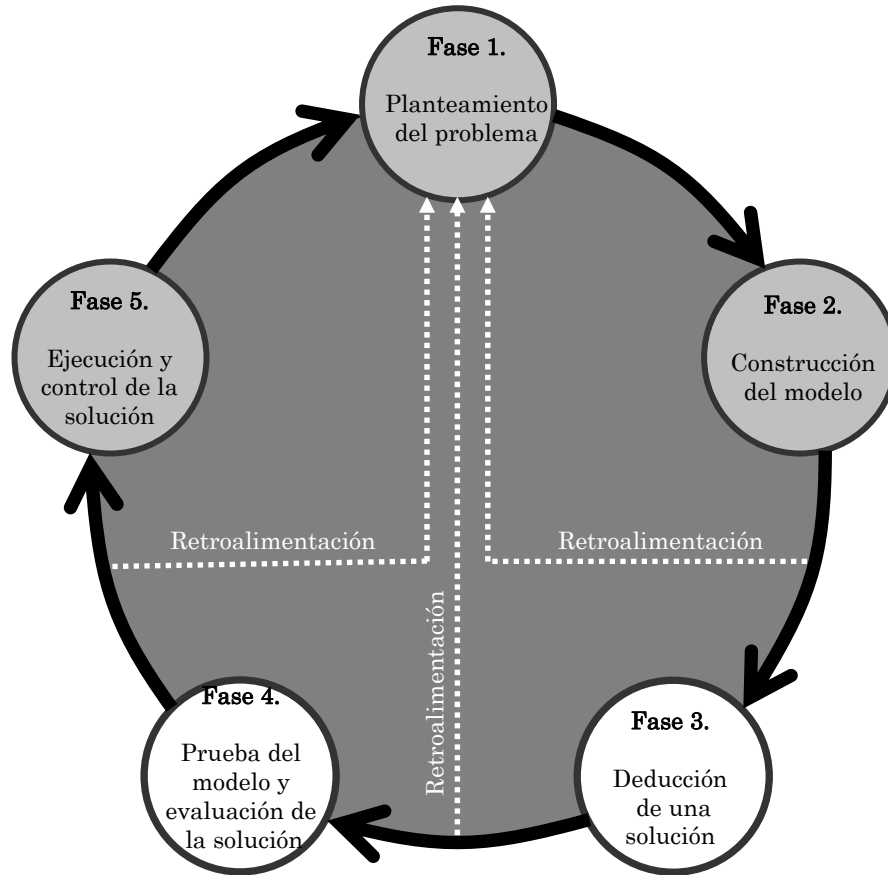


Figura 5.5. Fases-3 y 5: Metodología de investigación. (Adaptado de Ackoff y Sasieni (1975)).

5.4. Resultados del análisis estructural del caso de estudio

Después de llevar a cabo las simulaciones mediante el uso del software ANSYS, los resultados obtenidos se presentan en esta sección. (La Fig. 5.6, por ejemplo, muestra el resultado de la simulación gráficamente).

La Tabla 5.7 presenta un resumen de los resultados de los esfuerzos obtenidos; los resultados mostrados en la tabla corresponden a los elementos tubulares de la "pierna" de la plataforma. La Figura 5.7 muestra el comportamiento de dichos esfuerzos; dichos esfuerzos son comparados con el esfuerzo de fluencia del acero, grado B, así como la resistencia a la tracción, dado en la Tabla 5.1. Además, se tomó en consideración la relación de diámetro y espesor. Finalmente, los resultados obtenidos tienen una correlación con el parámetro matemático propuesto por Donnell; ver Figura 5.8.

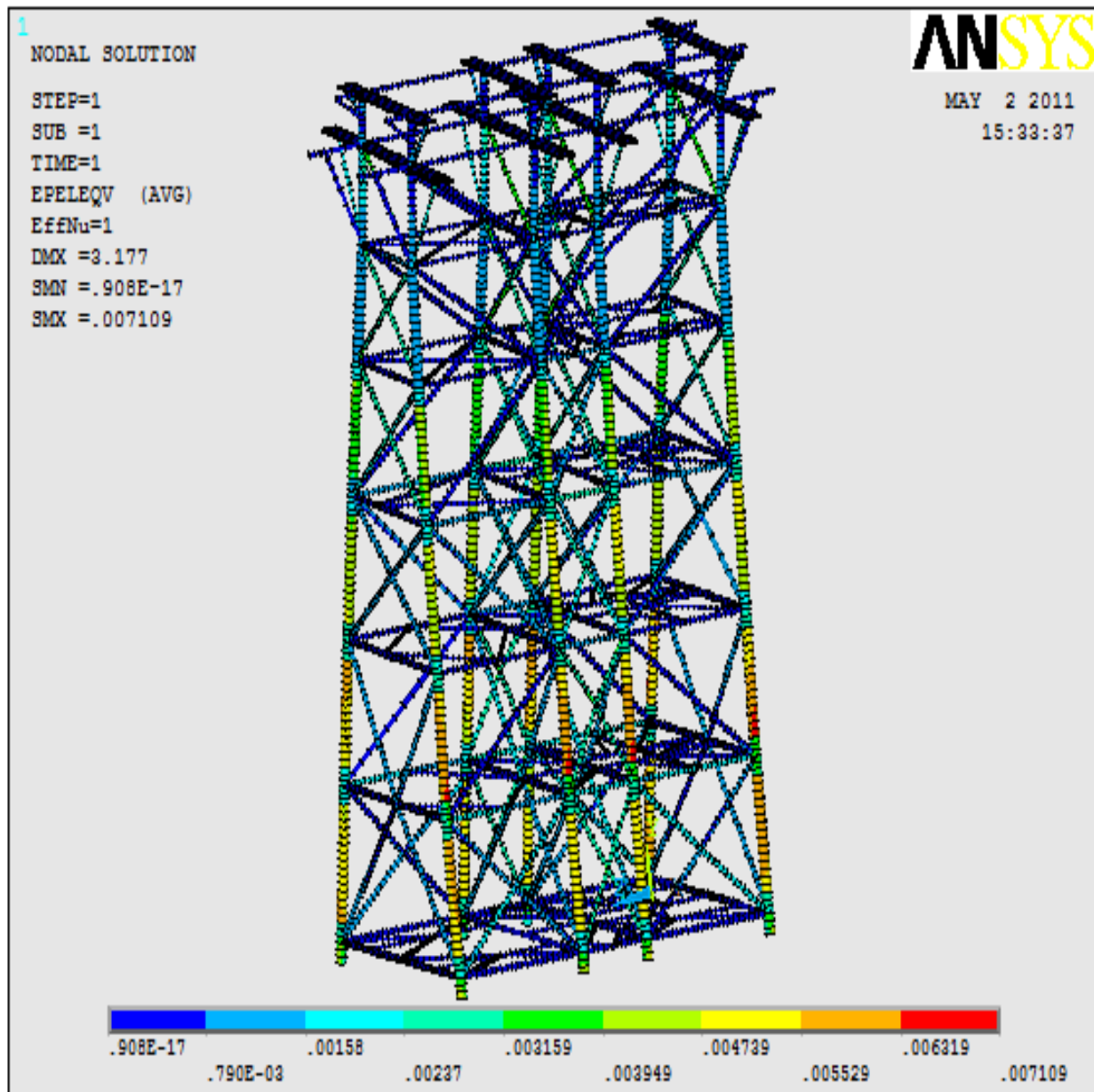


Figura 5.6. Resultados obtenidos de esfuerzos en los elementos estructurales de la plataforma bajo estudio.

En la Tabla 5.4 se muestran los esfuerzos de los elementos tubulares de la pierna de la plataforma PP-ZAAP-A y en la Figura 5.11, se 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 5.12.

Tabla 5.7. Esfuerzos en elementos tubulares de la plataforma fija bajo estudio.

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia-último Kg/cm ²
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

De modo que en la Figura 5.7, da a conocer la excedencia de esfuerzo en la parte superior del esfuerzo de fluencia, estos esfuerzos obtenidos por el software ANSYS, significan que están posiblemente en un estado crítico (ultimadamente podrían conducir al colapso de la estructura), constituyendo así al riesgo a la integridad estructural en su estado de operación de la plataforma marina. 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. En el Anexo-F, se muestran más resultados obtenidos en el análisis de los esfuerzos críticos del análisis estructural.

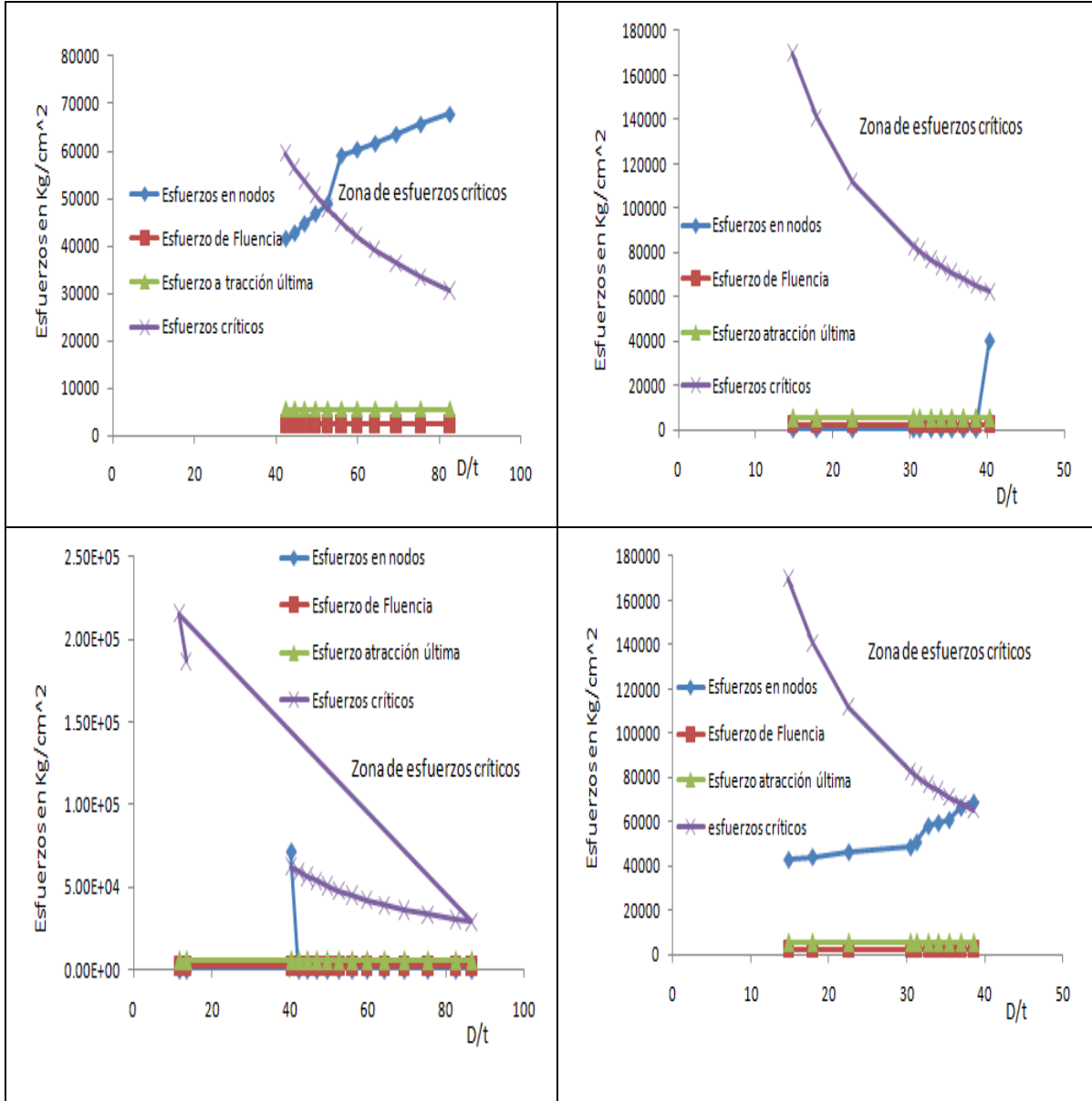


Figura 5.7. Comportamiento de esfuerzo críticos en los elementos estructurales tubulares de la plataforma.

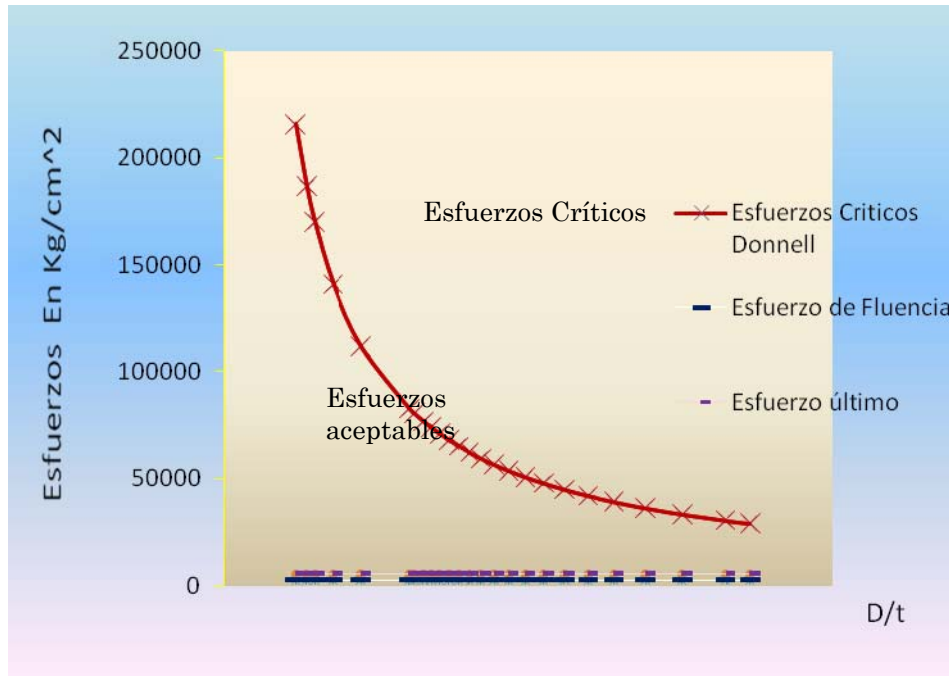


Figura 5.8. Parámetro matemático de Donnell.

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 critico, 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.

Tabla 5.8. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma.

σ_c	ϵ^p	β	τ	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

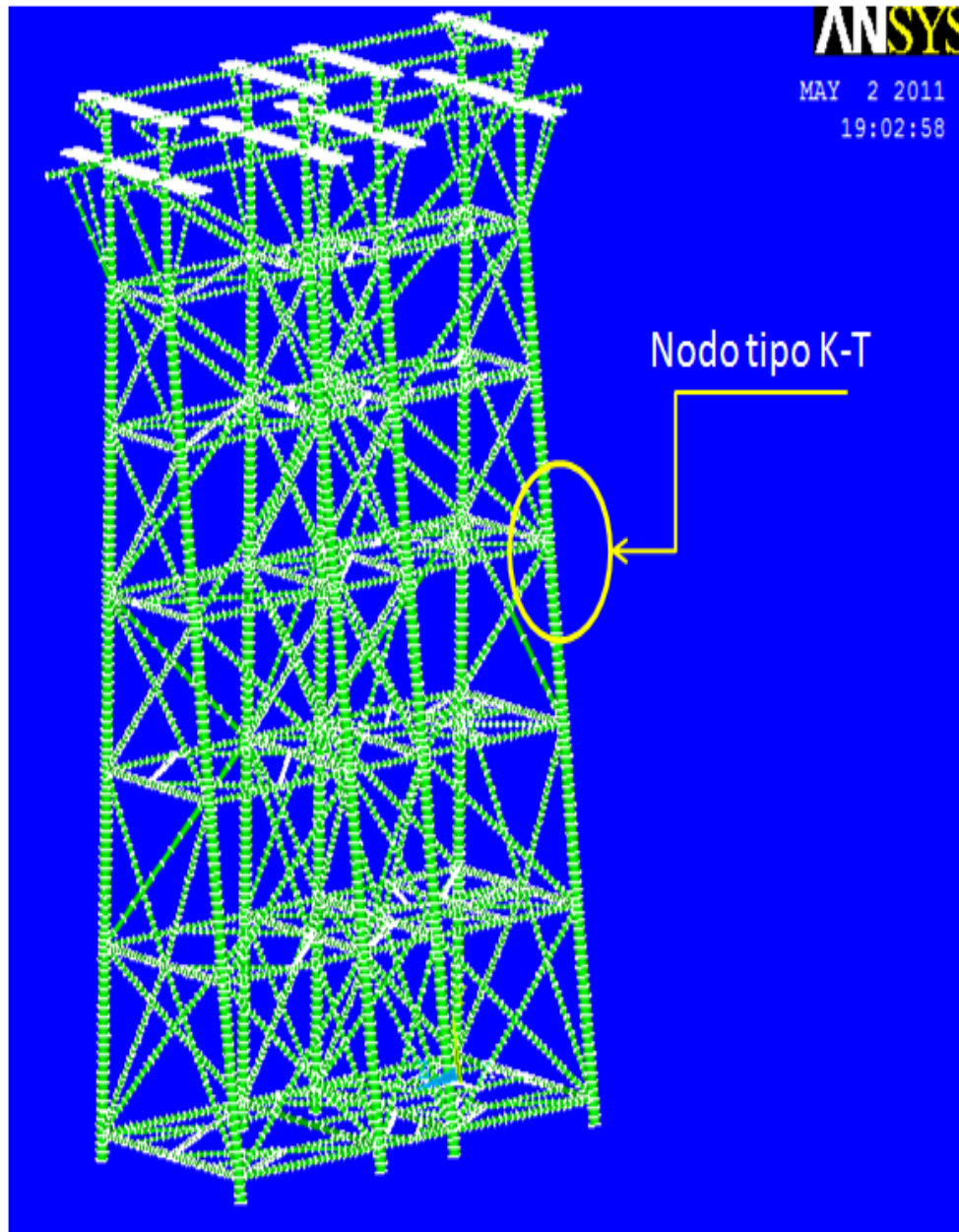


Figura 5.9. Modelo de plataforma generado por el software ANSYS

En la Tabla 5.8, se presenta un resumen de los resultados obtenidos de la deformación plástica debido a los esfuerzos de compresión y tensión al cual se encuentra sometido el nodo, por ejemplo, tipo "K-T" (ver Fig. 4.9, en el Capítulo 4) 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 bajo estudio (ver las Figs. 5.9, 5.10 y 5.11). En el anexo G, se dan a conocer mas resultados obtenidos del análisis de deformaciones plásticas.

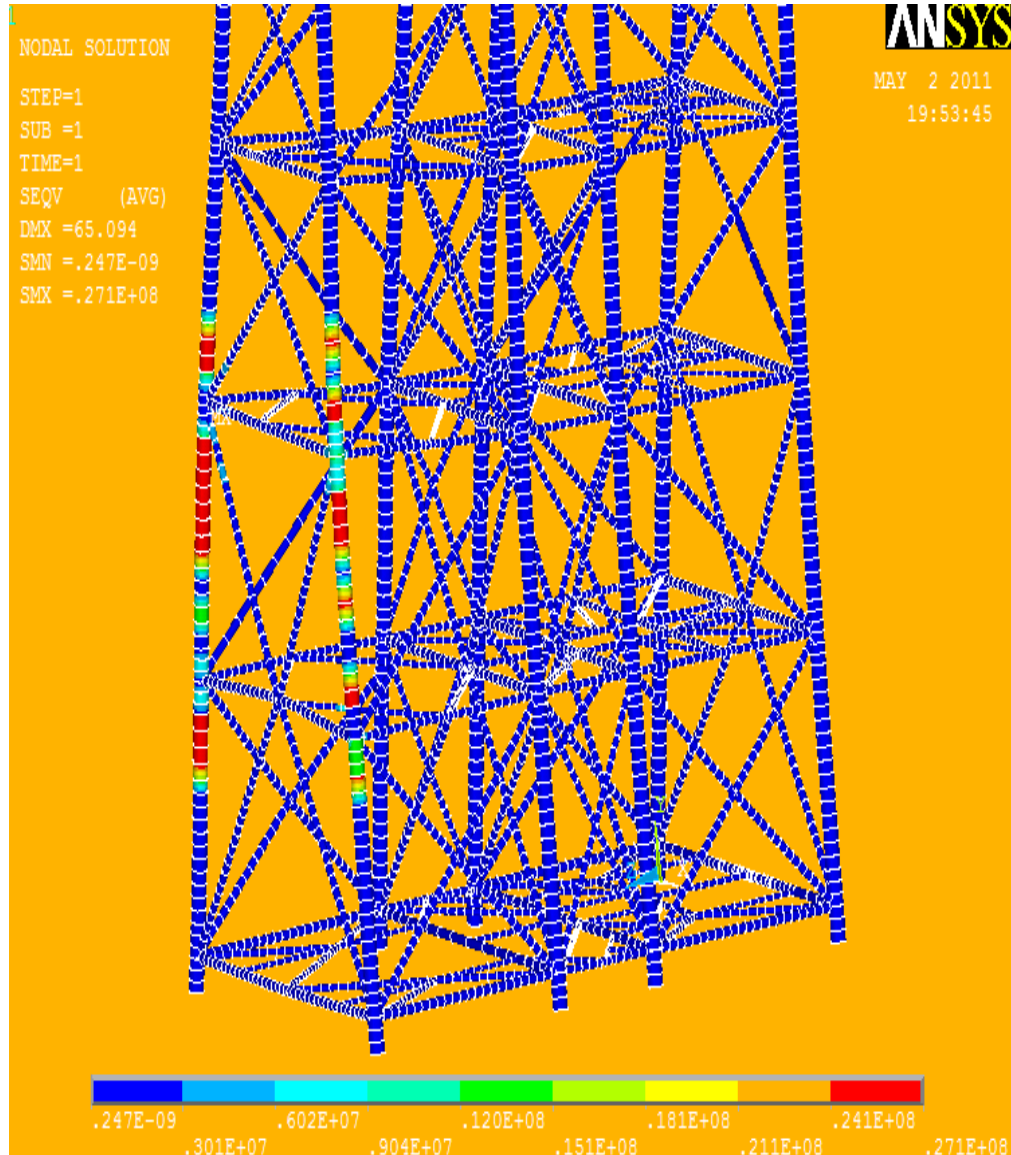


Figura 5.10. Deformación plástica en nodos estructurales tubulares de la Plataforma marina (modelo generado por el software ANSYS).

La Figura 5.1, "muestra" la distribución de los esfuerzos plásticos en la junta de tipo K-T de la Figura (ver Figura 5.6), 5.13 y 5.14; por otro lado, la Figura 5.15 muestra la tendencia de la deformación plástica debido al incremento de los esfuerzos a compresión alcanzando deformaciones superiores al esfuerzo de fluencia. Se observa un comportamiento logarítmico antes de llegar a la fisura que da origen a la grieta. Lo anterior puede conducir a un estado inaceptable en cuanto a la integridad de la estructura. (Ver Capítulo 6 para detalles de las técnicas de control de integridad estructural de plataformas marinas).

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 (ver por ejemplo

la Fig. 2.12 del Capítulo 2). Lo anterior puede generar la plastificación en el centro de la abolladura generada en el nodo o unión estructural de la relación β . La Figura 5.12 muestra el comportamiento de del esfuerzo a compresión sobre los espesores y muestran una tendencia a su debilitamiento y plastificación, de la relación β , corroborándose así que al alcanzar esfuerzos que sobrepasen la fluencia del acero, se manifestará 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.

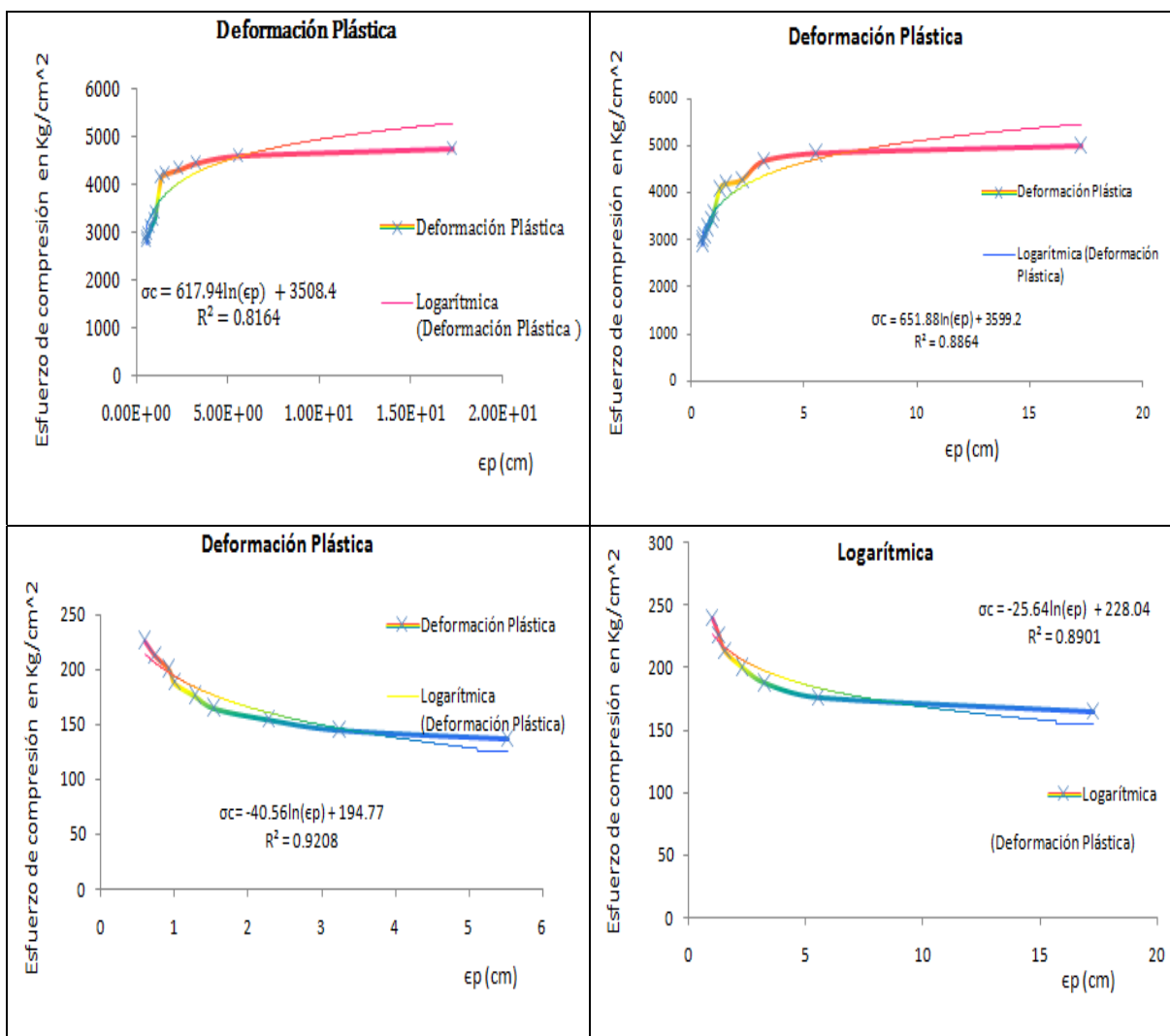


Figura 5.11. Deformación plástica en nodos estructurales.

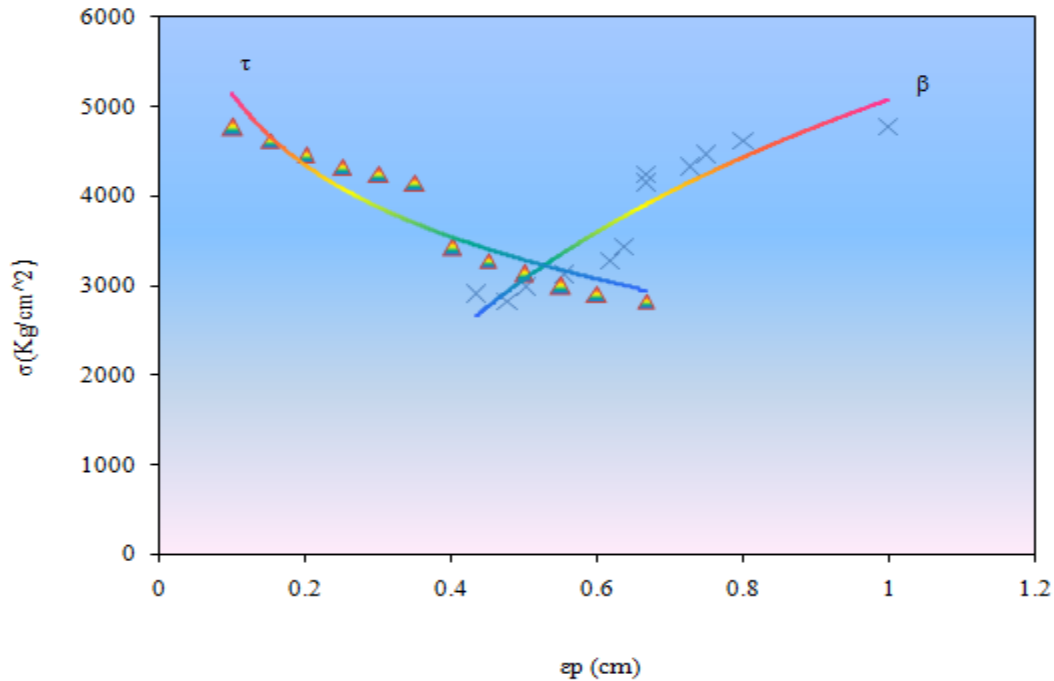


Figura 5.12. Deformación plástica en nodos estructurales relación diámetro y espesor.

En la Figura 5.13, 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 5.14 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, por ejemplo, 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 dramáticamente.

En la Tabla 5.9, se da a conocer los esfuerzos por deformación térmica, dichos esfuerzos se obtuvieron de la aplicación del software ANSYS.

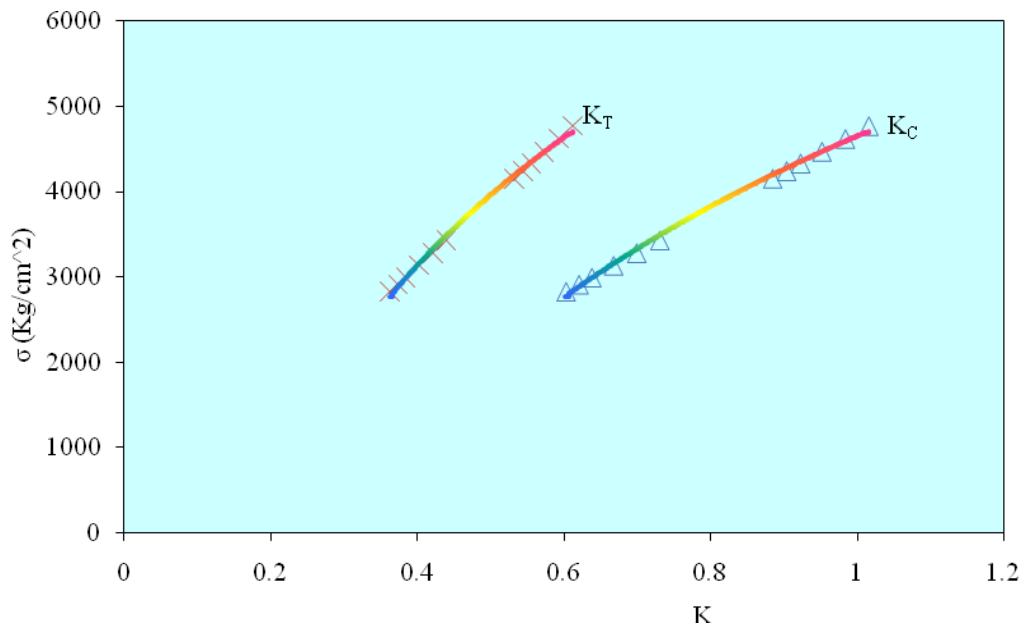


Figura 5.13. Factores de concentración de esfuerzos a compresión (K_C) y tensión (K_T) en la pared cilíndrica (ver Fig. 5.6).

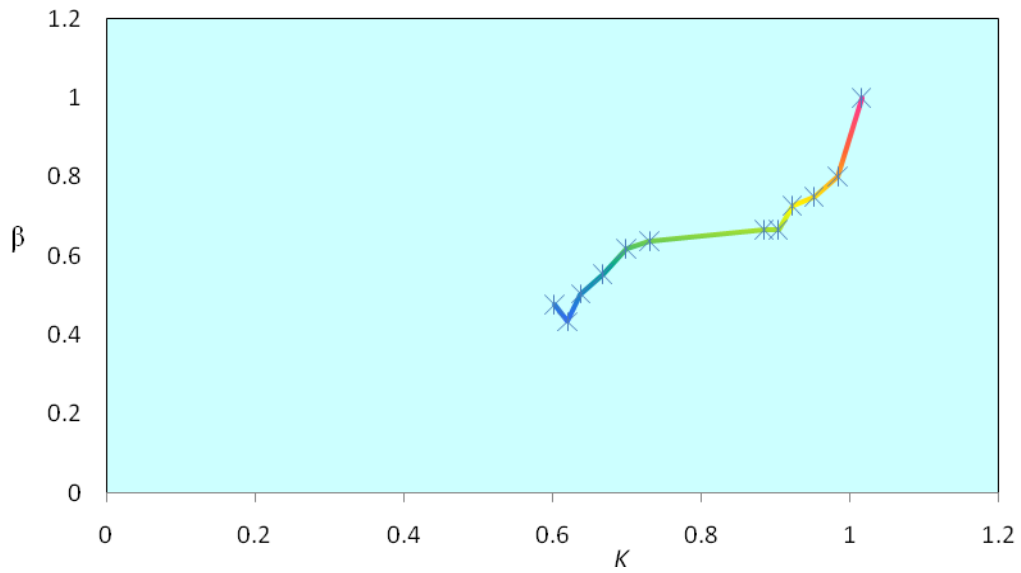


Figura 5.14. Factor de concentración de esfuerzo elástico en el nodo estructural

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 5.9. Esfuerzos de deformación térmica

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\epsilon r(cm)$	ϵ^{EPT}	σ_f	σ_T
4770.60627	0.1	0	0	0.31070768	2500	4200
4620.21532	0.5	1	5.523691598	0.74569837	2500	4200
4469.82437	1	2	1.618268887	1.1651536	2500	4200
4332.29996	1.5	3	0.760838939	1.54069885	2500	4200
4242.93722	2	4	0.383589581	1.65710699	2500	4200
4153.64479	2.5	5	0.255726368	2.01384515	2500	4200
3430.72766	3	6	0.166433479	2.15697788	2500	4200
3282.44597	3.5	7	0.132386558	2.62721125	2500	4200
3134.2346	4	8	0.091925293	2.64744843	2500	4200
2994.88216	4.5	9	0.066592223	2.67001518	2500	4200
2912.26909	5	10	0.049866622	2.69279758	2500	4200
2829.58571	5.5	11	0.046709095	3.39108032	2500	4200

En la Figura 5.15, 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.

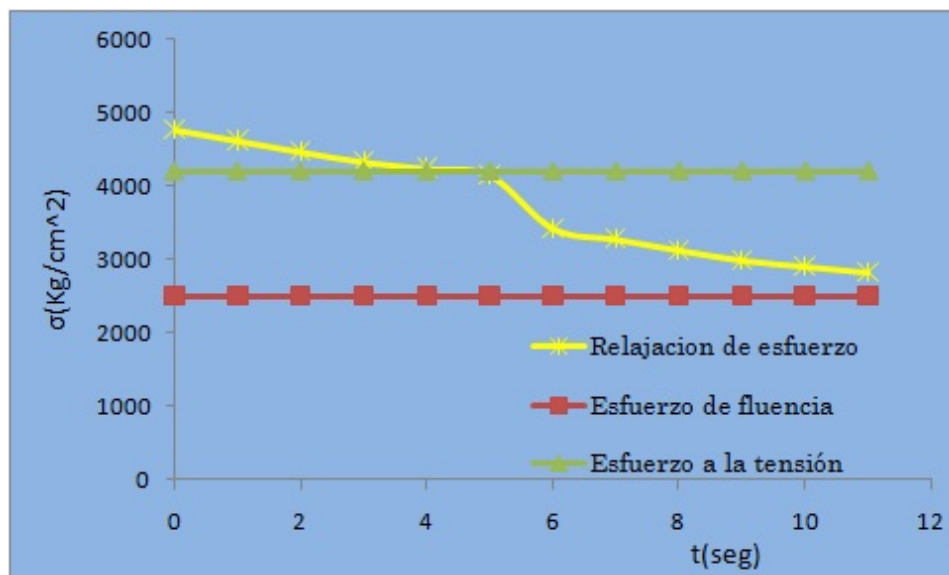


Figura 5.15. Esfuerzo de relajación.

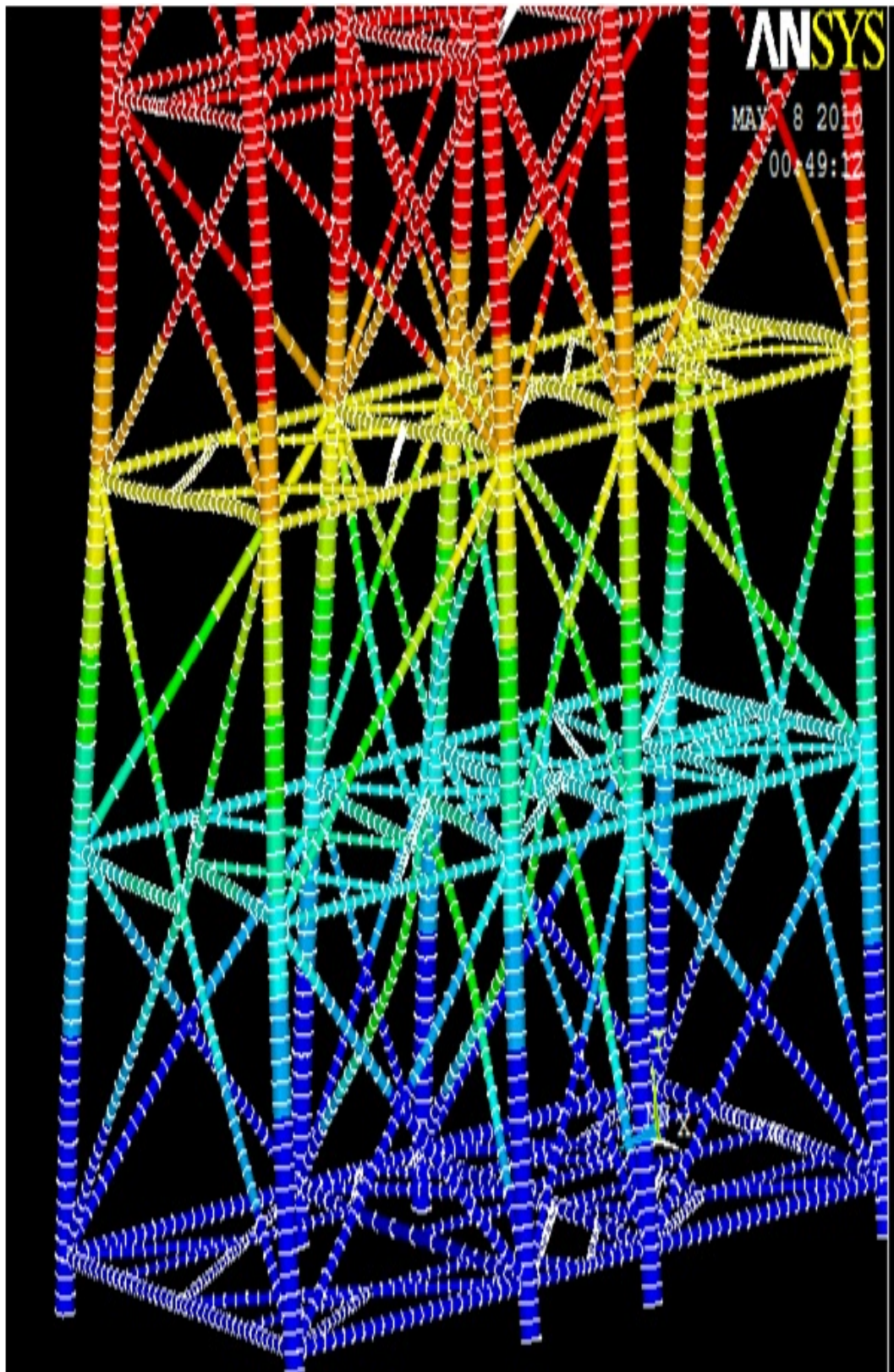


Figura 5.16. Esfuerzo térmico en los nodos estructurales.

Se observa, que a medida que se incrementa la forma de tensión y compresión estas van generando la plastificación y la recristalización 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 y el principio de la manifestación de fisuras al centro de la plastificación (la Fig. 5.16 muestra un ejemplo del mapa térmico en las zonas del nodo estructural). La Figura 5.17, muestra el esfuerzo térmico debido a la termo fluencia.

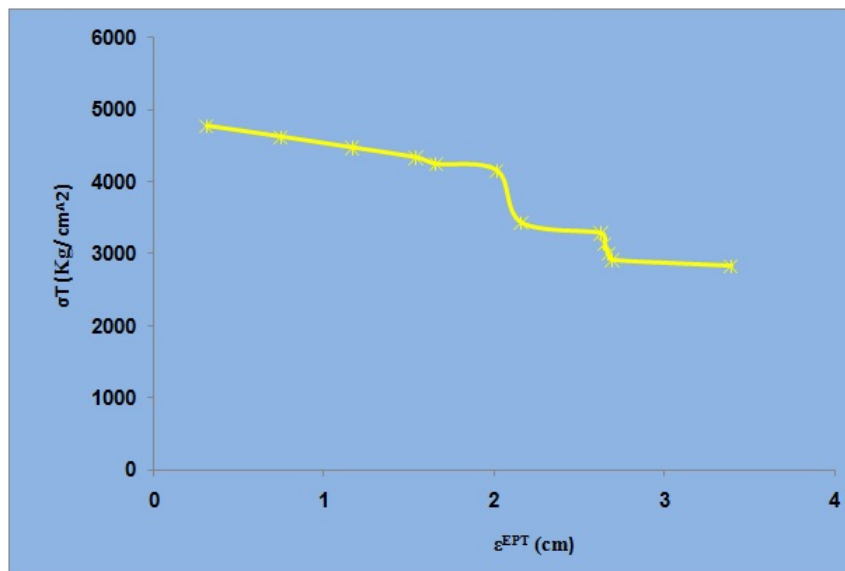


Figura 5.17. Esfuerzo de deformación térmica.

La Figura 5.18 muestra la termofluencia en los nodos estructurales a consecuencia de dicha temperatura generada debido a la excitación dinámica de las cargas externas.

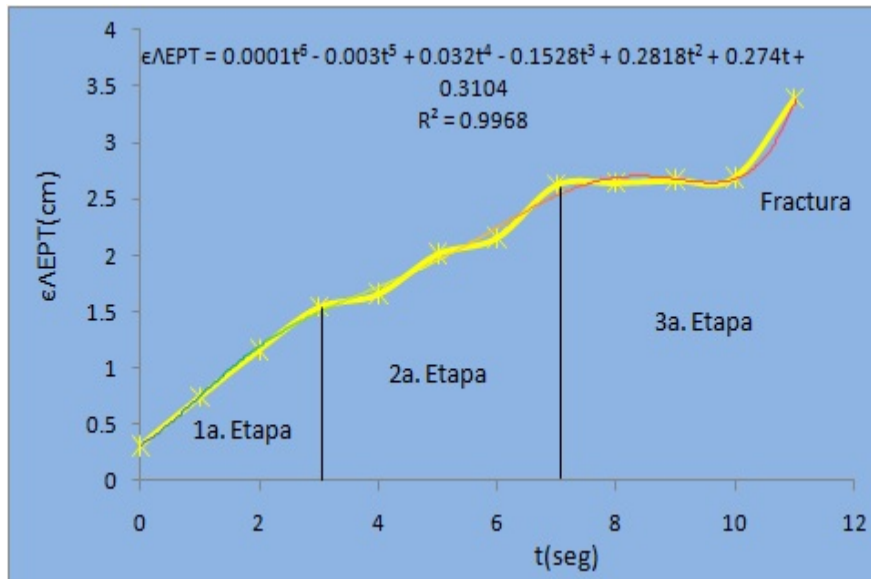


Figura 5.18. Termofluencia.

La Figura 5.18, 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 5.17, 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 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, como se muestra en la Figura 5.17, 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 5.19 y Figura 5.20, a consecuencia de la temperatura.

El Anexo-H, presenta resultados adicional con respecto a los esfuerzos térmicos. También se llevó a cabo un análisis estructural desde una perspectiva de sistemas complejos; los resultados se presentan en el Anexo-I.

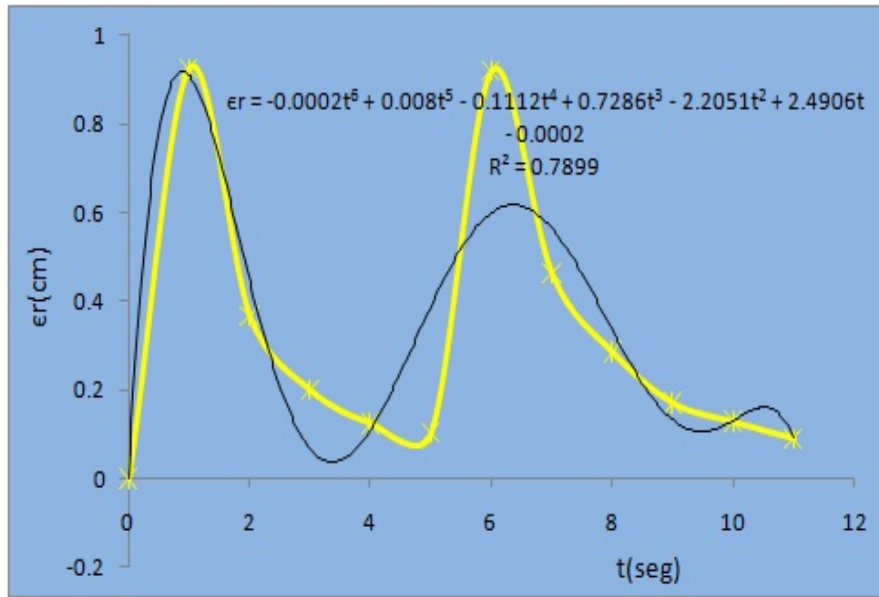


Figura 5.19. Rapidez de deformación.

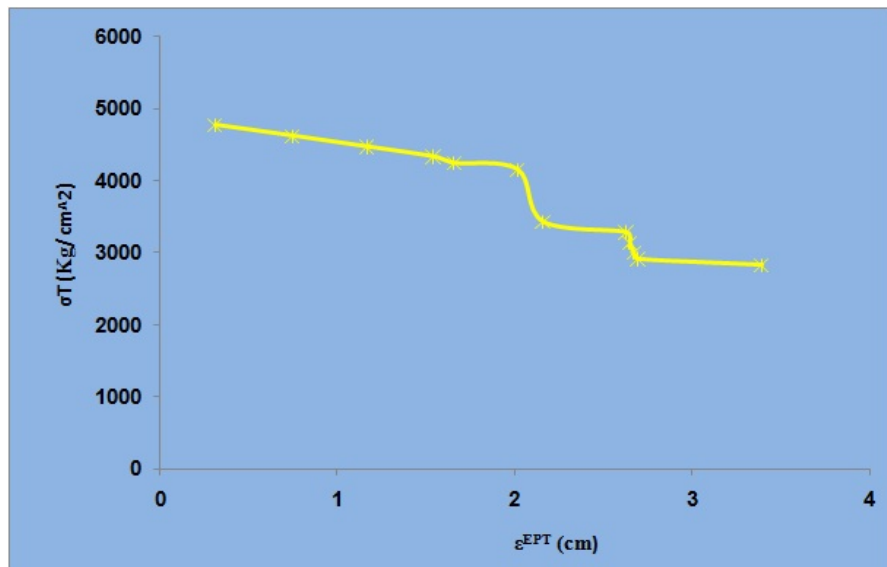


Figura 5.20. Esfuerzo de deformación térmica.

Se observa también (ver por ejemplo Fig. 5.18) que para $t = 15 \text{ seg}$ y con una deformación térmica del orden de 3.4, se aprecia una tendencia a la fractura en los nodos (mostrada como 3a etapa en la gráfica de la Fig. 5.18). Lo anterior implica la necesidad de reducir, por ejemplo, los tiempos de excitación dinámica en $t = 7 \text{ seg}$ y así obtener una deformación térmica del orden de 2.5 cm (ver 2a etapa en la gráfica de la Fig. 5.18). Esto implica un resultado conservador y posiblemente se reducirían los costos en la construcción de este tipo de estructuras. (en el contexto de la metodología de investigación, seguramente hay otros factores que pueden ser considerados antes de dar una solución al problema).

(De acuerdo a las normas de diseño como el API-RP-2A (2000), recomiendan una tolerancia de desplazamiento en el rango de $0.0 < \Delta < 5 \text{ cm}$).

5.5 Conclusiones del Capítulo

El capítulo ha presentado los resultados del análisis estructural de la plataforma marina bajo estudio. Las conclusiones más relevantes de dicho análisis se presentan en el Capítulo 7.

El diagnóstico de la técnicas de control de integridad estructural (IE) se presentan en el siguiente Capítulo.

INTEGRIDAD ESTRUCTURAL DE PLATAFORMAS MARINAS

Este Capítulo un diagnóstico de los principales riesgos de la integridad estructural (IE) de plataformas marinas, así como las diferentes técnicas del monitoreo de IE. El capítulo comienza con una breve introducción de la metodología de investigación en el contexto del Capítulo; esto se expone en la sección 6.1. La importancia de la IE se expone brevemente en la sección 6.2. Una revisión de los factores de riesgo de IE de una plataforma marina fija se presenta en la sección 6.3. El diagnóstico de las ventajas, limitaciones así como la gestión de la IE se expone en las secciones 6.4 a la 6.8. Por ejemplo, la sección 6.4 presenta los resultados de la capacidad de control de IE de las técnicas existentes. Las limitaciones de las técnicas existentes se expone en la sección 6.5. La sección 6.6 se presentan los mecanismos de daño de las estructuras. Los componentes estructurales de una plataforma que son difíciles de inspeccionar se presentan en la sección 6.7. Una propuesta de modelo de gestión de integridad estructural se expone brevemente en la sección 6.8. Finalmente, las conclusiones más relevantes del Capítulo se exponen en la sección 6.9.

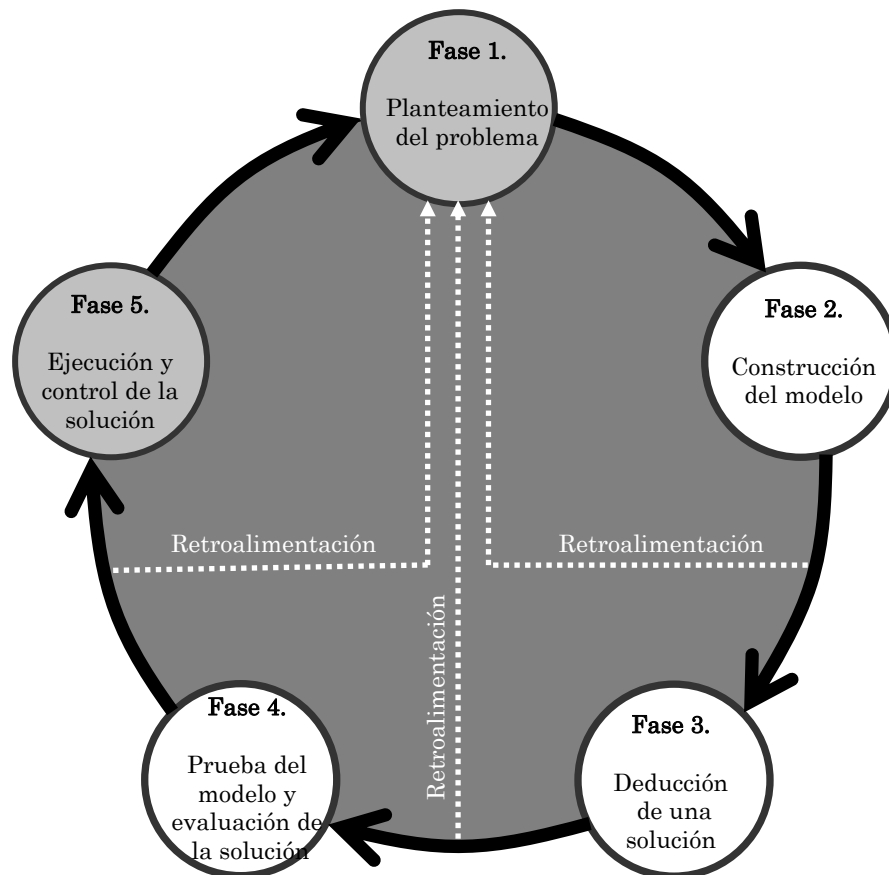


Figura 6.1. Metodología de investigación en el contexto del Capítulo.

6.1 La metodología de investigación en el contexto del Capítulo

La Figura 6.1 muestra la metodología de investigación para el presente proyecto de investigación. En el contexto de este Capítulo, se puede argumentar que se abordan las etapas 1-4; aunque no cubre la etapa 2 explícitamente. Sin embargo, se asume que las técnicas existentes de control de la integridad estructural (IE) de estructuras de alguna manera cubren, en principio, todas las fases de la metodología.

Dado lo anterior, en las subsecuentes secciones se procede a llevar a cabo el diagnóstico del estado del arte en cuanto a las tecnologías de IE existentes en la actualidad.

6.2 La importancia de la integridad estructural (IE)

En el Capítulo 2 se mencionó la importancia que tiene la industria del petróleo y gas en las economías de los países que poseen dichos recursos naturales. En el Capítulo 4 se describió brevemente los pozos petroleros existentes en la Sonda de Campeche, así como el número de instalaciones petroleras costa fuera existentes en dichos campos (ver por ejemplo, Tabla 4.1, del Capítulo 4). Algunas de las estructuras están llegando o han excedido su vida de diseño original y esto plantea nuevos desafíos para la gestión de la integridad estructural (IE) de las plataformas marinas. (Aunque se puede argumentar que todas las plataformas marinas existentes en la Sonda de Campeche son nuevas; sin embargo, eventualmente todas ellas sin excepción van a llegar a exceder su vida útil de diseño). La IE, en general, puede ser definida como la capacidad de una estructura para llevar a cabo sus funciones con eficacia y eficiencia en un período de tiempo definido, sin comprometer la salud, seguridad (del trabajador/operario) y el medio ambiente. (Ver por ejemplo DE, 1991).

Además, se puede argumentar que el monitoreo activo de la IE puede, en combinación con otros métodos y/o técnicas, contribuir al funcionamiento seguro y continuo de una estructura que ha superado su vida de diseño original. (DE, 1991).

En algunos países existen regulaciones que obligan de alguna manera a las organizaciones petroleras a cumplir con el requisito de mantener la IE durante la vida útil de una instalación. Lo anterior puede lograrse mediante una estrategia bien definida de gestión de la integridad estructural de dichas instalaciones (ver Sección 6.3 para detalles de un modelo de gestión de IE). Dichas medidas permiten lograr el monitoreo de la IE a través de evaluaciones periódicas y la realización de cualquier trabajo de reparación en caso de cualquier daño o deterioro que se hayan identificado. Esta estrategia incluye las herramientas de inspección, tales como los métodos de implementación, las frecuencias de inspección, etc. También se debe incorporar la comprensión de la criticidad de los elementos estructurales en términos de redundancia de plataforma entre otros aspectos. Los costos de la inspección en alta mar pueden ser importantes y las maneras de reducir estos, sin dejar de cumplir con la seguridad y son aspectos que tienen que ser considerados.

Esta sección cubre una revisión exhaustiva del estado del arte de los métodos existentes de monitoreo de la IE de estructuras.

6.3 Revisión y evaluación de métodos existentes de control de la integridad estructural

Tal y como se mencionó anteriormente, el objetivo primordial es la de llevar a cabo la revisión de las técnicas de control de IE existentes es con la finalidad de identificar su posible aplicabilidad y servir de complemento a las prácticas existentes en el contexto de instalaciones costa fuera. El monitoreo de la IE puede ayudar en el cumplimiento de la

obligación de gestionar la IE de dichas instalaciones. Además, el uso del monitoreo en tiempo real puede proporcionar valiosos datos estructurales, así como ahorro de costos si la técnica se puede servir de complemento o bien sustituir a los métodos existentes de inspección en alta mar. (Ver Anexos J y K para detalles adicionales sobre IE).

En general, el monitoreo de la IE puede contribuir como un complemento a las técnicas convencionales de inspección; en esta sección dichas técnicas han sido evaluadas bajo los siguientes criterios comparativos: a) sensibilidad/efectividad de la técnica; b) beneficios en cuanto a salud y seguridad del trabajador; y c) reducción de costos. (Dichos criterios han sido adoptados de las guías que han sido publicadas; por ejemplo API, 1997, entre otros).

6.3.1 Método de control de IE

Los métodos o técnicas identificados de monitoreo de la IE existentes se listan a continuación. (API-RP-2A, 2000; ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

- a) Monitoreo de emisiones acústicas (MEA)
- b) Detección de fugas (DF)
- c) Monitoreo de espacio de aire (MEA)
- d) Monitoreo por sistema de posicionamiento global (SPG)
- e) Monitores de índices de fatiga (MIF)
- f) Monitoreo continuo de 'miembro' inundado (MCMI)
- g) Monitoreo de frecuencia natural de respuesta (MFNR)
- h) Toma acústica de huellas dactilares (TAHD)
- i) Control de la cadena de amarre ("mooring") (CCA)
- j) Monitoreo de tensión (MT)

A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de las técnicas listadas.

6.3.1.1 Monitoreo de emisiones acústicas (MEA)

La emisión acústica (EA, por sus siglas en inglés) se basa en el principio de detección de patrones característicos de sonidos que pueden indicar la presencia de anomalías estructurales. Lo anterior se logra mediante un arreglo de sensores. La técnica tiene numerosas aplicaciones, aunque los más relevantes para las plataformas costa fuera es la detección de la iniciación de fisuras por fatiga y el control de la grieta. Por otro lado, es importante destacar que la técnica MEA se ha usado durante más de una década en la industria petrolera costa fuera y la técnica es generalmente considerada como adecuada para el control estructural de los miembros críticos. Debido a los costos asociados con la técnica sólo se ha utilizado para aplicaciones específicas de 'criticidad alta', y no como una técnica de la supervisión general de IE. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

En general, su confiabilidad es alta y el sistema requiere de un mantenimiento periódico y de una calibración especializada. De acuerdo a la revisión de la literatura, sus limitaciones son los datos, que pueden ser difíciles de interpretar. Además, el sistema puede ser propenso al ruido del fondo marino que puede afectar a su precisión y así se reduce la probabilidad de detección. El sistema puede ser parcialmente sensible a cualquier actividad, tales como trabajos de mantenimiento en la vecindad local debido a las emisiones acústicas creadas. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.2 Sistema de detección de fugas (DF)

En su forma más simple, este sistema de control utiliza un sensor para detectar agua y luego se envía a una alarma a través de una unidad audible/visual. Su propósito es la detección de la entrada de agua en zonas, por lo general, en plataformas semi-sumergibles. Un sistema secundario, como un sistema de circuito cerrado de televisión suele ser necesario para identificar la causa de la entrada de agua, por ejemplo, una violación de la integridad del 'casco' de la tubería. Estos sistemas simples de alarma se han utilizado durante varias décadas en la industria petrolera costa fuera para advertir de alta el agua de sentina en los cascos de buques; también han sido usados en las plataformas semisumergibles costa fuera.

La tecnología parece ser relativamente bien establecida y el sistema se considera como el de tener una buena confiabilidad. Por otro lado, el sistema cuenta con una serie de opciones de sensores, algunos de los cuales pueden detectar los niveles de agua de hasta 3 mm (medida desde el nivel del suelo). Algunas de sus limitaciones consiste en que algunos componentes del sistema (sensores) para que funcionen adecuadamente tiene que contar con un medio ambiente limpio. Además, dicho sistema puede ser afectado por la condensación o el medio de ambiente húmedo. El sistema necesita de un cableado extenso. Los sistemas inalámbricos no están bien adaptados a los ambientes de las plataformas semi-sumergibles. Finalmente, los sistemas modernos de sensores de agua no tienen partes móviles; por lo tanto, requieren poca o ninguna actividad de mantenimiento. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.3 Monitoreo del Aire (MEA)

La cámara de aire se define como la diferencia positiva entre el punto más bajo de la parte inferior y altura de la cresta de una ola extrema para un periodo de retorno dado (a menudo 100 años). El propósito para el control de la cámara de aire es determinar si las bases de la plataforma están sufriendo algún hundimiento. El objetivo principal de esta técnica consiste en medir el espacio de aire en los intervalos especificados, por ejemplo, cada 3 años. En general, dichos sistemas tienen una importante aplicación para las regiones de actividad sísmica o plataformas que se sabe que están en un riesgo constante debido a las condiciones locales.

Dicha técnica se ha aplicado por más de una década en la industria costa fuera. El sistema es de buena confiabilidad. El uso de este método es con una precisión de hasta 50 mm. Además, ningún tipo de mantenimiento es requerido para el sistema de medición. Una de las limitaciones es de que se requiere de un contratista altamente especializado para llevara acabo las mediciones. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.4 Sistema de Posicionamiento Global (SPG)

La posición de una estructura, por ejemplo, flotante se puede controlar mediante un sistema de posicionamiento global (SPG). La tecnología básica de un SPG no es nueva, pero ha tenido una aplicación importante en los últimos años en diferentes industrias. Por ejemplo, la red de SPG del Departamento de Defensa de los EE.UU., tiene precisión en tiempo real en la región de la horizontal de 10 metros. Estos sistemas requieren un hardware en forma de un receptor SPG y una interfaz de usuario. El propósito de esta tecnología es especialmente útil para cualquier estructura flotante, donde la colocación exacta es importante. En el contexto de este proyecto de investigación, una aplicación en el caso de

semi-sumergibles, donde la ubicación de la estructura se puede controlar y generar una alarma si se excede de una desviación predefinida permisible. Esto permite alertar al operador de cualquier problema significativo. (Ver la siguiente sección en relación a factores de riesgo estructural asociados con las colisiones; ver también las causa de accidentes de plataformas en el Anexo-A).

Es una tecnología madura y que no hay problemas con su confiabilidad; además, tienen una precisión muy alta. Por ejemplo, hay sistemas que ofrecen una precisión del orden de 1 metro. Finalmente, los requisitos de mantenimiento son generalmente mínimos.

6.3.1.5 Medidor de fatiga (MIF)

CrackFirst es un sistema de censor de daños por fatiga el cual fue diseñado específicamente para las estructuras de acero soldado y fue patentado en 1990. El propósito del diseño de los sensores es tal que el grado de crecimiento de la grieta en la placa de apoyo es proporcional al daño acumulativo de fatiga para una unión soldada, sometidos a la misma carga. Esto podría proporcionar un registro representativo de daños acumulativos de fatiga que ocurre en una estructura (suponiendo que el censor puede ser ubicado cerca de la punta de soldadura). Además, su operación remota es posible, y los datos pueden ser descargados a través de una conexión inalámbrica. La disponibilidad de datos sobre la fatiga podría mejorar, entre otras cosas, la programación del mantenimiento y el establecimiento de los intervalos de inspección. Casi no se tienen aplicaciones de esta técnica en la industria del petróleo costa fuera. No hay información disponible en cuanto a su confiabilidad, así como el mantenimiento del sistema. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.6 Detección continua de inundación (MCMI): control interno

El propósito de este sistema es la detección continua por defectos de pared (del material). No ha sido aplicado a la industria costa fuera. De acuerdo a la literatura, una de sus limitaciones es que sólo es aplicable a construcciones nuevas. Además, se aplica en instalaciones ubicadas en aguas salinas. Por otro lado, los elementos estructurales de la zona de salpicaduras son difíciles de controlar. Finalmente, su confiabilidad no ha sido probada en la práctica.

De acuerdo a la revisión consultada, la precisión del sistema depende de que si los dispositivos están correctamente instalados, su precisión podría ser elevado. El mantenimiento, por otro lado, del equipo submarino no es posible una vez instalado. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.7 Detección continua de inundación (MCMI): control externo

El funcionamiento del sistema consiste en que un dispositivo se fija en la parte exterior de un miembro tubular de la estructura nominalmente seco. El dispositivo transmite una señal de frecuencia acústica a través del miembro y detecta la atenuación de la señal a intervalos regulares. Una señal muy atenuada podría indicar la presencia de agua en el interior del miembro. Cuando se detecta un cambio, el dispositivo envía una señal de alarma a través del acero o el agua que se indica en un cuarto de control. El propósito del sistema es la detección continua de los defectos a través de la pared de la estructura. No se tienen evidencias de su aplicación en la industria costa fuera.

Su confiabilidad no ha sido probada todavía. Por otro lado, su precisión podría ser elevada si los dispositivos son instalados correctamente, la exactitud podría ser de hasta aproximadamente el 90%. Sin embargo, la preocupación por la deriva de la señal, la solidez de sujeción y el tratamiento electrónico y la interpretación de la señal podría erosionar significativamente. El mantenimiento de dicho sistema podría ser mediante el empleo de Remote Operating Vehicles (ROVs) o bien un buzo. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.8 Respuesta de frecuencia natural (MFNR)

El propósito del sistema es el de dar un seguimiento continuo de monitoreo para la detección de cualquier cambio en la frecuencia de los miembros o componentes de una plataforma. Por lo general, el análisis de elementos finitos (AEF) se lleva a cabo junto con la medición para ayudar en la identificación de forma que se corresponde con el modo que la frecuencia. Grandes daños estructurales a la plataforma se refleja en un cambio en la rigidez de balanceo en uno o más modos. Esto se traduce en una reducción en la frecuencia de la plataforma de balanceo natural que es detectado y reportado por excepción. El método se puede utilizar para detectar pre y post-efectos de los incidentes, como una tormenta extrema, un terremoto, una colisión de buques o de un objeto caído. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

La técnica ha sido ampliamente usada en la industria costa fuera; se ha aplicado desde finales de 1970 en una serie de plataformas en casi todo el mundo. Una de las limitaciones del método es que sólo es lo suficientemente sensible para detectar cambios en la frecuencia de aproximadamente 0,5%. Esto significa que el método no puede detectar daños menores, tales como defectos pequeños. Como se mencionó anteriormente, el MFNR, por lo general, debe ir acompañada de análisis de elementos finitos (AEF; ver Anexo-E), que identifica los cambios esperados en la frecuencia de ruptura de cada miembro. Si el AEF predice que los miembros tienen los cambios de frecuencia de menos de 0.5%, entonces esto puede ser un falla indetectable. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.9 Huellas acústico dactilares (TAHD)

El propósito de esta técnica es la de llevar a cabo un monitoreo continuo de la IE para ser adaptado a cualquier plataforma. Su funcionamiento se base en el complejo comportamiento de las señales acústicas a través del acero, con reflexiones y refracciones que ocurren en los cambios de sección y de los ganglios. Esta técnica implica que la transmisión de las señales acústicas en una estructura de cubierta, localizadas en lugares por encima del nivel máximo de agua. Los receptores de las señales (se encuentran también por encima del nivel del agua) y al "escuchar" a la señal que se devuelve, entonces se transmite e interpretan los cambios en el diagnóstico de los daños causados por el cambio en la señal. La técnica no ha sido probada en estructuras costa fuera y tanto su confiabilidad como su precisión no han sido probadas. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.10 Control de cadena de amarre ("mooring") (CCA)

El propósito de esta técnica es controlar la posición de las bandas y cadenas del ancla y alertar al operador de cualquier desplazamiento fuera de los límites predefinidos. La técnica es ampliamente utilizada en la industria costa afuera. El número de haces, haz resolución,

el rango, el tipo de transductor, etc. se puede modificar para adaptarse al entorno de cualquier aplicación particular. El sistema permite el control simultáneo de todas las posiciones vertical y ancla con cadena, proporcionando mediciones de alta precisión de las posiciones absolutas y relativas. El sistema requiere un mantenimiento relativamente mínimo. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.1.11 Monitoreo de tensión (MT)

El propósito de la técnica es la controlar las variaciones de esfuerzos locales para proporcionar información sobre la cargas locales estructurales y/o el régimen de estrés local y hace hincapié en puntos calientes; además, se puede determinar a partir de modelos numéricos. El monitoreo de tensión en las áreas de gradientes de estrés fuerte (por ejemplo, en las concentraciones de tensión); en general, no se lleva a cabo debido a la sensibilidad de los resultados a la ubicación del medidor. La técnica se aplica ampliamente en muchas industrias, incluida la industria petrolera costa fuera.

Algunas de las limitaciones de la técnica son las concernientes a: a) el equipo puede ser sensible a los daños causados por el medio ambiente; b) el equipo requiere de calibración y puede ser sensible a la deriva con el tiempo; c) sensible a la posición del indicador en las zonas con pendientes de estrés pronunciadas. Por otro lado, tanto su confiabilidad como su precisión son elevadas. Finalmente, requiere de un mantenimiento periódico para garantizar la integridad y la conexión de los medidores de tensión. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.2 Evaluación de riesgos, consecuencias y técnicas de control de IE

En esta sección se presentan los resultados de la revisión de la literatura que se llevó a cabo en relación a la identificación de los factores de riesgo asociados con la integridad estructural de plataformas marinas fijas. Los resultados se resumen en la Figura 6.2. Las medidas de prevención, mitigación y control se discuten muy brevemente; las consecuencias de cada riesgo se enumeran y técnicas pertinentes de control de IE revisadas en la sección anterior para monitorear estos se identifican y se resumen en la Tabla 6.1.

A continuación se discuten muy brevemente cada una de las factores de riesgos mostrados en la Figura 6.2.

6.3.2.1 Clima extremo

El clima extremo es un factor de riesgo a la integridad de una estructura de plataformas marinas; esto es, implica una combinación de tres componentes como son: las olas, corrientes y el viento. La carga ambiental debido a la acción combinada de estos tres factores constituye una condición de carga que se requiere considerar para el diseño de estructuras costa afuera de tipo fijo (conocidas también como "Jacket"). (En el análisis llevado a cabo en el Capítulo 5, la carga ambiental se consideró constante; sin embargo, dicha carga tiene que ser considerada desde un punto de vista probabilístico). Por lo consiguiente constituye un riesgo significativo para las instalaciones costa fuera de los pozos petroleros en la Sonda de Campeche.

En la actualidad, el diseño de estructuras de plataformas marinas se basa en la práctica de la American Petroleum Institute (API, por sus siglas en inglés), RP 2A (1993, 2000); la cual

se basa en la altura de las olas de "100 años de periodo de retorno" que actúan junto con vientos "asociados" y las condiciones de corrientes "asociados". En general, la mayoría de las estructuras costa afuera son diseñados en base a una altura de retorno de 50 años de olas en combinación con 50 años de viento y la corriente de 50 años. Ver por ejemplo los siguientes reportes de investigación (Hambly y Nicholson (1991); Carlsen, et al., (1986); Carter (1982); Daghigh, et al., (1997); Elzinga, y Tromans (1992); Hambly, et al., (1990); Harland, et al., (1997); Rodenbusch (1986); entre otros).

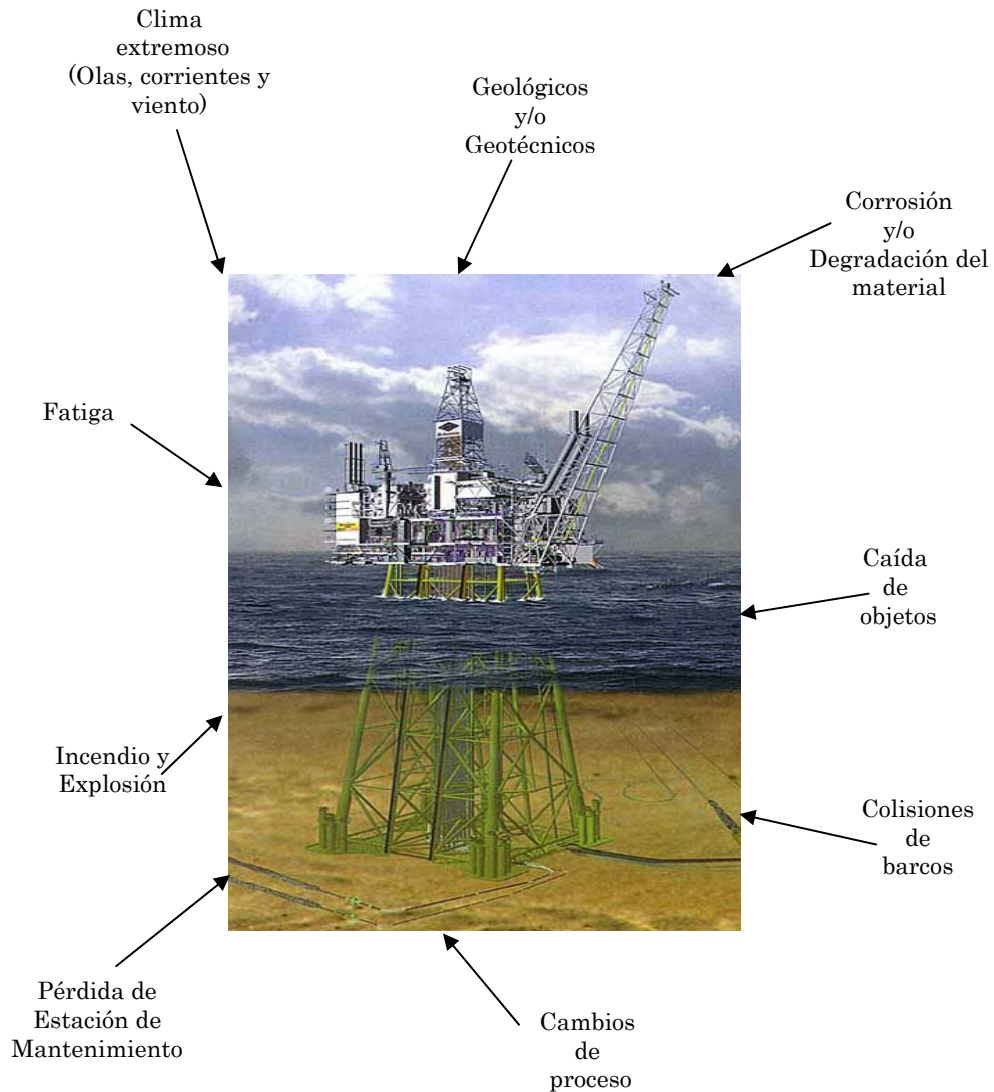


Figura 6.2. Riesgos estructurales de plataformas marinas costa fuera.

6.3.2.2 Incendio y Explosión

Después de varios accidentes de explosión e incendio ocurridos en las últimas décadas, los riesgos asociados con incendios y explosiones son ahora reconocidos como una de las amenazas más importantes en instalaciones costa fuera (ver por ejemplo el desastre de Piper Alpha, Touger, (2001)). En general, los incendios y las explosiones se deben principalmente a las fugas de hidrocarburos por lo que a gestión estas fugas es un tema que debe de ser de alta prioridad en este tipo de instalaciones. La gestión de los riesgos se puede

lograr a través del diseño de procesos, así como la protección "pasiva" y "activa" contra incendios son de vital importancia. Las consecuencias del fuego y la explosión dependerá de la naturaleza del incidente. Incendios tipo "Jet" ("Jet fire") pueden causar daños estructurales muy importantes, y es una práctica normal de diseño para proteger la vulnerabilidad de dichas instalaciones ante este tipo de eventos. Las explosiones, por otro lado, también pueden causar graves daños estructurales, ya sea a través de la explosión inicial o por los daños causados por los proyectiles como consecuencia de los mismos. Finalmente, un incendio y explosión pueden causar una interrupción en las operaciones, así como pueden reducir la disponibilidad de los sistemas de respuesta de emergencia, que son una parte necesaria del sistema de gestión de emergencias en instalaciones costa fuera. Ver por ejemplo (Touger, 2001; Asociaate Press, 2003; Carpenter, 2005; Pemex, 2007).

6.3.2.3 Los riesgos geológicos / geotécnicos

Los peligros geológicos/geotécnicos que podrían contribuir en una falla estructural se deben a una o combinación de los siguientes factores:

- a) pilote de la plataforma extraíble en tensión;
- b) pilote "punch"- debida a una compresión;
- c) la formación de articulaciones plásticas en los pilotes debido a la flexión;
- d) la degradación de la capacidad del pilote bajo cargas cíclicas;
- e) diferencial de asentamiento;
- f) la degradación de la capacidad de la fundación debido a la socavación del lecho marino, y
- g) el hundimiento y la pendiente de inestabilidad.

Ver por ejemplo: (Karunakaran, et al., 1992; Spidsøe y Karunakaran, 1993; Kassimali, 1983; Gottardi y Butterfield, 1993, 1995; Houlsby y Martin, 1992; Hoyle, 1992; Karunakaran, et al., 1994; Lade, 1977; Reardon, 1986; Schotman, 1989; Sigurdsson, et al., 1994; SNAME, 1994; Vesic, 1975; Young, et al., 1984; entre otros).

6.3.2.4 Corrosión/degradación del material

El acero en contacto con agua de mar sufre una corrosión a una velocidad significativa, al menos que la instalación esté protegido, por lo general, por una protección catódica (PC). En la mayoría de las plataformas marinas es una práctica común para proporcionar una "tolerancia de corrosión" de los miembros estructurales, situados cerca del 'nivel medio del mar' (a menudo entre 6-12 mm), donde las tasas de corrosión son más altas. El acero también es vulnerable cuando es expuesto a la 'espuma' del mar, así como también es vulnerable en la zona de salpicaduras. Así que, pinturas epoxi (o expóxicas) o similares se utilizan muy a menudo para proporcionar protección contra la corrosión, ya que el sistema PC no es tan eficaz en esta zona. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.2.5 Caída de objetos

Otro de los factores de riesgo de falla de estructuras costa fuera son los relacionados a las caídas de objetos. El impacto por objetos que caen (o cargas oscilantes), por ejemplo, durante las operaciones de levantamiento de cargas por las grúas y otros aparatos similares, constituye un escenario de riesgo importante para una instalación en alta mar.

Tabla 6.1. Técnicas de IE y los factores de riesgo de integridad estructural.

Factor de riesgo	Componentes críticos estructurales	Medidas de prevención, mitigación y control	Consecuencias	Técnica relevante de IE aplicable
Clima extremoso	Plataformas fijas ("Jacket"), risers/accesorios y sus soportes	Espacio de aire adecuado, con un diseño adecuado de altura de las olas, la redundancia en el diseño.	Pérdida de la estabilidad, Pérdida de espacio de aire (Elemento de pandeo, falla en el Pilote de la plataforma, falla en miembros)	Monitoreo de espacio de aire; Sistema de posicionamiento global, Monitoreo de tensión, MFNR,
Incendio y Explosión	Módulos de alojamiento, Refugios temporales en caso de una emergencia mayor, Estructuras de evacuación y de rescate, Paredes de contención contra fuego y explosión, Pilotes expuestos de plataformas fijas, risers, etc.	Adecuado diseño de muros contra incendio/explosión, sistemas de detección y alerta, sistemas contra-incendio, reducir las fuentes de fugas	Pérdida de rigidez estructural, sobrecarga estructural, daños a estructuras de acero debidos a la explosión	Normalmente no se usa ninguno de los métodos de IE descritos en la sección 6.3.1
Los riesgos geológicos / geotécnicos	La cimentación	Estudio adecuado del lecho marino, diseño adecuado de la cimentación de la estructura de la plataforma, etc.	La pérdida de espacio de aire; Inclinación de la plataforma, Falla del pilote; Falla al sacar el pilote de la plataforma	Monitoreo de espacio de aire, Monitoreo de tensión, MFNR,
Corrosión/ degradación del material	Jacket, la superestructura de la instalación, risers /accesorios y sus soportes	Protección contra la corrosión, sistemas de monitoreo	La pérdida de espesor de pared, agrietamiento, desgaste, erosión, pandeo de elementos, pérdida en la conexión (pérdida de la estabilidad)	Monitoreo de frecuencia acústica, Monitoreo de fatiga, MFNR
Caída de objetos	Jacket, la superestructura de la instalación, risers /accesorios y sus soportes	Diseño de los miembros de la estructura contra posible caídas de objetos, gestión adecuada de las operaciones con grúas	Abolladuras en elementos estructurales/ pandeo /ruptura iniciación de grietas (pérdida de la integridad hermética, pérdida de la estabilidad)	MFNR
Las colisiones con buques	Jacket	Diseño para una adecuada absorción de la energía, control adecuado sobre la operación del buque, sistemas de alerta, etc.	Abolladuras/pandeo /ruptura, iniciación de grietas (pérdida de la integridad hermética, pérdida de la estabilidad)	NFNR
Fatiga	Jacket, la superestructura de la instalación, risers /accesorios y sus soportes	Diseño para una adecuada resistencia a la fatiga y de inspección, monitoreo remoto, etc.	Iniciación de grietas a través del espesor-grietas, daños a los miembros; daños por fatiga generalizada (violación de la integridad hermética, pérdida de la estabilidad)	Monitoreo de tensión, MFNR, Monitoreo de frecuencia acústica, Monitoreo de fatiga, detección de fugas, detección continua de miembros inundados
La pérdida de la estación de precisión	Moorings, sistema de posicionamiento dinámico	Medición de carga		Sistema de posicionamiento global, monitores de riser y cadena de anclaje
Cambios de procesos	acket, cimentación y superestructuras	Gestión adecuada del peso, administración de cambios	Falla de los pilotes, pérdida de espacio de aire, sobre carga de la estructura	Monitoreo de espacio de aire

El impacto podría ser de fuga de hidrocarburos cuando los objetos caen sobre recipientes que contienen éstos o directamente sobre una parte estructuralmente sensibles de la instalación. Ver por ejemplo, el caso del accidente en la plataforma "Parker 14-J", descrito brevemente en el Anexo-A; así como también, Vinnem, et al., (2000).

6.3.2.6 Las colisiones de buques

Las colisiones con los estructuras de instalaciones costa fuera pueden ser ocasionadas por embarcaciones y éstas pueden ser clasificados como "colisiones inducidas" o bien las "colisiones en campo", las cuales pueden ser ocasionadas por las embarcaciones de suministros y los barcos en espera de alguna operación en el campo petrolero. Las estructuras de plataformas del tipo "Jacket", por lo general, son diseñadas para soportar la energía cinética del impacto de embarcaciones; en general dicha energía oscila entre el orden de 11-14 MJ. (Vinnem, et al., 2000, 2002; Hokstad, et al., 2002; entre otros).

6.3.2.7 Fatiga

Los daños por fatiga de componentes soldados de estructura surge a causa de la naturaleza cíclica de la carga ocasionada por las olas o el viento (cargas ambientales; ver por ejemplo, Carter, 1982; Daghigh, et al., 1997; Elzinga, y Tromans, 1992; Hambly, et al., 1990; Harland, et al., 1997; Rodenbusch, 1986; entre otros). De acuerdo a la revisión de la literatura, en algunos lugares, por ejemplo en el Mar del Norte, las olas pueden ser mucho más perjudiciales en relación con la fatiga que, por ejemplo, el Golfo de México. Sin embargo, en temporadas de huracanes en el Golfo de México, ocasionan olas considerables de tal manera que la fatiga es ahora reconocida como un importante riesgo para las estructuras en la sonda de Campeche. Los daños por fatiga se presentan en forma de grietas, por lo general en las uniones soldadas, que pueden crecer y, eventualmente, dar lugar a una falla.

6.3.2.8 La pérdida de la estación de precisión

El buen funcionamiento de las estaciones de precisión son esenciales para garantizar la integridad de los risers /conductor y otras conexiones a las instalaciones del fondo del mar o en sus cercanías. Dichas estaciones, en general, para su buen funcionamiento dependen de la integridad del sistema de amarre ("mooring"), los cuales pueden ser afectados por los mecanismos de degradación por fatiga / corrosión y otros. (ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.3.2.9 Cambios de procesos

Este factor de riesgo ha recibido muy poca atención hasta la fecha, en relación a la integridad estructural (IE) de instalaciones costa fuera. Sin embargo, los principales riesgos en esta área son concernientes al control de peso y los riesgos de incendio y explosión pueden ser las consecuencias cuando no se tiene una gestión adecuada de los cambios de procesos; esto es, normalmente cuando hay cambios de procesos, a veces es necesario instalar equipos más grandes o bien incorporar nuevos procesos en una instalación. (ver por ejemplo, el caso de Piper Alpha, Touger, 2001).

En la Tabla 6.1 se sintetiza la información presentada en las secciones anteriores. En la última columna de la Tabla se listan las técnicas de IE aplicables a cada factor de riesgo descritos anteriormente.

6.4 Capacidad de las técnicas de control de IE

En la sección anterior se presentaron las diferentes técnicas de IE con respecto los riesgos estructurales y sus consecuencias. En esta sección se describe brevemente la aplicabilidad de cada técnica de monitoreo de IE en términos de su capacidad para controlar un parámetro que incide sobre la integridad estructural. La Tabla 6.2 resume la comparación.

Tabla 6.2. Capacidad de monitoreo de las técnicas de IE

Técnica de monitoreo de seguridad estructural (IE)	Capacidad de monitoreo
Monitoreo de espacio de aire	Pérdida de espacio de aire
Sistema de Posicionamiento Global	Pérdida de estación de monitoreo de precisión Pérdida de espacio de aire
Emisión acústica	Iniciación de grietas por fatiga Crecimiento de grieta por fatiga Corrosión
Detección continua de miembros inundados	Detección de miembros de fuga Grietas a través de espesor Grietas a través de corrosión
Detección de fugas	Grietas a través de espesor Grietas a través de corrosión Pérdida de agua-integridad apretada
Monitoreo de de respuesta de frecuencia natural	Daños a los miembros Daños significativos a los miembros y uniones
Monitoreo de riser y cadenas de anclaje	Pérdida de la línea de tensión del "mooring"
Fatiga -gauge	Agrietamiento por fatiga
Toma acústica de huellas dactilares	Grietas a través de espesor
Monitoreo de tensión	Tensión local y régimen de carga

6.5 Limitaciones de las técnicas de inspección existentes

La Tabla 6.3 resume algunas de las limitaciones de las técnicas de inspección existentes. En particular, la información de la tabla aparece en el anexo de la Sección 23 de la norma ISO 19902 (2007), el cual ofrece algunos detalles sobre las capacidades técnicas de inspección de varias, incluyendo las capacidades de despliegue, etc.

Tabla 6.3. Limitaciones de las técnicas de inspección existentes.

Técnica de inspección	Capacidad de defecto o daño	Limitaciones	Problemas de implementación
Medidas de espacios de aire	Espacio de aire	Necesidad de calibrar y mantener equipos para la continua captura de datos de la altura de las olas	Solamente de uso superficial
Grabación del crecimiento de algas marinas	Medición de la crecimiento de algas marinas (suave y duro)	Las mediciones no son confiables, especialmente para el crecimiento suave y para las estimaciones de un solo componentes de gran tamaño.	Pueden ser operados desde un ROV
La inspección visual sin limpieza del crecimiento marino	Daño considerable	Sólo apto para daños considerables (grandes deformaciones, conexiones cortadas, la falta de miembros, desechos).	Pueden ser operados desde un ROV
La inspección visual con limpieza del crecimiento marino	La corrosión, grietas visibles, abolladuras, abrasión, deformaciones.	Necesidad de la limpieza del crecimiento marino.	Pueden ser operados desde un ROV
Mediciones dimensionales	El espesor del crecimiento de algas marinas, socavación, profundidad, tamaño de abolladuras, fuera de la rectitud, longitud de la grieta, tamaño del "pit" de la corrosión		Pueden ser operados desde un ROV para medidas considerables
Lecturas del potencial catódico	El rendimiento del sistema PC	Los sondeos requieren calibración en campo	Operados desde un ROV
Detección de miembro inundado	Miembro inundado como resultado de espesores a través de daño o grietas	Sólo es capaz de detectar a través de espesor grietas o daños, que ha llevado a la inundación de los miembros. No es capaz de detectar grietas en el lado de la pierna donde la pierna es intencionalmente inundada o lechada llena. Apertura a través de grietas-espesor en un periodo limitado (tormentas) no puede haber inundación. Para encontrar la causa de grietas se requiere más investigación y con otros métodos de inspección. El método de ultrasonidos (FMD): buceador relativamente intensivo, la colocación de precisión de la sonda necesarios para la confiabilidad.	Aspectos de salud y seguridad al usar una fuente radioactiva en este método
Ultrasonido de onda de compresión	Espesor del muro		Pueden ser operados desde un ROV
UT (ultrasonido) de ola de corte, ola de arrastre, TOFD	Grietas e indicaciones volumétricas internas. El tamaño de las indicaciones puede ser encontrado por otras técnicas	Requiere inspectores (UT) calificados si se realiza de forma remota (es decir, si la sonda es manipulada por el buzo, un inspector cualificado (UT) en la pantalla de control aumenta la confiabilidad). (ver Anexo-K)	Normalmente no se usa un ROV
Inspección de partículas magnéticas (MPI)	Defectos en la superficie de ruptura	Limpieza de superficies y remoción de revestimiento requerida. Sólo se puede detectar defectos de rompimiento de superficie.	Normalmente no se usa un ROV
ACPD (pérdida del potencial de corriente)	Defectos de tamaño encontrados por otras técnicas	Requiere una limpieza al cubierto del metal y un buzo entrenado. Varias mediciones a lo largo de longitud de la grieta puede ser necesaria si una buena resolución requerida.	Normalmente no se usa un ROV
ACFM (medición alternada de corriente de campo)	Detecta y el defecto de tamaño en la superficie	Formación necesaria para evitar una mala confiabilidad. ACFM no puede encontrar indicaciones en ciertos geometrías (bordes de refuerzos debido al efecto de borde)	Normalmente no se usa un ROV
Corriente Eddy	Detecta y el defecto de tamaño en la superficie	Requiere de un buzo para operar sonda bajo el agua y un técnico en la superficie para leer la pantalla. La formación necesaria.	Normalmente no se usa un ROV
Inspección radiográfica (RT)	Defectos internos	No se utiliza inspección submarina, debido a consideraciones de salud y seguridad.	Normalmente no se usa un ROV

6.6 Mecanismos de daño para las cuales un sistema de monitoreo puede complementar a las inspecciones existentes

Esta sección presenta los resultados de la revisión de los principales mecanismos de daños que se presentan en las plataformas marinas fijas, para los siguientes casos:

1. Estructuras bajo el agua
2. Zonas "Splash"
3. Superestructuras

Además, se llevó a cabo una evaluación cualitativa a cerca de las áreas donde, las técnicas de monitoreo de IE podrían servir como complemento, a las técnicas de monitoreo existentes en base a los siguientes criterios:

- a) Eficacia (esto es incluyendo la sensibilidad y la capacidad de detectar daños antes de que se conviertan en críticos);
- b) Mejora de la salud y la seguridad ocupacional (por ejemplo, minimizar operaciones del buzo y/o la participación del personal técnico de acceso-mediante cuerdas (TAC); y
- c) Reducción de costos (por ejemplo, minimizar la participación del buzo o bien la frecuencia de la inspección).

Otro de los criterios adoptados ha sido la sensibilidad/eficacia de la técnica; esto es: la "sensibilidad/eficacia", se califica como "Alto" (muy eficaz), "Medio" (eficacia media) o "Baja" (eficacia baja). Dichos criterios han sido adoptados de las publicaciones relevantes; ver por ejemplo (API-RP-2A, 2000; ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

A continuación se discuten muy brevemente los mecanismos de daños para cada uno de los casos.

6.6.1 Estructuras bajo el agua

La Tabla 6.4 resume algunas técnicas de control de IE que tienen la potencialidad de ser usadas para complementar las técnicas de inspecciones marinas que se usan de acuerdo al mecanismo de daño seleccionados (Fisuras de superficie, a través de fisuras de espesor, ruptura, etc.). A continuación se presenta una breve discusión de los mismos.

6.6.1.1 Fisuras de superficie

Inspecciones submarinas, tales como la de detección de grietas se realizan para detectar defectos en la superficie de rotura. En este tipo de inspecciones se requiere un despliegue de buzos para su realización. Dicha operación introduce riesgos para la salud y seguridad del buzo, así como también, un aumento de los costos de la operación. Además, existen otros problemas prácticos, tales como el mal tiempo y la inaccesibilidad puede comprometer las inspecciones programadas. La técnica localizada de control (MEA) puede ser utilizada como una alternativa a la de las técnicas existentes de inspección; esto es, proporciona una alternativa permanente de monitoreo remoto, sin necesidad del empleo de un buzo, a excepción de la colocación inicial de los sensores y en el mantenimiento si se requiere.

Tabla 6.4. Capacidad de monitoreo de las técnicas de IE.

Mecanismos de daño	Evaluación de la técnica de inspección actual	Técnica de monitoreo de IE complementaria
Fisuras de superficie (fundamental para la integridad de la estructura)	Buzo/Técnico de acceso-cuerda (TAC, por sus siglas en inglés). Efectividad en inspección local solamente	Emisiones acústicas Localizadas. MFNR (posible para un 80% a través-espesor de grieta en baja redundancia en "Jackets")
Grieta a través de espesor	Disponibilidad de un método efectivo, es necesario emplear ROV/TAC. Otras técnicas bajo el agua requieren el empleo de Buzos. No es aplicable a los aparatos que son intencionalmente diseñado para ser inundados (Bajo el agua).	Emisiones acústicas Localizadas. MFNR (aplicable para baja redundancia instalaciones fijas de 4-pilotes)
Grietas-superficies alejadas y embebidos (Esencial para la integridad de la estructura)	Se requiere de Buzo/TAC.	Emisiones acústicas Localizadas. Técnica ultrasonido (UT) con onda longitudinal angulada (por grietas en el anillo y posiblemente otras grietas internas).
Aflojamiento de pernos	No hay un método efectivo disponible. Puede volver a re-apretar empleando el ROV / TAC.	SM
Ruptura	Método efectivo disponible usando ROV / TAC	

6.6.1.2 Grietas a través de espesor

Aunque los métodos eficaces de inspección mediante el empleo de un ROV (Remote Operating Vehicle) están disponibles en la actualidad, estos métodos no son adecuados, por ejemplo, para las abrazaderas, que son intencionalmente diseñados para ser inundadas o las inundaciones no puede ocurrir con la presencia de grietas a través de espesor. Las técnicas de IE, como la localizada MEA y MFNR pueden ser empleados para estos casos. Estas técnicas no dependen de las inundaciones. La técnica MFNR son especialmente adecuados para las plataformas de baja redundancia ("Jacket").

6.6.1.3 Grietas de gran superficie y empotrados

Las técnicas de inspección de ultrasonido localizadas (UT) se pueden utilizar para inspeccionar el momento de la superficie grietas. La técnica UT- "Phased Array", y las inspecciones TOFD pueden emplear a los buzos y los riesgos asociados con la salud y seguridad de los mismos tienen que ser considerados. La técnica localizada de control MEA se puede utilizar como complemento o bien substituir las técnicas de inspección usadas; dicha aplicación puede proporcionar una alternativa permanente de monitoreo remoto, sin necesidad de implementación de buzo (a excepción de la colocación inicial de los sensores y el mantenimiento si es necesario). Por lo general, la identificación de un defecto de crecimiento sería seguido por una inspección específica. La aplicación de la técnica de monitoreo de onda longitudinal angulada (UT) se puede utilizar para controlar las grietas en los refuerzos de anillo y otras grietas internas.

6.6.1.4 Aflojamiento de pernos

Para este mecanismo de daño no existen métodos de inspección eficaces disponibles. En la práctica, los tornillos se pueden volver a apretar mediante el empleo de ROV o buzos. En los casos en que la pérdida de tensión previa es fundamental, la técnica de monitoreo por tensión (o métodos similares) puede ser usado para monitorear continuamente el estado de los tornillos/pernos, mediante una cuidadosa colocación de los medidores correspondientes.

6.6.1.5 Ruptura

La técnica MFNR se puede utilizar para detectar o bien monitorear la ruptura de todo un miembro. Una vez que un miembro bajo el agua se ha roto, la técnica MCMI (ver sección 6.2.1) se puede utilizar para controlar las inundaciones miembros. La técnica de localización, MEA, por otro lado, puede ser usada para monitorear a través de las grietas de espesor, que puede dar lugar a la ruptura.

6.6.2 Zona "Splash"

La zona de "chapoteo" es particularmente difícil de examinar y los miembros en esta área están sujetos a una degradación acelerada. Los técnicos empleados (TAC) para llevar a cabo actividades relacionadas con inspecciones no pueden llevar a cabo actividades rutinarias para este tipo de operaciones; esto es debido a los riesgos asociados con la salud y seguridad de los mismos. Las técnicas posibles de inspección incluyen, por ejemplo, GVI con binoculares y CVI con la participación de TAC o equipos especializados, tales como cámaras de guía. Por otro lado, la técnica MFNR también se puede utilizar para detectar o monitorear la ruptura de algún miembro en esta zona. Si el daño se encuentra a través de GVI o CVI, entonces es posible llevar a cabo una inspección detallada tras la retirada del recubrimiento.

6.6.3 Las superestructuras

Las Tablas 6.5-6.8 presentan un resumen de las técnicas de control de IE que, tienen la potencialidad de ser usadas para complementar las deficiencias de las técnicas de inspección que se usan en la actualidad en las superestructuras de instalaciones costa fuera. El principal impulsor de control es el requerimiento de reemplazar el requisito del empleo de personal técnico, TAC, ya que como se mencionó anteriormente su aplicación presenta riesgos asociados con la salud y seguridad del personal técnico involucrado en dichas operaciones.

La corrosión es un problema significativo para las estructuras de acero de las superestructuras, ya que se encuentran expuestas al medio ambiente marino altamente corrosivo. La corrosión bajo PFP/capa protectora puede ser muy difícil de detectar sin la eliminación del recubrimiento. Métodos tales como la ultrasonido (UT) de largo alcance podría ser utilizado para detectar la corrosión, aunque la técnica todavía se encuentra en fase de desarrollo para muchas aplicaciones. Una severa corrosión local y general, por otro lado, puede ser inspeccionado con eficacia y a un costo relativamente bajo; lo anterior se puede lograr utilizando métodos como técnicas de ultrasonido de espesor de pared y CVI, sin la necesidad de un control de IE (ver Tablas 6.5-6.8).

Tabla 6.5. Tecnologías de inspección actuales de inspección detallada.

Mecanismo de daño	Tecnologías actuales de inspección					
	Inspección detallada					
	Ultrasonido de espesor de pared	Detección convencional de fisuras	Pulso Echo UT (Angulado)	Tiempo de diferenciación de vuelo	Arreglo en fase UT	Radiografía digital
Fisuras de superficie (fundamental para la integridad de la estructura)		Alto				Medio
A través de grietas de espesor		Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Ruptura		Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Grietas de gran superficie y embebidos (Esencial para la integridad de la estructura)			Alto	Alto	Alto	Medio
Corrosión general externa severa	Alto					Medio
Corrosión local severa	Alto					Alto
Abolladura severa						
Aflojamiento de pernos						
Deterioro del revestimiento						
Corrosión bajo PFP						

Tabla 6.6. Tecnologías de inspección por chequeo/proyectada

Mecanismo de daño	Tecnologías existentes actuales de inspección				
	Inspección proyectada				
	Inspección visual general	Inspección visual cercana	Largo alcance UT	SLOFEC	Corriente de inspección pulsado Eddy
Fisuras de superficie (fundamental para la integridad de la estructura)			Bajo		
A través de grietas de espesor		Bajo	Alto		
Ruptura	Medio	Alto	Alto		
Grietas de gran superficie y embebidos (Esencial para la integridad de la estructura)			Bajo		
Corrosión general externa severa	Medio	Alto	Alto		
Corrosión local severa	Medio	Alto	Medio		
Abolladura severa	Medio	Alto			
Aflojamiento de pernos		Medio			
Deterioro del revestimiento	Alto	Alto			
Corrosión bajo PFP			Medio	Medio	Medio

Tabla 6.7. Evaluación de las tecnologías actuales de inspección

Mecanismo de daño	Evaluación de las tecnologías actuales de inspección
Fisuras de superficie (fundamental para la integridad de la estructura)	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
A través de grietas de espesor	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Ruptura	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Grietas de gran superficie y embebidos (Esencial para la integridad de la estructura)	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Corrosión general externa severa	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Corrosión local severa	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Abolladura severa	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Aflojamiento de pernos	Ninguna técnica efectiva disponible - puede volver a apretar; puede ser detectado por CVI; TAC puede ser requerido
Deterioro del revestimiento	Técnica efectiva disponible; TAC puede ser requerido
Corrosión bajo PFP	Técnica disponible efectiva; Participación de TAC es necesario; Necesidad de despojar a la PFP en la ubicación de la sonda LRUT; PECI y SLOFEC son tecnologías relativamente nuevas, actualmente se utilizan en algunas aplicaciones.

Tabla 6.8. Tecnologías complementarias de IE.

Sistemas complementarios de Inspección Estructural (IE)					Resumen de las técnicas complementarias de monitores de IE
Emisiones acústicas localizadas	Monitoreo de respuesta de frecuencia natural	Toma de huellas dactilares acústicas	Métodos de inspección/Monitoreo relacionados con detección		
			Monitoreo de tensión	Fatiga-Gauge	
Alto			Relevante	Relevante	Método actual requiere instalación de sensores para los lugares donde se requiere inspeccionar.
Alto			Relevante	Relevante	Método actual requiere instalación de sensores para los lugares donde se requiere inspeccionar.
Alto	Medio	Medio	Relevante	Relevante	Método actual requiere instalación de sensores para los lugares donde se requiere inspeccionar.
Alto			Relevante		Método actual requiere instalación de sensores para los lugares donde se requiere inspeccionar.
					No existe técnica relevante de monitoreo.
					No existe técnica relevante de monitoreo.
					No existe técnica relevante de monitoreo.
			Relevante		Método especializado disponible.
					Método especializado disponible.
					No existe un método efectivo.

6.7 Componentes estructurales difíciles de inspeccionar

Como se mencionó en la sección 6.2, una gran cantidad de instalaciones petroleras que se encuentran operando tanto en diferentes partes del mundo, así como en la Sonda de Campeche, están llegando o han excedido su vida útil de diseño original. Muchas de ellas ya están en, o están siendo evaluadas para una etapa de extensión de su vida útil. Lo anterior se debe a la creciente necesidad de seguir produciendo petróleo y gas, entre otros factores. Por otro lado, una consideración en la extensión de la vida útil de este tipo de estructuras, se requiere del conocimiento de los mecanismos de envejecimiento, tales como la corrosión y la fatiga; también, es de vital importancia tener y mantener una buena comprensión de la

situación actual de la estructura que se pretende evaluar. Esto requiere de una inspección y mantenimiento, para que las tecnologías de control de IE puedan jugar un papel importante en dicho proceso.

Tabla 6.9. Componentes estructurales difíciles de inspeccionar.

Componente difícil de inspeccionar	Mecanismos de daño	Técnica de monitoreo de IE potenciales para los componentes difíciles de inspeccionar
Secciones soldadas de los pilotes	Fatiga en las soldaduras circunferenciales; corrosión cerca o debajo del lecho marino	Ultrasonido (UT) de largo alcance; MFNR
Conexiones lechadas	La corrosión, la pérdida de adherencia de lechada	
Placas de corte para pilotes-conectores de manga	Corrosión, fatiga	Inspección por Buzo, MFNR
Uniones de anillo endurecido	Agrietamiento por fatiga en soldaduras en los refuerzos colocados en el interior de la cuerda tubular, agrietamiento por fatiga en los mismos anillos de refuerzos-iniciando a partir del borde interior y propagándose radialmente hacia el exterior.	Técnica ultrasonido (UT) con onda longitudinalmente angulada
Daño de fatiga generalizado	Agrietamiento por fatiga múltiple	Monitoreo de respuesta de frecuencia natural
Daño acumulado	Daños de abolladuras y pandeos debidos a accidentes	Ultrasonido (UT) de largo alcance
Zona "splash"	Corrosión, fatiga en soldaduras	Mediciones de espesores por Ultrasonido UT (operado remotamente)
Componentes en aguas profundas	Corrosión, fatiga	Tecnología de inspección mediante el uso de ROVs (Remote Operating Vehicles)

Una de las dificultades en la obtención del conocimiento del nivel actual de la integridad estructural es la falta de información sobre los componentes, partes de la instalación que son difíciles de inspeccionar por métodos convencionales. Por ejemplo, perfiles soldados de los pilotes, las uniones de anillo rígido y partes de la zona "Splash", por mencionar algunas; ver tabla 6.9 para algunos ejemplos típicos. Esta limitante en el conocimiento de la integridad estructural necesaria para la fase de extensión de la vida útil es muy significativa. Una vez identificados dichos componentes que son difíciles de inspeccionar, podrían ser una oportunidad de aplicación de las técnicas de control de IE. La Tabla 6.9 presenta algunos ejemplos de posible aplicación encontrados en la literatura. (API-RP-2A, 2000; ISO-19902, 2007; NOSRSOK, 1997; ISO-16587, 2004; ISO-19901, 2005).

6.8 Gestión de la integridad estructural de plataformas marinas fijas

En las secciones 6.2 y 6.3 se ha discutido la importancia de contar con un programa de gestión de la integridad estructura (IE) de plataformas marinas de producción de petróleo y gas. También, se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de la literatura concerniente a la evaluación de los métodos y/o técnicas existentes de control de IE y los principales hallazgos se han reportado en las secciones 6.4-6.7.

Esta sección presenta una propuesta de un modelo de gestión de integridad estructural con aplicación a plataformas marinas. El objetivo es el de presentar un modelo genérico para la gestión de la integridad estructural (GIE) de las estructuras de cubierta fija.

En el proceso de revisión de la literatura se ha encontrado que existen normas/estándares que han sido publicados por diferentes organizaciones asociados con la industria petrolera. Por ejemplo, existen publicaciones que ofrecen guías sobre la GIE, se encuentran por ejemplo: API-RP-2A, (2000), ISO-19902, (2007); entre otros. En algunos países (EE.UU., Canadá, Australia, Reino Unido), existen regulaciones que tienen que ser cumplidas por las compañías que operan los pozos petroleros. Dichas empresas tienen la obligación de demostrar que cuentan con un sistema de GIE en sus operaciones, de lo contrario no podrían operar en dichos campos petroleros. Sin embargo, en nuestro país no existe un organismo regulador externo que tome un papel similar. En este trabajo de tesis, se argumenta que es necesario tener tales organismo independientes que tengan el poder de sancionar, por ejemplo, a PEMEX si no cumple con los requisitos necesarios para operar los complejos petroleros de manera segura.

6.8.1 Descripción del modelo de GIE

La Figura 6.3 muestra el modelo con los elementos funcionales necesarios, así como los procesos necesarios para una buena práctica de la gestión de la integridad estructural de plataformas marinas.

A continuación se describen muy brevemente cada una de ellas.

6.8.1.1 Política de la GIE

La política establece la intención general y la dirección del titular de la obligación con respecto a la meta de la GIE y el marco para el control de los procesos de GIE y actividades conexas. Estos deben estar alineados con el plan estratégico del titular (de la organización) y otras políticas de la organización. Informacional adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007).

6.8.1.2 Estrategia GIE

La estrategia de la GIE establece el proceso del deber del titular (de la organización) de llevar un control de la integridad de sus activos en línea con la política de la GIE y establecer los criterios de aceptación. Informacional adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007).

6.8.1.3 Estrategia de control

Un enfoque sistemático para el desarrollo de un plan para la inspección en servicio de una estructura. Informacional adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007).

6.8.1.4 Programa de Inspección

El programa de inspección es el alcance de trabajo detallado para la ejecución extraterritorial de las actividades de inspección para determinar el estado actual de la

estructura. Esta se desarrolla a partir de la estrategia de inspección. Informativa adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007), API-RP-SIM, (2007).

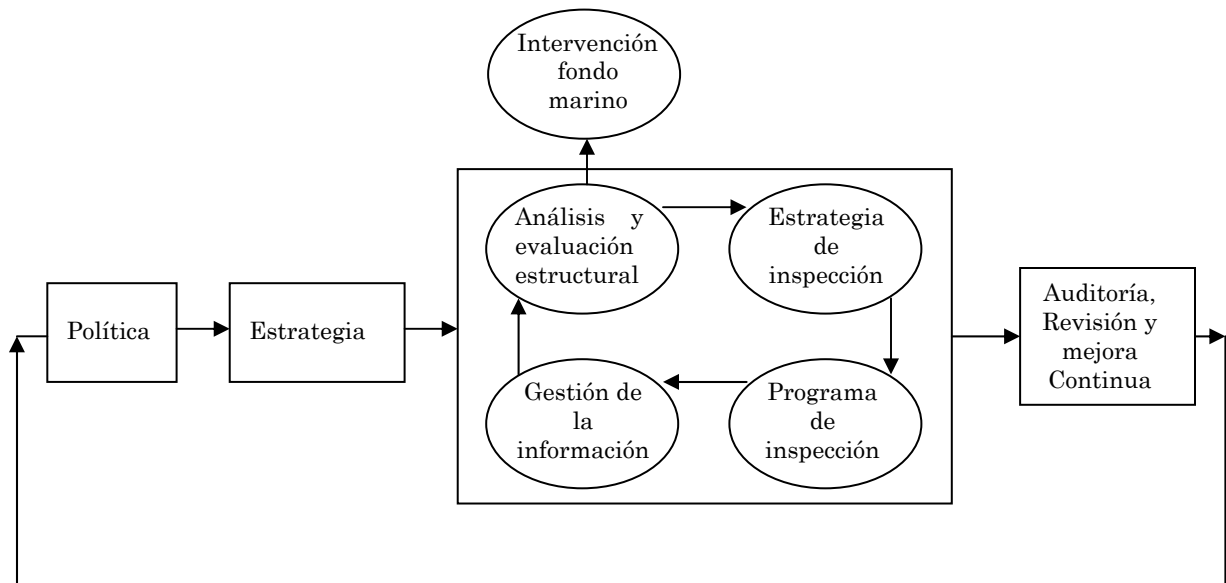


Figura 6.3. Modelo GIE.

6.8.1.5 Evaluación estructural

Consiste en una revisión del estado actual de la estructura en comparación con el estado que se tenía la última vez que se llevó a cabo la evaluación; así como otros parámetros que afectan los niveles de integridad y de riesgos y para confirmar si se cumple o no con los criterios de aceptación de IE. En general, este proceso identifica las necesidades de reparación o mantenimiento para cumplir con los criterios de aceptación para la integridad estructural. Informativa adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007).

6.8.1.6 Mantenimiento

El mantenimiento es considerado como un elemento esencial en el proceso de IE. (ISO-19902, 2007).

6.8.1.7 Gestión de la Información

El proceso por el cual todos los documentos históricos y operativos, datos e información que recoge, almacena y comunica. Informativa adicional puede ser consultada en ISO-19902, (2007).

6.8.1.8 Auditoría y revisión

Es el proceso de auditoría para confirmar que GIE se lleva a cabo de conformidad con los procedimientos establecidos en la política de GIE y la estrategia, y la legislación. El proceso de examen evalúa los procesos de GIE se puede mejorar sobre la experiencia que se tiene en la organización, así como también la experiencia externa y las mejores prácticas existentes en la industria. (ver por ejemplo, ISO-19902, 2007, API-RP-SIM, 2007).

6.9 Conclusiones del Capítulo

El Capítulo ha presentado una serie de métodos/técnicas de monitoreo de IE han sido desarrollados y que están disponibles para el monitoreo de los parámetros relacionados con la integridad. Estos incluyen:

- a) Monitoreo de emisiones acústicas (MEA)*
- b) Detección de fugas (DF)*
- c) Monitoreo de espacio de aire (MEA)*
- d) Monitoreo por sistema de posicionamiento global (SPG)*
- e) Monitoreo de frecuencia natural de respuesta (MFNR)*
- f) Control de la cadena de amarre ("mooring") (CCA)*
- g) Monitoreo de tensión (MT)*

Con la creciente necesidad de demostrar que los riesgos de integridad estructural se gestionan y los cuales se mantienen dentro de los rangos aceptables, la necesidad de considerar el monitoreo estructural como parte del expediente de seguridad plataforma, se prevé que aumente en el futuro y estas tecnologías maduras serían los principales candidatos.

Métodos que requieren un mayor desarrollo antes de que se convertiría en lo posible lo más ampliamente aplicado métodos de monitoreo de IE son:

- a) Monitores de índices de fatiga (MIF)*
- b) Monitoreo continuo de 'miembro' inundado (MCMI)*
- c) Toma acústica de huellas dactilares (TAHD)*

El siguiente y último Capítulo de este reporte se presentan las principales Conclusiones del proyecto de investigación.

CONCLUSIONES Y FUTURO TRABAJO

En el Capítulo 1 se ha descrito los antecedentes así como la motivación de este proyecto de investigación. Además, se presentaron los objetivos planteados para el proyecto. Una revisión exhaustiva de la literatura en relación a la investigación concerniente a los diferentes factores de riesgos a los que se encuentra sometida una plataforma marina, así como los aspectos teóricos relevantes a la misma se presentó en el Capítulo 2. En el Capítulo 3 se presentó la metodología de investigación; en este caso se adoptó la metodología de investigación de operaciones (IOs). Los Capítulos 2 y 3 se concentraron en los fundamentos teóricos y metodológicos para abordar el problema principal de investigación. Una breve descripción del caso de estudio se presentó en el Capítulo 4. El análisis cuantitativo del análisis estructural para el caso de una plataforma marina fija se presentó en el Capítulo 5. En el mismo Capítulo se presentó también una discusión de los resultados obtenidos. El capítulo 6 presentó los resultados de un diagnóstico de las principales técnicas de control de Integridad Estructural (IE) existentes en la actualidad. Este Capítulo final presenta la síntesis de los principales hallazgos encontrados en este proyecto de investigación. La sección 7.1 resume las principales conclusiones obtenidas del análisis cuantitativo del caso de estudio. En esta misma sección, también se presentan las principales conclusiones del diagnóstico de las tecnologías de IE. Las conclusiones sobre la metodología de investigación se discuten también en esta sección. Finalmente, la sección 7.2 presenta los posibles futuros trabajos de investigación.

7.1 Conclusiones

El petróleo es la fuente de energía más importante de la sociedad en la actualidad y de una u otra de sus muchas formas lo usamos cada día de nuestras vidas. La importancia del petróleo no ha dejado de crecer desde sus primeras aplicaciones industriales a mediados del siglo XIX, y ha sido en muchas ocasiones el responsable de conflictos bélicos, por ejemplo, en algunas partes del mundo como por ejemplo en el Medio Oriente. El petróleo y su gama casi infinita de productos derivados le convierten en uno de los factores más importantes del desarrollo económico y social en todo el mundo. Dada la alta dependencia que el mundo tiene del petróleo, la inestabilidad que caracteriza al mercado internacional y las fluctuaciones de los precios de este producto, han llevado a que se investiguen energías alternativas, aunque hasta ahora no se ha logrado una opción que realmente lo sustituya.

Dada la importancia de este recurso no renovable, los países productores (incluyendo nuestro país) no pueden darse el lujo de tener pérdidas de producción del mismo. Por ejemplo, pérdidas de producción debidas a las fallas o accidentes que puedan ocurrir en los procesos de explotación y producción del mismo. Los procesos involucrados en la explotación y producción costa fuera son extremadamente complejos y de alto riesgo en términos de lesiones/fatalidades de los trabajadores, pérdidas de instalaciones, así como el impacto negativo al medio ambiente en caso de accidentes mayores (ver por ejemplo el Anexo-A).

Uno de los sistemas fundamentales en dichos procesos de producción del petróleo son las plataformas marinas.

Los requerimientos fundamentales del diseño de una plataforma marina son: 1) satisfacer la necesidad funcional de soportar las operaciones involucradas en la producción de petróleo y gas; y 2) ser adecuado, estructuralmente, para soportar las cargas operacionales (ver por ejemplo Tabla 5.3 del Capítulo 5) y las cargas extremas, como por ejemplo, clima extremoso (ver Sección 6.3 del Capítulo 6 para más detalles de los mismos).

En resumen, el proyecto de investigación se enfocó a los siguientes dos aspectos:

1) Análisis estructural de los nodos estructurales de una plataforma marina fija ubicada en el Golfo de México. (En el contexto del trabajo de tesis, este se considera como el aspecto *cuantitativo* del mismo).

2) Diagnóstico de la integridad estructural (IE) de plataformas marinas fijas. (Aspecto *cualitativo* de la investigación).

A continuación se presentan las principales conclusiones de este trabajo de investigación,

7.1.1 Conclusiones acerca de los resultados del análisis cuantitativo

1. Del análisis estructural (mediante el uso del software ANSYS (Ansys, 2010)), se obtuvieron los resultados de los esfuerzos. Se puede argumentar que dichos esfuerzos críticos son evidencia de la excedencia a los esfuerzos de fluencia de los elementos estructurales de la plataforma; sin embargo, se puede argumentar, que no representan significativamente un riesgo de colapso de la estructura de la plataforma (ver por ejemplo, Fig. 5.6 y Tabla 5.7 del Capítulo 5).

2. Las concentraciones de esfuerzos plásticos, por ejemplo, en los nodos de la estructura tipo "K-T", se observa que se alcanzaron deformaciones superiores a las de fluencia. Se observa un comportamiento logarítmico de las mismas antes de la fisura. (Fig. 5.11 del Capítulo 5).

3. Dado lo anterior, se puede argumentar, que dicho comportamiento (punto anterior) origina tensiones residuales y esto ocurre a medida que se incrementa el esfuerzo produciéndose de esta manera la abolladura, lo cual hace que su valor de rigidez y flexión disminuyan. (Los factores de concentración de esfuerzos a tensión y compresión se muestran en la Fig. 5.13 del Capítulo 5).

4. Del análisis de esfuerzos en los nodos estructurales de la plataforma bajo estudio, se observa que las uniones soportan una considerable cantidad de esfuerzos que pueden llegar en un momento dado a 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 (Fig. 5.14 del Capítulo 5).

Se puede argumentar que lo anterior confirma una vez más el por qué las estructuras como la del caso de estudio se diseñan con un factor de seguridad (conocido también como "factor de miedo") del orden de 0.72.

5. En muchas ocasiones al considerar factores de seguridad mayores al "óptimo", se incurre en un aumento considerable en los costos de construcción de dichas estructuras. Sin embargo, como en muchos otros aspectos, la pregunta es ¿Cuál es el valor óptimo?

Dado lo anterior, en la práctica cuando se diseña una plataforma de este tipo normalmente se toma un valor de esfuerzo, por ejemplo, en los nodos de un valor de 0.85.

6. Se observó también (ver por ejemplo Fig. 5.18 del Capítulo 5) que para $t = 15 \text{ seg}$ y con una deformación térmica del orden de 3.4, se observa una tendencia a la fractura en los nodos (mostrada como 3a etapa en la gráfica de la Fig. 5.18 del Capítulo 5).

Lo anterior implica la necesidad de reducir, por ejemplo, los tiempos de excitación dinámica en $t = 7 \text{ seg}$ y así obtener una deformación térmica del orden de 2.5 cm (ver 2a etapa en la gráfica de la Fig. 5.18). Esto implica un resultado conservador y posiblemente se reducirían los costos en la construcción de este tipo de estructuras. (en el contexto de la metodología de investigación, seguramente hay otros factores que pueden ser considerados antes de dar una solución al problema).

(De acuerdo a las normas de diseño como el API-RP-2A (2000), recomiendan una tolerancia de desplazamiento en el rango de $0.0 < \Delta < 5 \text{ cm}$).

7. Se llevó a cabo una simulación (*experimentación* en el lenguaje de la metodología adoptada) acerca del comportamiento en la estructura para determinar los esfuerzos térmicos generados por las cargas estáticas (carga 'viva', 'muerta'; ver Tabla 5.3 del Capítulo 5), así como las cargas (carga de oleaje, etc.). Se corroboró que existe un incremento de temperatura en el material cuando se somete a dichas cargas. Lo anterior puede dar la impresión de que, por ejemplo, los nodos sufren una alta concentración de esfuerzos y la generación de temperaturas mayores al coeficiente de dilatación térmica del acero, que oscila alrededor de $1.2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

7.1.2 Conclusiones acerca de los resultados del aspecto cualitativo de la investigación

Esta sección presenta las conclusiones más relevantes acerca de la investigación de las técnicas existentes relacionados con la Inspección Estructural (IE). Aunque los resultados son de carácter genérico, son claramente aplicables a la industria petrolera nacional.

7.1.2.1 Conclusiones acerca de los factores de riesgo a la IE de plataformas marinas

Las plataformas de producción de petróleo y gas se encuentran sometidas a un número considerable de factores de riesgo que han conducido fallas estructural de dichas estructuras (ver Anexo-A). En la revisión de la literatura se han identificado los siguiente factores de riesgo a las que se encuentran sometidos las instalaciones costa fuera (Fig. 7.1):

- a) Clima extremoso
- b) Incendio y Explosión
- c) Los riesgos geológicos / geotécnicos
- d) Corrosión/degradación del material
- e) Caída de objetos
- f) Las colisiones de buques
- g) Las colisiones con helicópteros y/o Aviones

h) Cambios de procesos

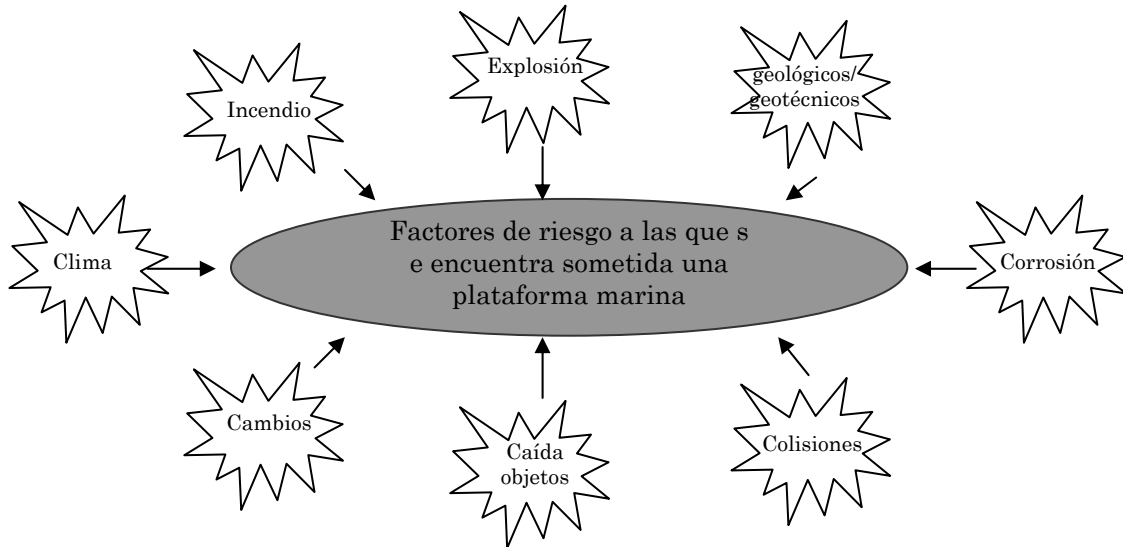


Figura 7.1. Factores de riesgo de estructuras de plataformas marinas fijas.

Es claro que los factores de riesgo no solamente pueden contribuir a la falla de una estructura de las plataformas marinas, pero también pueden tener consecuencias indeseables en términos de pérdidas de vidas humanas, e impactos negativos al medio ambiente. Dado lo anterior, entonces es importante considerar a la prevención desde esta perspectiva de ver el problema como un 'todo'; es decir, desde una perspectiva de sistemas (ver Capítulo 3).

7.1.2.2 Conclusiones acerca de los resultados de la IE

1. En este proyecto de tesis una serie de métodos de monitoreo de IE han sido revisados. De la revisión se ha encontrado que técnicas han sido desarrolladas y se encuentran disponibles para el monitoreo de los parámetros relacionados con la integridad estructural de instalaciones costa fuera, éstos son los siguientes:

- a) Monitoreo de emisiones acústicas (MEA)
- b) Detección de fugas (DF)
- c) Monitoreo de espacio de aire (MEA)
- d) Monitoreo por sistema de posicionamiento global (SPG)
- e) Monitoreo de frecuencia natural de respuesta (MFNR)
- f) Control de la cadena de amarre (mooring) (CCA)
- g) Monitoreo de tensión (MT)

2. En el contexto internacional, como por ejemplo, Canadá, Australia, Reino Unido, EE UU., entre otros países asiáticos, etc., existe una creciente necesidad de demostrar que los riesgos de integridad estructural se gestionan adecuadamente. Dado lo anterior, existe la necesidad de considerar el monitoreo estructural como parte de un "expediente" de seguridad en las operaciones de una plataforma costa fuera. Lo anterior se prevé que aumentará en el futuro y por lo consiguiente las tecnologías de IE jugarán un papel primordial para lograr este objetivo.

3. En el contexto internacional, como por ejemplo, Canadá, Australia, Reino Unido, EE UU., entre otros países asiáticos, etc., existe una creciente necesidad de demostrar que los riesgos de integridad estructural se gestionan adecuadamente. Dado lo anterior, existe la necesidad de considerar el monitoreo estructural como parte de un "expediente" de seguridad en las operaciones de una plataforma costa fuera. Lo anterior se prevé que aumentará en el futuro y por lo consiguiente las tecnologías de IE jugarán un papel primordial para lograr este objetivo.

4. Se encontró también que los métodos que requieren de un mayor desarrollo antes de convertirse en tecnologías altamente confiables de IE son las siguientes:

- a) Monitores de índices de fatiga (MIF)
- b) Monitoreo continuo de 'miembro' inundado (MCMI)
- c) Toma acústica de huellas dactilares (TAHD)

5. La importancia de las técnicas de control de IE de instalaciones de plataformas marinas costa fuera como un requisito fundamental en la "extensión de vida útil" de dichas instalaciones se ha abordado también si dichas técnicas pueden ser aplicables a áreas difíciles de acceso de dichas instalaciones. Se concluye que dichas técnicas de monitoreo pueden ser utilizadas para detectar los mecanismos de daño en los elementos difíciles de inspeccionar mediante las técnicas convencionales. Estos incluyen (Ver Capítulo 6):

- a) Secciones soldadas de los pilotes
- b) Uniones de anillo endurecido
- c) Elementos en las zonas de salpicadura
- d) Componentes de aguas profundas

6. Una mayor investigación orientada a mejorar las técnicas existentes de control de IE, para cumplir con las condiciones adversas a las que se encuentran funcionando las plataformas marinas es necesaria.

7.1.3 Conclusiones acerca de la metodología de investigación

La metodología empleada en el desarrollo general de este proyecto de tesis ha sido la metodología de investigación de operaciones (IOs) propuesta por Ackoff y Sasiemi (1975). En el Capítulo 3, se argumentó que fue adoptada debido a que presenta las características sistémicas para abordar el problema que se desea investigar. La Figura 7.2 se presenta nuevamente dicha metodología.

En términos generales, se concluye en este trabajo de tesis que la metodología fue de utilidad en la conceptualización de la problemática, así como el desarrollo de todo el trabajo de tesis. Cabe destacar que los proponentes de la metodología sugieren ciertos métodos para abordar aspectos como la validación del modelo que se genere para la solución del problema. Sin embargo, en el presente trabajo los principios generales de la metodología fueron aplicados.

Sin embargo, algunos aspectos relevantes que se consideraron de gran utilidad no solamente para el presente proyecto, pero pueden ser significativos en futuros trabajos de investigación como el presente, son los siguientes:

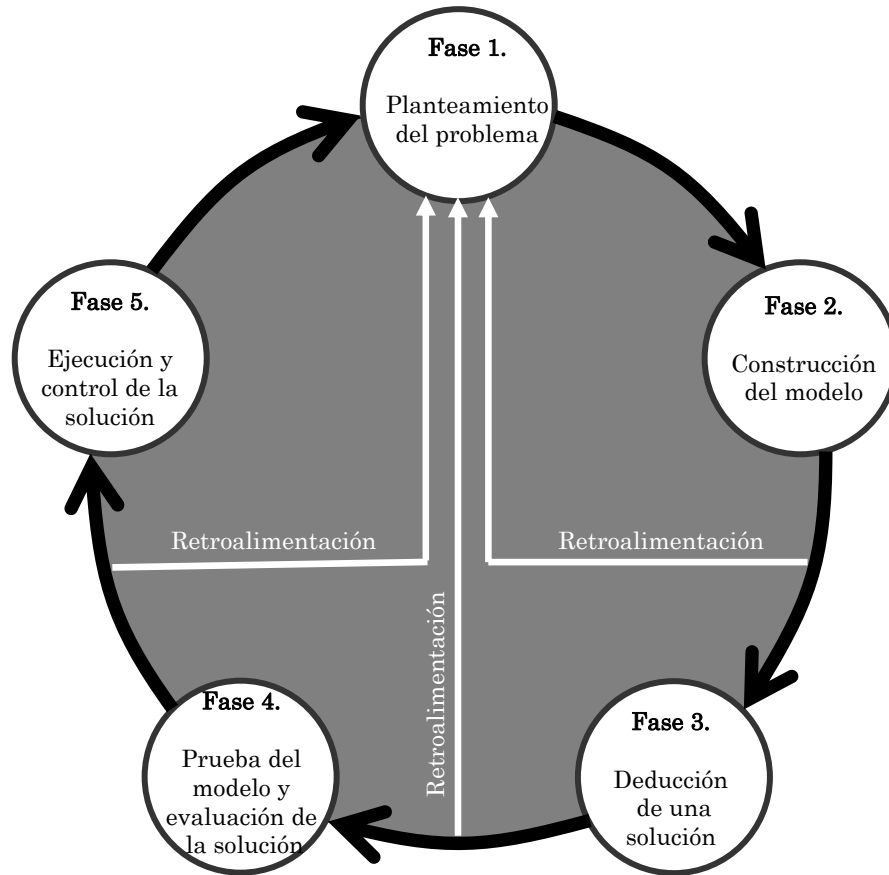


Figura 7.2. Metodología de investigación.

El concepto de *modelo* parece ser el elemento central en la metodología de IOs. Por lo consiguiente algunos comentarios generales/conclusiones acerca de los mismos se presentan a continuación:

1. En general, un *modelo* representa una idealización de la *realidad* que se desea investigar; sin embargo, ésta representación no es de ninguna manera exacta.

Dado lo anterior, los *modelos* matemáticos considerados en el presente caso de estudio son de carácter determinístico; sin embargo, la 'realidad' (si se considera el 'sistema' plataforma marina como un todo e interactuando continuamente con su entorno; ver las amenazas de riesgos listados en la sección 7.1.2.1 y Fig. 7.1) tiene elementos probabilísticos. Por lo consiguiente, un estudio más a fondo se requiere ambas consideraciones. (Además, se puede argumentar también que no existe un modelo matemático que represente lo anterior de una manera exacta).

En este contexto, se puede argumentar que los resultados del el presente análisis tienen que considerarse con una debida precaución. Lo anterior quiere decir, que los resultados del

aspecto cuantitativo no se tienen que generalizar, pero deben de interpretarse, en el sentido estricto, en el contexto de las consideraciones que se tomaron en cuenta en el proyecto. Esto es, tomando en consideración los datos de entrada, así como el software usado.

2. El software usado para llevar a cabo la simulación (ANSYS) tiene sus limitaciones también. En general, se puede argumentar que el software es muy genérico para el tipo de aplicación como el caso de estudio. Esto es, hay software en el mercado muy especializados y diseñados exclusivamente para el análisis estructural de plataformas marinas fijas; además, consideran explícitamente las cargas debidas a los factores de riesgos listados en la sección 7.1.2.1. (Ver por ejemplo, el software "SAFJAC" (Bomel, 1992); "ABACUS" (Hibbitt, et al., 1995); por mencionar algunos).

El empleo de dichos software pudo haber ayudado a explorar otros aspectos, tales como los factores de riesgo listados en la sección anterior. Por lo consiguientes, este punto puede considerarse como un limitación del presente proyecto de tesis.

3. Otro aspecto relevante acerca de *modelos* es que se requiere su validación.

En este contexto, la obvia pregunta es la siguiente: ¿cómo fueron validados los modelos usados en el presente proyecto? En este caso, la respuesta es muy simple en el hecho de que ha habido una gran cantidad de aplicaciones de los modelos matemáticos que han sido formulados para el estudio análisis de estructuras, tales como plataformas marinas. En ese sentido, se puede argumentar que dichos *modelos* han sido validados.

También, es importante destacar que el software usado también ha sido ampliamente usado en la industria y por lo consiguiente se puede argumentar que de alguna manera ha sido validado. Sin embargo, tiene sus limitaciones para la aplicación del presente caso de estudio tal y como se mencionó en el punto anterior.

Finalmente, se argumenta en el presente proyecto que una forma de validar los resultados del presente proyecto de investigación ha sido mediante la presentación y publicación de los resultados en foros especializados en el área. (Ver Anexo-L).

4. En la etapa de la metodología "Construcción del modelo y deducción de una solución" (Fig. 7.2), se puede argumentar que un *modelo* puede no representar adecuadamente la *realidad* estudiada, por lo consiguiente, puede dar una solución no adecuada.

En el contexto, de nuestro caso de estudio, lo anterior se pudo observar en el caso del accidente de la plataforma marina "Sleipner" ocurrido en 1997 en Noruega (Ver Anexo-A). El accidente ha sido considerado uno de los accidentes más costosos en la historia de la industria petrolera de ese país. Una investigación posterior al accidente encontró que un error cometido en el diseño de la plataforma (etapa de "construcción del modelo", en el contexto de la metodología de investigación) fue la causa directa del accidente. En el reporte se concluyó que hubo una aproximación imprecisa de los resultados obtenidos en el 'análisis de elementos finitos' (AEF; ver el Anexo-E para detalles del método) durante los cálculos en el diseño de la estructura.

5. En la etapa "Ejecución y control de la solución" (Fig. 7.2), se puede argumentar que esta fuera del alcance de este proyecto de investigación.

7.2 Futuro trabajo

1. Llevar a cabo la misma investigación mediante el uso de software como los mencionados anteriormente. Esto podría ayudar a entender mejor el problema asociado con fallas en estructuras desde la perspectiva de un análisis estructural (entendido como proceso mediante el cual se obtienen esfuerzos, entre otros aspectos).

2. Llevar a cabo más investigación en relación al enfoque de sistemas complejos al análisis estructural de plataformas marinas. El Anexo-I, se presentaron algunos resultados; sin embargo, no es claro si una estructura de plataforma marina puede considerarse como un sistema complejo. Esto requiere mas investigación.

3. Llevar a cabo un análisis de confiabilidad estructural considerando las cargas mencionadas en la sección 7.1.2.1 y discutidas en el Capítulo 6 (ver Fig. 7.1).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABS (American Bureau of Shipping). (2003). Guide for the Fatigue Assessment of Offshore Structures, USA.
- Ackoff, R. L. and Sasieni, M.W. (1975). *Fundamentos de Investigación de Operaciones*. Limusa. Mexico.
- Aguilar Juárez, D. (2011). Pemex desaloja plataforma en Sonda de Campeche. El Universal. Acceso: <http://www.eluniversal.com.mx/notas/758598.html>. (Fecha de acceso: 12/04/2011).
- AISC (American Institute of Steel Construction). (2001). *Manual of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design*, 3rd Edition, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, IL, USA.
- Alarcón, A. H. J. (2005). Análisis de fatiga en la estructura del helicóptero Bell-UH-1; por medio del Software AFGROW. Universidad Austral de Chile. Ingeniería Mecánica. AISC. 1998. Manual of Steel Construction Allowable Stress Design, New York.
- Alberteris, M., Capó, J. y Padovese L. (2007). Caracterización del Comportamiento Elastoplástico de Aceros Estructurales con Diferente Contenido de Carbono”, Rev. Scientiaet Technica Año XIII, No 36, Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN0122 - 1701.
- Alonso, P., Balart, S., Castillo, R., Domizzi, G., Forlerer, E., Montero, R., y Sarce, A. (2002). *Deformación plástica en metales*, Universidad Nacional de General San Martín - Comisión Nacional de Energía Atómica. Buenos Aires, Argentina
- 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.
- Ansys. 2010. Ansys-11.0 Release, 2009. Ansys Inc.
- Aparicio, G., D'Armas, H., Ciaccia, M., (2007). Comportamiento elastoplástico en tracción de láminas de acero ASTM A-569, *Revista ingeniería*, vol. 14, no 1, 57-63.
- API (American Petroleum Institute). (1993). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms -working stress design* API Recommended Practice 2A-WSD (RP2A-WSD) 20th Edition, July 1993.
- API. (1993). *Recommended Practice for Planning, Designing & Constructing Fixed Offshore Platforms*, API RP 2A. 20th edition,
- API. (1993). *Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms - load and resistance factor design* API Recommended Practice 2A-LRFD (RP2A-LRFD), First Edition, July 1993.
- API. (2000). *Offshore Structures Design Practice*, API RP 2A, 21st edition, 2000.
- API. (2004). *Specification for line pipe*. American Petroleum Institute (API-5L), 43rd Edition, December, USA., 2004.
- API. (2004). Specification for line pipe. American Petroleum Institute (API-5L), 43rd Edition, December, USA., 2004.

- API. (2007). *Recommended Practice for the Structural Integrity Management of Fixed Offshore Structures* (Draft), 2007.
- 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.
- API-RP-2A. (1997). *American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, Designing & Constructing Fixed Offshore Platforms* API RP 2A, section 17 – assessment of existing installations. USA.
- Askeland, D. R. y Phule, P. P. (2004). *Ciencia e Ingenieria de los Materiales*. Edit. Thompson, pp.135, 326.
- ASM. (1998). *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM Metals Handbook 9th Ed, Vol. 17.
- ASM. (1998). *Nondestructive Evaluation and Quality Control*. ASM Metals Handbook 9th Ed, Vol. 17.
- Associated press. (2003). Rig collapse tosses crew into water. *St. Petersburg times*. Published September 12, 2003.
- Astley R. (1992). *Finite elements in solids and structures - an introduction* First edition, published by Chapman & Hall, London, 1992
- ASTM (American Society for Testing and Materials). (1979). E1417-Standard Practice for Liquid Penetrant Examination. USA.
- ASTM. (2009). E165-09- Standard Practice for Liquid Penetrant Examination for General Industry. USA.
- ASTM. (2011). E709- Magnetic particle standard examination. USA.
- AWS D-1. (2008). Structural welding code steel.
- Baerheim, M., Hansen, K., Baerheim, K., Mestad, O. T. (1998). Single sided welded tubular joints stress concentration at the welded root, *17th International Conference on, OMAE98-0562*, by ASME.
- Baker, M.J. and Ramachandran, K. (1981). Reliability analysis as a tool in the design of fixed offshore platforms. *Proc. of 2nd Int. Symp. on The Integrity of Offshore Structures*, Glasgow, pp. 135-153.
- Barltrop N.D, Shetty N.K. and Warren, P.A. (1993). *Structural reliability methods* WS Atkins, Job No. D3894.001, Issue 02, July 1993
- Barltrop, N.D.P. and Adams A.J. (1991). Dynamics of fixed marine structures. *Butterworth Heinemann*, 3rd ed., Oxford.
- Bea, R, Sturm, A., and Miller, T. (1997). *Reassessment and requalification of two Gulf of Mexico platforms* Proc. 7th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE '97, Florence, Volume IV, pp 202-209, ISOPE.
- Bea, R. G. (1991). *Structural reliability: design and re-qualification of offshore platforms* Proc. International Workshop on Reliability of Offshore Operations, Gaithersburg, Maryland. Sponsored by MMS, US Dept of Interior, Canada Oil and Gas lands administration, Department of Energy UK, and ASCE, pp 1-30, March 1991.

- 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.
- Bea, R.G. (1993). *Evaluation of uncertainties in loadings on offshore structures due to extreme environmental conditions* J. Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE, Volume 115/237, November 1993
- Bea, R.G. (1993). *Reliability based requalification criteria for offshore platforms* Proc. 12th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE, Glasgow, Volume II, pp 351-361, ASME, 1993
- 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.
- 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.
- 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.
- Bennett, W.T. and Sharples, B.P.M. (1987). Jack-up legs to stand on?. *Mobile Offshore Structures*, Elsevier, London, pp. 1-32.
- Berger, H. (1995). 100 Years of X-Rays Industrial use of NDT and the Role of ASNT. *Materials Evaluation*, Vol 11, pp 1253-1260.
- Blanchard, B. S. 1995. *Ingeniería de Sistemas*. Edit. Gráficas Marte, España.
- Blimel, M. R. (2007). Capacidad Estructural de Juntas T Perfiles de Acero Laminado en Frio. *Rev. Ingeniería*, No.17, ISSN: 1409-2441.
- Boon, B., Vrouwenvelder, A., Hengst, S., Boonstra, H., and Daghigh, M. (1997). System reliability analysis of jack-up structures: possibilities and frustrations. *Proc. of 6th Int. Conf. Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*, City University, London.
- Borucki, J. S. (1998). Liquid Penetrant Inspection, *Nondestructive Inspection and Quality Control*. ASM Handbook 9th Ed, Vol. 17, ASM International.
- Bowles, E. J. (1993). *Diseño de acero estructural*. Edit. Limusa, México. D.F.
- BP-SRWE. (2010). *Statistical review of world energy 2007*. BP-SRWE, UK.
- Bradshaw, I. J. (1987). Jack-up structural behaviour and analysis methods. *Mobile Offshore Structures*, Elsevier, London, pp. 125-155.
- Bray, D. E. y McBride, D. (1992). *Nondestructive Techniques*. John Wiley and Sons, New York.
- Brekke, J.N., Campbell, R.B., Lamb, W.C. and Murff, J.D. (1990). Calibration of a jackup structural analysis procedure using field measurements from a North Sea jackup. *Proc. 22nd Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 357-368, OTC 6465.
- Byars, F. B., y Sinder, R. D., 1975, “Mecánica de Cuerpos Deformables”, edit. Representaciones y servicio de ingeniería, SA. México. p. 425.
- Cantú Chapa, a. (2008). Es posible Aumentar las Reservas Petroleras en Campeche, *Revista PetroQuiMex*, pp 30-35.

- Carlsen, C.A., Kjeøy , H. and Eriksson, K. (1986). Structural behaviour of harsh environment jack-ups. *The Jack-up Drilling Platform Design and Operation*, Collins, London, pp. 90-136.
- Carpenter, G. (2005). Offshore oil platform fire, India. Risk information bulletin. http://www.guycarp.com/portal/extranet/pdf/RISK-i/GC_PF_INDIA_27_JUL_2005.pdf. (Fecha de acceso: 15/05/2011).
- Carpintero. P. J M. (2011). Manual práctico de soldadura básico. Edit. Starbook
- Carter, D.J.T. (1982). Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results. *Ocean Engineering*, Vol. 9, pp. 17-33.
- Celigueta, T. J. 1998. *Curso de Análisis Estructural*. Escuela Superior de Ingeniería Industria de San Sebastian y del CEIT, pp.17-18, 25.
- Chakrabarti, S., Halkyard, J., Capanoglu, C. (2005). *Handbook of Offshore Engineering*. Elsevier
- Chase, S. B. (1998). Developing NDT Technologies for the Next Century. Structural Materials Technology: an NDT Conference, San Diego, Cal, pp 91-105,
- Checkland, P. B. (1981). *Systems Thinking, Systems Practice*. Chichester, Wiley.
- Checkland, P. B. (1995). *Systems Thinking, System Practice*. John Wiley and Sons.
- Checkland, P. B. and Scholes, J. (1990). *Soft Systems Methodology in Action*. Chichester, Wiley.
- Chen, W.F. (1988). Joint flexibility in steel frames, *Applied Science*, Elsevier, UK.
- Chen, W.F. and Richard, J.Y. (2003). *The civil engineering handbook*, Crc Press, second edition, USA.
- Chryssanthopoulos, M, Baker, M. J. and Dowling, P. J. (1987). Reliability-based design of stringer-stiffened cylinders under axial compression *Proc. 6th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*, Houston, pp 403-411, 1987
- Chryssanthopoulos, M, Baker, M. J. and Dowling, P. J. A. (1986). Reliability approach to the local buckling of stringer-stiffened cylinders *Proc. 5th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*, Tokyo, pp 64-72, 1986
- Churchman, C. W. (1992). *El enfoque de sistemas para la toma de decisiones* . Diana, México.
- Churchman, C. W., Ackoff, R. L. y Arnoff, E. L. (1957). Introduction to Operations Research, John Wiley and Sons –inc., Nueva York, N. Y.
- Cornell, C. A. (1994). Risk-based structural design *Proc. Symposium on risk analysis*, University of Michigan, pp. 2-25, 1994
- Daghigh, M., Hengst, S., Vrouwenvelder, A. and Boonstra, H. (1997). System reliability analysis of jackup structures under extreme environmental conditions. *Proc. of BOSS'97 Behaviour of Offshore Structures*, Vol. 3, Delft University of Technology, pp. 127-143.
- Daniel Grecea, Aurel Stratan and Dan Dubin. (2003). *Plastic rotation capacity of mr beam-to-column joints under cyclic loading*, Dpto. of Steel Structures and Structural Mechanics, The Politehnica University of Timisoara, European Convention for Constructional Steelwork, Technical Committee (ECCS-TC10-03-528)
- 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.
- Dawson T H *Offshore Structural Engineering* Published by Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 1993
- DE (Department of Energy). (1974). *SI 289-Offshore Installations* (Construction & Survey) Regulations, HMSO
- DE. (1990). *Department of Energy Guidance Note*, 1990.
- DE. (1990). *Offshore Installations: Guidance on Design, Construction, and Certification*, Fourth Edition, 1990
- DE. (1991). *Reassessment of Older Platforms* Final report to Dept. Of Energy, 1991, Offshore Certification Bureau OTN -91 -125
- Dier, F. A. 2005. *Tubular Joint Technology for Offshore Structures*, MSL, Engineering, Limited, Haleworth House, Steel Structures. UK.
- DNV (Det Norske Veritas). (1991). *Classification Note 30.6, Structural reliability methods*. Norway.
- DNV. (1992). *Research Report No. 91-2000*, Hovik, Norway, May 1992
- DNV. (1993). *Recommended Practice – Cathodic Protection Design, RP B401*. Norway.
- DNV. (2000). *Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures*, RP-C203. Norway.
- DNV. (2003). *Offshore Service Specifications DNV-OSS-101, Special provisions for ageing units*. Norway.
- Dugdale, D.S., Ruiz, C. (1973). *Elasticidad para técnicos*, Edit. Reverte. S.A. pp.70-74, México.
- Efthymiou M, van de Graaf J W, Tromans P S, and Hines I M. (1997). Reliability based criteria for fixed steel offshore platforms. *J. of Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE*, Vol 119 Pt 2 pp 120-124, ASME, May 1997
- Elzinga, T. and Tromans, P.S. (1992). Validation of 'NewWave' theory and RDWF predictions against measured global loading on a North Sea jacket. *6th Int. Conf. on the Behaviour of Off-Shore Structures (BOSS)*, University of London, London, pp. 495-505.
- Feodósiev, V. I. (1997). *Resistencia de Materiales*. URSS.
- Ferdinand, P. B. (2004). *Mecánica de Materiales*. Edit. McGraw-Hill, pp. 672-674.
- Forristall, G.Z., Larrabee, R.D. and Mercier, R.S. (1991). Combined oceanographic criteria for deepwater structures in the Gulf of Mexico. *Proc. 23rd Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 377-386, OTC 6541.
- Frieze, P.A., Bucknell, J., Birkenshaw, M., Smith, D. and Dixon, A.T. (1995). Fixed and jack-up platforms: basis for reliability assessment. *Proc. 5th Int. Conf. on Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*, City University, London.
- 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, (1995).
- Gere, M. J. (2002). *Mecánica de Materiales*. Edit. 5ª, edit. Thomson, pp.662-669, 774.
- Gere, M. M. y Goodno, B. J. (2009). *Mecánica de Materiales*. Edit. Cengage Learning, p. 25.

- Gigch, P. V. J. (1997). *Teoría General de Sistemas*. Edit. Trillas, 5 Reimpresión, pp. 74.
- Gottardi, G. and Butterfield, R. (1993). On the bearing capacity of surface footings on sand under general planar loads. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mech. and Fndn Engng, Vol. 33, No. 3, pp. 68-79.
- Gottardi, G. and Butterfield, R. (1995). The displacements of a model rigid surface footing on dense sand under general planar loading. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mech. and Fndn Engng, Vol. 35, No. 3, pp. 71-82.
- 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.
- 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, (1995).
- 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).
- Grenda, K.G. (1986). Wave dynamics of Jackup rigs. *Proc. 18th Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 111-116, OTC 5304.
- Hambly, E.C. and Nicholson, B.A. (1991). Jackup dynamic stability under extreme storm conditions. *Proc. 23rd Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 261-272, OTC 6590.
- Hambly, E.C., Imm, G.R. and Stahl, B. (1990). Jackup performance and foundation fixity under developing storm conditions. *Proc. 22nd Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 369-380, OTC 6466.
- 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.
- Harland, L.A., Taylor, P.H. and Vugts, J.H. (1997). The variability of extreme forces on offshore structures. *Proc. of BOSS'97 Behaviour of Offshore Structures*, Vol. 2, Delft University of Technology, pp. 221-235.
- Hernández, H., Viloría, A., Arango, Y., Jiménez, A., Mendoza, H. y Cadena, J.J., (2004). Mejoramiento del proceso de granallado para resortes de ballista utilizando medición de esfuerzos residuales por difracción de rayos x", *Revista de Ingeniería e Investigación*.
- Hobbs R. (1993). A review of the design and certification of offshore piles, with reference to recent axial pile load tests *Offshore site investigation and foundation behaviour*, Volume 28, pg 729-750, SUT, 1993
- Hobbs, R. (1993). The impact of axial pile load tests at Pentre & Tiilbrook on design and certification of offshore piles in clay 'Large-scale pile tests in clay', Ed. Clarke J, *Proceedings of the conference 'Recent large-scale fully instrumented pile test in clay'*, ICE, London, June 1992, Thomas Telford, London, 1993.
- Hokstad, P., Saele, H., Dammen, T., Vinnem, J.E., Chen, H. (2002). Operational Safety of FPSOs, Shuttle Tanker Collision Risk, Appendices, SINTEF Report STF38 F02416, Trondheim, October 2002

- Holzer, S. M. (1985). *Computer analysis of structures - matrix structural analysis structured programming* First edition, published by Elsevier Science Publishing Co. Inc., New York, 1985
- Hooi, T.E. (2006). *Behaviour and strength study on steel semi rigid connection using lusas*, University Teknologi, Malaysia, Malaysia.
- Houlsby, G.T. and Martin, C.M. (1992). Modelling of the behaviour of foundations of jack-up units on clay. *Proc. Wroth Memorial Symp. "Predictive Soil Mechanics"*, Oxford, pp. 339-358.
- Hoyle, M.J.R. (1992). Jack-up dynamics - a review of analysis techniques. *Recent Developments in Jack-Up Platforms*, Elsevier, London, pp. 176-200.
- ISO (International Standards Organisation). (2004). *Performance Parameters for Condition Monitoring of Structures*, ISO 16587, 2004.
- ISO. (1996). *Standards, ISO 2394, General Principles on reliability for structures*, DIS, 1996
- ISO. (2001). *Bases for design of structures – assessment of existing structures*, ISO 13822
- ISO. (2002). *Petroleum & Natural Gas Industries – General Requirements for Offshore Structures*, BSEN ISO199900:2002
- ISO. (2002). *Petroleum & Natural Gas Industries – Offshore Structures, Fixed Offshore structures*, 19902,
- ISO-19901. (2005). *Petroleum and Natural Gas Industries - Specific Requirements for Offshore Structures*, ISO19901 Part 3: "Topsides structure", 2005.
- ISO-19902. (2007). *Petroleum & Natural Gas Industries – Offshore Structures, Fixed Offshore Structures*, ISO 19902, 2007.
- Izzudin B and Elnashai, A. (1993). *Adaptive space frame analysis Part II: a distributed plasticity approach* Proc. Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, Vol. 99, Aug, pp. 317-326, 1993
- 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.
- 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*, N0. 45, ISSN: 0034-8570.
- J.V. Sharp, A. Stacey. (2004). Application of Structural Integrity Monitoring to Life Extension of Ageing Offshore Installations, *Major Hazards Offshore & Onshore 2004 ERA conference*, Leatherhead, Dec 2004.
- James W. Dally, William F. Riley. (2005). *Experimental Stress Monitoring*, 2005.
- Jardine, R. J. and Chow F. C. (1996). *New design methods for offshore piles* MTD report No.96/103, Marine Technology Directorate Ltd (now CMPT), London, 1996
- Jardine, R. J., and Chow, F. C. (1996). *New pile design methods from recent JIP research at Imperial College: summary and verification for offshore use* Department of Civil Engineering, Imperial College, London, SW7 2BU, May 1996
- Jaurrieta, M. A., Alonso, A., Chica., J.A. (2003). Tubular Structures X, *10th International Symposium on Tubular Structures*, Madrid, Spain.
- Jenkins, W.M. (1980). Analisis y Mecánica de las Estructuras. Middlesbrough, UK.

- Juarez. S.G. (2007). Procesos Hurst y movimiento Browniano fraccional en mercados fractales. *Rev. Administración y finanzas*. Vol. 1, No.1, 1-21.
- Karunakaran, D., Leira, B.J. and Spidsøe, N. (1992). Effect of nonlinear behaviour on long term extreme response of a dynamically sensitive jack-up platform. *Recent Developments in Jack-Up Platforms*, Elsevier, London, pp. 201-227.
- Karunakaran, D., Leira, B.J., Svano, G., and Moan, T. (1994). Foundation reliability of a jack-up platform. *Proc. 13th Int. Conf. on Offshore Mechanic and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 2, pp. 111-120.
- Kassimali, A. (1983). Large deformation analysis of elastic-plastic frames. *J. Struct. Engng*, ASCE, Vol. 109, No. 8, pp. 1869-1886.
- Kraus, B.W. (1998). Prospección, perforación y producción de petróleo y gas natural- Petróleo: prospección y perforación. En *Enciclopedia de salud y seguridad en el trabajo*, Ginebra: OIT.
- Kurobane, M.Y., Ochi, K., Vegte van der, G.J. and Wilmshurst, S.R. (1996). *Introduction to unstiffened CHS tubular joint database*. ISTS VII, 157-164.
- Lade, P.V. (1977). Elasto-plastic stress-strain theory for cohesionless soil with curved yield surfaces. *Int. J. Solids and Structures*, Vol. 13, pp. 1019-1035.
- Laszlo, B. y Bonabeau, E. (2003). Scale-Free Networks. *Scientific American*: Vol. 50.
- Light J M, DeFranco S J, Gebara J M, and Stahl B *Ultimate strength analyses of a North Sea offshore platform* SSRC Conference, USA, pp 1-27, 1995
- Liu D. K. (1988). Nonlinear Vibrations of Imperfect Thin-Walled Cylindrical Shells. Geboren te China Vliegtuigbouwkundig ingenieur.
- Lubliner, J. (2006). *Plasticity Theory*. University of California at Berkeley.
- 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.
- Mandelbrot, B. (1997). *La geometría fractal de la naturaleza*. Barcelona. Editorial Tusquets.
- Maranto, G. E. M. (2004). *Evaluación de la Seguridad Estructural*. Edit. Universidad de Los andes Facultad de Ingeniería, Republica Dominicana.
- Marshall P.W. (2004). *Review of tubular joint criteria, Connections in Steel Structures*, V – Amsterdam, Texas, USA.
- Mather, A. (1995). *Offshore engineering*. Witherby. Britain.
- McCormac, J. y Elling, R. E. (1996). *Análisis de estructuras*. Edit. Alfaomega.
- Mckenzie, M. C. W. (2006). *Example in structural analysis*. Edit. Taylor y Francis. London and newyork.
- Megson, T. H. G. (2005). *Structural and stress analysis*. El Sevier. Great Britain.
- MIL. (1995). *Nondestructive Testing Acceptance Criteria-STD-2035*.
- Moan T. and Keppel. 2004. *Safety of Offshore structures*. Centre for Offshore Research & Engineering National University of Singapore.
- Mortazavi M, and Bea, R. G. A. (1996). simplified structural reliability analysis procedure for use in assessments and requalifications of template-type offshore platforms *Proc. 6th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE '96*, Los Angeles, Volume IV, pp 438-446 ISOPE, 1996

- Mroginski, Javier L. et. al. (2004). *Análisis Tridimensional de Sólidos por el MEF*. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y Tecnológicas.
- MSL. (1995). *Engineering Reliability analysis of fixed platforms and jack-ups. Phase I: Data/literature review* MSL Engineering Ltd Ref. C166R002 Rev 0, 1995
- 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.
- Nadim, F. and Lacasse, S. (1992). Probabilistic bearing capacity analysis of jack-up structures. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 29, No. 4, pp. 580-588.
- 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.
- Nielsen, L.P., Friis Hansen, P., Jensen, J.J., Baatrup, J. and Terndrup Pedersen, P. (1994). Reliability based inspection planning of a jack-up rig. *Proc. 7th Int. Conf. on the Behaviour of Off-Shore Structures (BOSS)*, M.I.T., Boston, pp. 377-399.
- Nilson, H. A. (2001). *Diseño de Estructuras de Concreto*. Edit. Mc Graw Hill,
- Norris, V.A. and Aldridge, T.R. (1992). Recent analytical advances in the study of the influence of spudcan fixity on jack-up unit operations. *Recent Developments in Jack-Up Platforms*, Elsevier, London, pp. 424-450.
- NORSOK. (1997). *Cathodic Protection*, M-503
- NORSOK. (1997). *Condition Monitoring of Load Bearing Structures*, N-005, 1997.
- NORSOK. (1997). *Structural Design*, N-001
- NORSOK. (1998). *Design of Steel Structures*, N-004
- North, R. C. (1999). *Fatigue resistant detail design guide for ship structure*. United States Coast Guard, USA.
- Nuñez, C., Roca, A. y Jorba J. (2004). Comportamiento mecánico de los materiales volumen 2. Dpto. de Ing. Química y metalúrgica, Universitat Barcelona.
- Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R.T., W. Hess, W.G., Krumme, R., Hayes, J.R. and Sweeney, S., (2004). Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys, *Journal of structural engineering*, pp.732-740.
- 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).
- Pemex. (2007). Seguimiento fotográfico del accidente en la plataforma Usumacinta. <http://www.pemex.com>. (Fecha de acceso: 15/08/2010).
- Peñafiel R. M. A. (2010). Ensayo no destructivos para soldaduras <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2010/11/05/ensayos-no-destructivos-para-soldaduras/>
- Petrobras. (2001). P-36 accident final report. Petrobras inquiry comission. Brazil. <http://www.petrobras.com.br>. (Fecha de acceso: 06/08/2010).
- Pfeiffer, P. A. and Kulak, R. F. (1999). Residual Stress Effects in Containment Analysis. Reactor engineering Division, A. N. L., USA.

- Plumier, A., Agatino, M.R., Castellani, A., Castiglioni, C. A. and Chesi, C. (1998). Resistance of steel connections to low-cycle fatigue, *11th European Conference on Earthquake Engineering*, Balkema, Rotterdam, Netherlands.
- 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.
- Puskar, F.J., Aggarwal, R.K., Cornell, C.A., Moses, F. and Petrauskas, C. (1994). A comparison of analytically predicted platform damage to actual platform damage during Hurricane Andrew. *Proc. 26th Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 41-53, OTC 7473.
- Pytel, A. y Singer, L. F. (1987). *Resistencia de materiales*. Edit. Harper & Row. Nueva York.
- Reardon, M.J. (1986). Review of the geotechnical aspects of jack-up unit operations. *Ground Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 21-26.
- Reynoso, C. (1998). *Teorías y Métodos de la Complejidad y el Caos: Una exploración antropológica*. Teorías Antropológicas Contemporáneas Buenos Aires Biblos.
- Rodenbusch, G. (1986). Random directional wave forces on template offshore platforms. *Proc. 18th Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 147-156, OTC 5098.
- Roylance, D., (2001). *Yield and Plastic Flow*, Department of Materials Science and Engineering Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA 02139, USA.
- 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.
- 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.
- Schotman, G.J.M. (1989). The effects of displacements on the stability of jack-up spud-can foundations, *Proc. 21st Offshore Technology Conference*, Houston, pp. 515-524, OTC 6026.
- 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.
- Selby, R.G., Vecchio, F.J., and Collins, M.P. (1997). The Failure of an Offshore Platform. *Concrete international*, Vol. 19, Issue 8, 28-35.
- Shanley, R. F. (1971). *Mecánica de Materiales*. Edit. McGraw-Hill, pp.295.
- Sharples, B.P.M., Bennett Jr, W.T. and Trickey, J.C. (1989). Risk analysis of jack-up rigs. *Proc. of 2nd Int. Conf. on the Jack-Up Drilling Platform*, City University, London, pp. 101-123.
- 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.
- Sibaja, RA., Ramírez, T. M. (2003). Estimación de Daño por Fatiga Mediante Mecánica del Daño Continuo, *Ingenierías*, octubre-diciembre, 2003, vol. VI, No. 21, Universidad Veracruzana, México.

- Sieh, Y. Y. (1986). *Teoría Elemental de Estructuras*. Edit., Prentice-Hall, PP. 2-3, 147-167, 206.
- Sigurdsson, G., Skjong, R., Skallerud, B. and Amdahl, J. (1994). Probabilistic collapse analysis of jackets, *Proc. of 13th Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 2, pp. 367-379.
- SNAME (1994). Guidelines for site specific assessment of mobile jack-up units. *Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Technical and Research Bulletin 5-5A, New Jersey.
- Spidsøe, N. and Karunakaran, D. (1993). Non-linear dynamic behaviour of jack-up platforms. *Proc. of 4th Int. Conf. Jack-Up Platforms Design*, City University, London.
- Stacey A, Birkinshaw M, Sharp J.V., 2002, Reassessment Issues in Life Cycle Structural Integrity Management of Fixed Offshore Installations, OMAE Conference Oslo, Paper no. 28610.
- Stiff, J.J., Sharples, B.P.M. and Bowie, R.D. (1997). Jack-ups: classification past, present, and future. *Proc. of 6th Int. Conf. Jack-Up Platform Design, Construction and Operation*, City University, London.
- Stokes, G.G. (1847). On the theory of oscillatory waves. *Trans. Camb. Philos. Soc.*, Vol. 8, pp. 441-455.
- Strelkóv, (1978). *Mecánica*, edit. Mir Moscow, P. 293.
- Talie-Faz, F., Dover, W.D. and Brennan, F. P., (2002). Static strength of cracked high strength steel tubular joints. USA.
- Timoshenko S. (1957). *Resistencia de materiales*, Edit. Espasa-Calpe, S.A. México, p.25.
- Timoshenko, et. al., (1961). *Theory of Elastic Stability*. Eit. McGraw-Hill, pp.300.
- Touger, H.E. (2001). NFPA and the offshore oil industry are helping to resolve dueling federal fire safety standards. *NFPA Journal*, September/October 2001, 46-50.
- Tromans P S, Rozario J B, Vanderschuren L, Taylor PH, and van de Graaf J W. (1993). *New models for extreme storm loading and the reliability of fixed offshore structures* Proc. SUT Conference, London, pp 1-19, November 1993
- Vable, M. (2002). *Mecánica de Materiales*. University Oxford, pp. 87-162.
- 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.
- Vesic, A.S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations. *In Foundation Engineering Handbook (ed. Winterkorn, H.F. and Fang, H.Y.)*, Van Nostrand, New York, pp. 121-147.
- 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, (1994).
- Vinnem, J E., Hauge, S., Huglen, Ø., Kieran, O., Kirwan, B., Rettedal, W K., Skåren, T., Thomas, J J. (2000). Systematic Analysis of Operational Safety of FPSOs Reveals Areas of Improvement, paper presented at the SPE International Conference on Health, Safety, and the Environment in Oil and Gas Exploration and Production held in Stavanger, Norway, 26–28 June 2000.

- Vinnem, J.E., Hokstad, P., Saele, H., Dammen, T., Chen, H. (2002). Operational Safety of FPSOs, Shuttle Tanker Collision Risk, Main report, NTNU Report MK/R 152, Trondheim, October 2002
- 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.
- Vughts, J.H. (1990). Environmental forces in relation to structure design or assessment. *SUT Conference on Environmental Forces on Offshore Structures*, London, Keynote paper, November, (1990).
- Williams, S. (2007)., “Chain Test’ – Automated Inspection of Mooring Chains”, TWI Collaborative Research Knowledge Summary, http://www.twi.co.uk/j32k/protected/band_3/crks1.html, 2007.
- Yao, J.T.P., and Munse, W.H., (1961). Low-cycle fatigue of metals-literature review, National Academy of Sciences-National Research Council, U.S.
- 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.
- Young, A.G., Remmes, B.D. and Meyer, B.J. (1984). Foundation performance of offshore jack-up drilling rigs. *J. Geotech Engng Div.*, ASCE, Vol. 110, No 7, pp. 841-859, Paper No. 18996.
- Young, M.C., Tsay, L. W., Shin C. S., Chan, S.L. (2007). The effect of short time post-weld heat treatment on the fatigue crack growth of 2205 duplex stainless steel welds, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 2156-2162.
- Yu, M., (2002). *Advances in strength theories for materials under complex stress state in the 20th Century*, ASME Reprint No AMR325, USA.
- Zuheir B. (2008). *Residual Stress Analysis and Fatigue Assessment of Welded Steel Structures*. Department of Aeronautical and Vehicle Engineering Kungliga Tekniska Högskolan (KTH).

Accidentes en Estructuras de Plataformas Marinas

A1. Accidente en la plataforma "Piper Alpha", Reino Unido.

El 06 de julio de 1988, comenzó a trabajar en una de las dos bombas de inyección de condensado, denominados A y B, que se utiliza para comprimir el gas en la plataforma antes del transporte del gas a la terminal "Flotta". Una válvula de seguridad fue retirada de un compresor para la calibración y la renovación de la certificación y dos bridas ciegas se instalaron en la tubería abierta. (Touger, 2001).



Figura A1. Accidente en "Piper Alpha". (Touger, 2001).

Durante la noche del 06 de julio, la bomba B falló y el personal del turno de noche decidió que la bomba A debería entrar en operación. Una vez que la bomba estaba en funcionamiento, condensado de gas se filtró desde las dos bridas, y cerca de las 22.00 horas, el gas se encendió y explotó, provocando incendios y daños a otras áreas. Unos cincuenta minutos más tarde, alrededor de las 2250 horas, se produjeron nuevas explosiones, seguidos del colapso estructural de una parte importante de la instalación. 167 personas perdieron la vida como consecuencia de las explosiones y el incendio a bordo del Piper Alpha. (Fig. A1).

A3. Accidente en la plataforma "Parker 14-J", Estados Unidos.

La barcaza de perforación de la plataforma 14-J, propiedad de la empresa Parker Drilling, se hostigan en la nueva localización, cuando surgió un problema con el jacking motor número 2, en la pierna del estribor. Inmediatamente comenzaron las operaciones de reparación, donde un bloque de cuña se introduce para evitar el movimiento de los engranajes de elevación y el motor defectuoso fue removido. Aunque disminuirá el peso sobre el bloque hasta los topes, los engranajes en el número 1 de inflexión del gato de arranque del motor haciendo que el lado de estribor de la embarcación a la baja. (Asociate Press, 2003).

Varios hombres, entre ellos el operador de la grúa, resultaron heridos durante el colapso de la instalación. Los trabajadores fueron evacuados y llevados al hospital mediante el empleo de Helicópteros. (Fig. A2).



Figura A2. Accidente de la plataforma "Parker-14J". (Asociate Press, 2003).

A2. Accidente en la plataforma "P-36", Brazil.

La plataforma "P-36" fue originalmente llamada el 'Espíritu de Colón' y fue construido entre 1984 y 1994 en Italia. Diseñado como una unidad flotante de producción, la plataforma se basa en la conversión de la "Friede Goldman y L-1020" de tipo semi-sumergible. Fue rediseñado por Petrobras entre 1997 y 1999 y puso en funcionamiento en el campo de Roncador en la costa de Brasil, en mayo de 2000. La unidad era capaz de procesar 180.000 bpd y 7,2 millones de metros cúbicos de gas por día. En mayo de 2001, en la P-36 se producían alrededor de 84.000 barriles de petróleo y 1,3 millones de metros cúbicos de gas por día cuando colapsó por dos explosiones causando su hundimiento. (Ver Fig. A3).



Figura A3. Accidente en plataforma "P-36". (Petrobras, 2001).

Había alrededor de 175 trabajadores a bordo, de los cuales 138 fueron evacuadas por la grúa al barco entre 0144 a 0420 horas del 15 de marzo de 2001. La tripulación restante fueron evacuados en helicóptero en 0603 la misma mañana en que la estabilidad de la plataforma se deterioró. En los días siguientes, se hicieron intentos para estabilizar la plataforma mediante la inyección de nitrógeno en una tubería de ventilación junto a la columna dañada, pero el mal tiempo interrumpió las operaciones de rescate. La plataforma se hundió finalmente en torno a las 11.40 horas del 20 de marzo 2001 antes de hundirse a 1.300 metros de agua, por lo que el salvamento de la unidad fue imposible. (Petrobras, 2001).

A4. Accidente en plataforma marina en la India

El campo de alta Mumbai fue descubierto en 1974 y está situado en el Mar Árabe 160 kilómetros al oeste de la costa de Mumbai, India. El campo se divide en los bloques Norte y Sur, operado por la petrolera estatal y Natural Gas Corporation (ONGC). El complejo

petrolero estaba compuesto por cuatro plataformas unidas por puentes. En julio de 2005, un buque de apoyo de usos múltiples (MSV) chocó con la plataforma de MHN, cortando por lo menos un riser de gas y causando un gran incendio que destruyó la plataforma de MHN en dos horas. (Fig. A4)



Figura A4. Accidente en plataformas-India. (Carpenter, 2005).

El accidente se produjo el 27 de julio de 2005, el Noble Yester Charlie jack-up estaba llevando a cabo las operaciones de perforación en el campo y se coloca sobre la plataforma de NA. El MSV estaba trabajando en otro lugar en el campo de apoyo a las operaciones de buceo. El MSV se acercó a la plataforma (MHN) para asistir una emergencia, dado que un trabajador había sido lesionado. Alrededor de las 1605 horas, fuertes mareas empujaron el MSV hacia la plataforma de MHN, haciendo que el helipuerto en la parte trasera de la embarcación cortara una o más tuberías de exportación de gas en la chaqueta del MHN. Lo anterior resultó en una fuga de gas resultando en un incendio y explosión dentro de pocos segundos. El incendio causó la destrucción total de las plataformas MHN y MHF. El accidente causó la pérdida de 22 vidas humanas. (Carpenter, 2005).

A5. Accidente en plataforma "Sleipner", Noruega.

La Plataforma Sleipner de tipo Condeep (abreviado de estructura de hormigón de aguas profundas), construida para Statoil en Noruega. La plataforma Condeep tipo consta de dos unidades, el casco y la cubierta. El casco es una base formada por la gravedad de los pilotes de apoyo y cámaras de hormigón de lastre de los que tres o cuatro ejes de ascenso y en la que se asienta la cubierta. Una vez que esté lastrada, el casco se sienta en el fondo del mar. (Selby, et al., 1997). En el caso de la Sleipner, había 24 cámaras, cuatro de los cuales formaron las "patas" el apoyo a la instalación en la parte superior. (Fig. A5).



Figura A5. Accidente en plataforma "Sleipner". (Selby, et al., 1997).

En agosto de 1991, antes de la unión del casco y la cubierta de la unidad, el casco fue remolcado en Gandsfjord (Noruega) donde se iba a bajar en el agua en una operación de lastrado controlado a una velocidad de 1 metro por 20 minutos. A medida que el casco se redujo a la marca de 99m, los ruidos se oían retumbar seguido por el sonido de agua cayendo en la unidad. Se produjo una grieta seria causando que el agua de mar se vertiera en un ritmo que era demasiado grande para las bombas de desagüe. A los pocos minutos el casco comenzó a hundirse a una velocidad de 1 m por minuto. (Selby, et al., 1997).

La investigación posterior al accidente, se descubrió que la causa fundamental del fracaso fue un error cometido en el diseño de la plataforma. Se concluye que hubo una aproximación imprecisa de los resultados obtenidos en el análisis de elementos finitos (AEF) durante los cálculos en el diseño de la estructura. En esencia, las tensiones en las cámaras de lastre se subestimó en un 47% y el espesor de los muros del hormigón se habían diseñado demasiado delgados. (Selby, et al., 1997).

A6. Accidente en plataforma "Usumacinta", México.

El 23 de octubre del 2007, la plataforma autoelevables (PAE) "Usumacinta" (propiedad y operada por la empresa perforadora Central (PC)), estaba siendo posicionada para llevar a cabo operaciones de perforación para un pozo nuevo para la plataforma de producción KAB-101 cuando se presentó una tormenta fuerte (Pemex, 2007). Durante la tormenta se perdió el control de uno de los pozos existentes, por lo que hubo que evacuar la plataforma. El accidente causó la pérdida de 22 vidas humanas después de que los 73 empleados de Pemex y de empresas contratistas abandonaran la plataforma en 2 botes salvavidas en condiciones caracterizadas por oleajes intensos y fuertes vientos (Pemex, 2007). (Fig. A6).



Figura A6. Accidente en plataforma "Usumacinta". (Pemex, 2007).

A7. Accidente en plataforma "Jupiter", México.

El 12 de abril de 2011 ocurrió un accidente en la plataforma habitacional semi-sumergible (PSS) Flotel Júpiter, ubicada a 80 kilómetros de Ciudad del Carmen, Campeche. Petróleos Mexicanos (Pemex) informó que fueron evacuados 638 trabajadores de la plataforma, luego

de que registró una inclinación por la entrada de agua al "pontón de babor a popa" (Aguilar Juárez, 2011). En un comunicado, Pemex señaló que no hubo lesionados o derrame. Adelantó que un equipo de buzos especializados realiza el sellado y achique del pontón mientras normalizan los niveles de agua en ambos lados de la plataforma a fin de estabilizarla, lo que sucederá esta tarde (Aguilar Juárez, 2011). (Fig. A7).



Figura A7. Accidente en plataforma habitacional "Jupiter". (Aguilar Juárez, 2011).

Sistemas y Sistemas Complejos

B1 Tipos de sistemas

B1.1 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 interfase 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. 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. (Checkland, 1981, 1995; Checkland y Scholes 1990).

B1.2 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. 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). (Checkland, 1981, 1995; Checkland y Scholes 1990).

B1.3 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. (Checkland, 1981, 1995; Checkland y Scholes 1990).

B1.4 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 numero 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. (Checkland, 1981, 1995; Checkland y Scholes 1990).

B1.4.1 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.

B2. Sistemas Complejos-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. La geometría euclidiana describe por medio de fórmula, asigna dimensiones entera a los objetos y es adecuada para describir objetos hechos por el hombre. En contraparte, la 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.

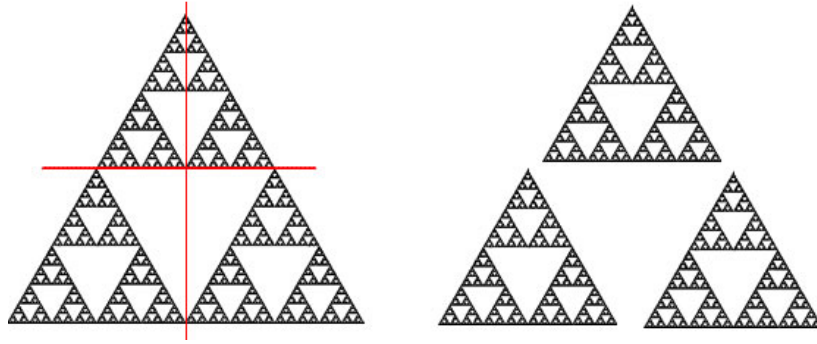


Figura B1. Triangulo Sierpinski Fractal auto similar.

B2.1 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.

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. (Juarez, 2007).

- 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.

B2.2 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 Hilber. (Juarez, 2007).

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. (Juarez, 2007).

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. (Juarez, 2007).

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:

$$R = T^{0.5} \tag{B.1}$$

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):

$$(R/S)_n = cn^H \quad (\text{B.2})$$

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

$$\ln(R/S)_n = \log(c) + H \log(n) \quad (\text{B.3})$$

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]:

$$\log(R/S)_n = 0.5 \left(\log n + \log \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{B.4})$$

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 avanza 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 C1, 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.

$$GL = N.D.N - N.D.R \quad (C1)$$

Donde:

GL = Grados de libertad o desplazamientos

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

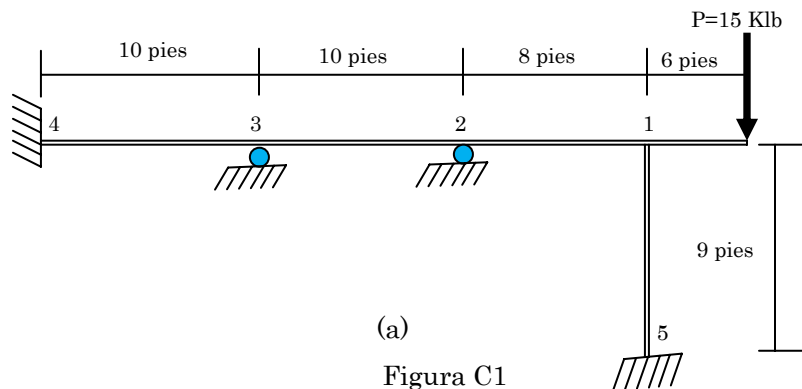
$N.D.R$ = Número de desplazamientos restringidos

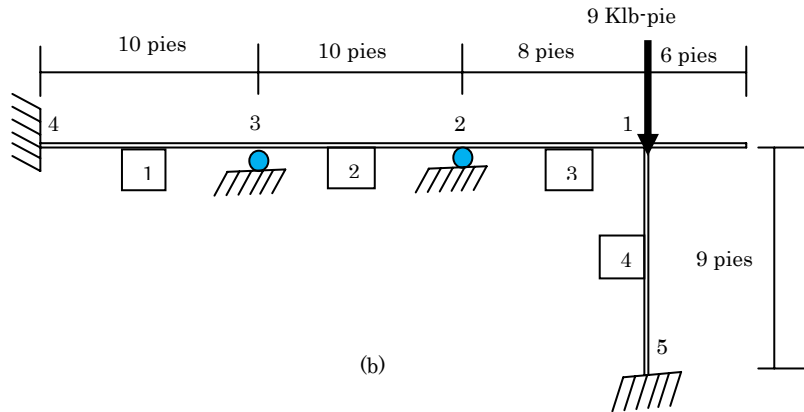
Se supone que las deformaciones principales son de flexión y que las axiales son despreciables, entonces los únicos movimientos posibles de las juntas son las de rotación. Además, la carga de 15 Klb y de 90 pie-Klb en la junta 1 representan el efecto de una viga en voladizo sobre el resto del marco.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

$$\begin{Bmatrix} M_B \\ M_E \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4EI/L & 2EI/L \\ 2EI/L & 4EI/L \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_B \\ \theta_E \end{Bmatrix} \quad (C2)$$

El primer renglón de esta relación matricial representa la ecuación de equilibrio en la dirección Δ_1 , es decir, $\sum M_1 = 0$.





Miembros:

Miembro 1.

$$\begin{matrix} & 4 & 3 \\ 4 & & \\ 3 & & \end{matrix} \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (C3)$$

Miembro 2

$$\begin{matrix} & 3 & 2 \\ 3 & & \\ 2 & & \end{matrix} \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (C4)$$

Miembro 3

$$\begin{matrix} & 2 & 1 \\ 2 & & \\ 1 & & \end{matrix} \begin{bmatrix} 12.5 & 62.5 \\ 62.5 & 12.5 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (C5)$$

Miembro 4

$$\begin{matrix} & 1 & 5 \\ 1 & & \\ 5 & & \end{matrix} \begin{bmatrix} 55.55 & 27.77 \\ 27.77 & 55.55 \end{bmatrix} (10^{-3}) \quad (C6)$$

Matriz global

$$\begin{Bmatrix} -1080 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 125+55.55 & 62.5 & & & 27.77 \\ & 62.5 & 100+125 & 50 & \\ & & 50 & 100+100 & 50 \\ & & & 50 & 100 \\ 27.77 & & & & 55.55 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \\ \Delta_4 \\ \Delta_5 \end{Bmatrix} (10^{-3}) \quad (C7)$$

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

$$\begin{aligned} M_{12} &= 62.5\Delta_2 + 125\Delta_1 \\ M_{15} &= 55.55\Delta_1 + 27.77\Delta_5 \end{aligned} \quad (C8)$$

Sustituyendo en las ecuaciones de equilibrio, tenemos.

$$(125 + 55.55)\Delta_1 + 62.5\Delta_2 + 27.77\Delta_5 = -1080 \text{ pul} - \text{klb} \quad (C9)$$

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 Δ_4 y Δ_5 son ceros y el proceso general de resolución se reduce a.

$$\begin{aligned} \{\Delta_p\} &= [K_{pp}]^{-1} (\{P_p\} - [K_{pr}]\{\Delta_r\}) \\ \{\Delta_p\} &= [K_{pp}]^{-1} \{P_p\} \end{aligned} \quad (C10)$$

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

Al resolver, se obtiene los desplazamientos.

$$\begin{Bmatrix} \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -6.6590 \times 10^{-3} \\ +1.9585 \times 10^{-3} \\ -4.8963 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} \quad (C11)$$

Al sustituir los valores de la ecuación (C11), se obtienen los momentos que se producen sobre los extremos de los miembros:

$$\begin{aligned}
\begin{Bmatrix} M_B^1 \\ M_E^1 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 0 \\ -4.8963 \times 10^{-4} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -24.48 \text{ pulg-klb} \\ -48.96 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} M_B^2 \\ M_E^2 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 100 & 50 \\ 50 & 100 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -4.8963 \times 10^{-4} \\ 1.9585 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} +48.96 \text{ pulg-klb} \\ +171.37 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} M_B^3 \\ M_E^3 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 125 & 62.5 \\ 62.5 & 125 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} 1.9585 \times 10^{-3} \\ -6.659 \times 10^{-3} \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -171.37 \text{ pulg-klb} \\ -709.97 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix} \\
\begin{Bmatrix} M_B^4 \\ M_E^4 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 55.55 & 27.77 \\ 27.77 & 55.55 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} -6.659 \times 10^{-3} \\ 0 \end{Bmatrix} (10^3) = \begin{Bmatrix} -369.91 \text{ pulg-klb} \\ -184.95 \text{ pulg-klb} \end{Bmatrix}
\end{aligned} \tag{C12}$$

Siendo que el esfuerzo, esta relacionado por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{\sigma I_c}{y} \tag{C13}$$

Donde:

M =Momento de flexión en cm·kg

σ = Esfuerzo en el elemento en kg/cm²

I_c =Momento de inercia de la sección en cm⁴

y = Superficie del eje neutro en cm

Esfuerzos térmicos, Deformación plástica y Fatiga

D1. 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 (Shanley, 1971), 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 δ_o , este alargamiento se manifiesta en un intervalo de tiempo t_o como se nota en la Figura D1a, 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 σ_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 D1.

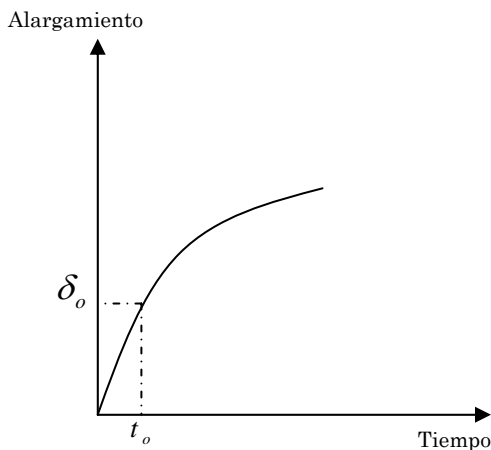


Figura D1a. Termofluencia de una barra

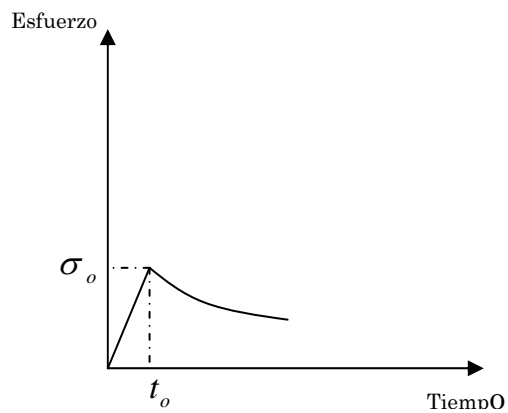


Figura D1b. Relajación de esfuerzo

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

$$\eta = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{D1}$$

Donde η es la viscosidad de corte, σ es el esfuerzo de tensión y $\dot{\epsilon}$ razón de cambio de deformación por tensión (Lubliner, 2006). Las fuentes energéticas del crecimiento, en condiciones de termofluencia, están asociadas al esfuerzo de cendencia. 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.

$$\dot{\epsilon} = A e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (D2)$$

En cuanto se aplica la carga de esfuerzo de tensión, el material se deforma elásticamente en pequeña cantidad, como se observa en la Figura B2. Siendo que la rapidez de la termofluencia esta dado por:

$$\text{Rapidez de termofluencia} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad (D3)$$

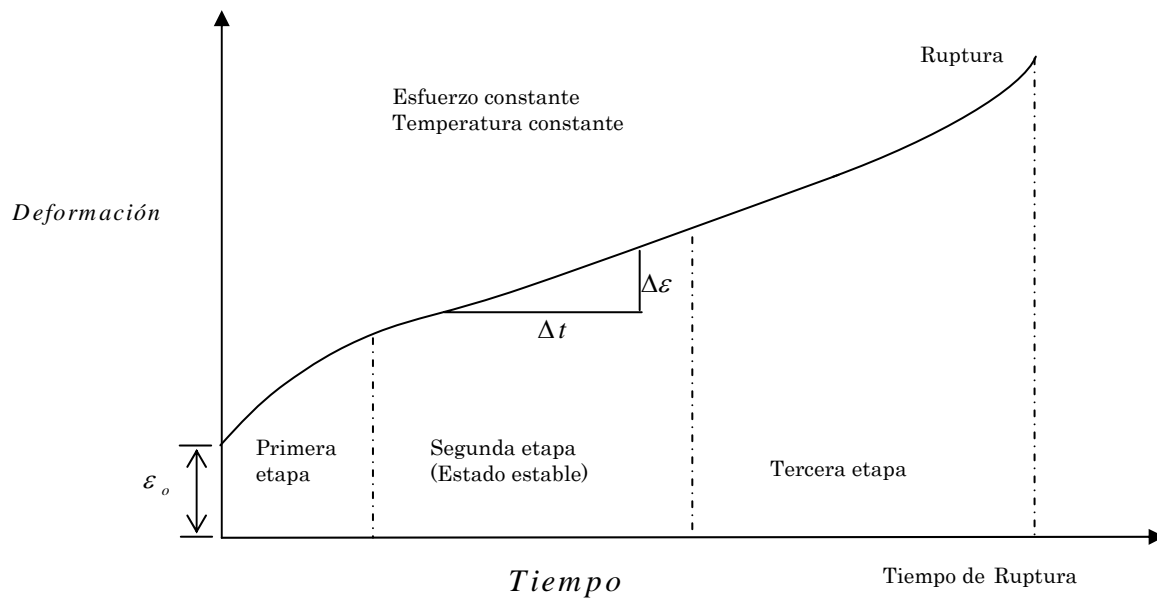


Figura B2. Curva típica de deformación producida en función de tiempo para esfuerzo y temperatura constante. (Castellanos, 2009).

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.

$$\dot{\epsilon} = A' [\sinh(\alpha \sigma)]^n e^{\frac{-Q}{RT}} \quad (D4)$$

Siendo A' (área de números de átomos) una constante del material y α la tensión inversa que marca el cambio de comportamiento de potencial a exponencial, σ es el esfuerzo de tensión. Los valores del exponente n son próximos a 5, que es el valor correspondiente a una deformación regida por el movimiento de dislocaciones.

D2. 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 costera repercutirá en los nodos (Blimel, 2007). 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. (Albertaris, et al., 2007).

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. 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 Δt^l . Dentro de cada elemento se puede suponer la siguiente variación de temperatura.

$$\Delta t(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n \phi^i \Delta t^i \quad (D5)$$

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

$$\varepsilon_{ii}^0 = -\alpha \Delta t \quad (D6)$$

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

$$\sigma_{ii}^0 = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} \quad (D7)$$

$$\sigma^0 = \begin{Bmatrix} \sigma_{11}^0 \\ \sigma_{22}^0 \\ \sigma_{33}^0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sigma_{nn}^0 \end{Bmatrix} = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ n \end{Bmatrix} \quad (D8)$$

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

$$\sigma = \sigma^0 + C\varepsilon \quad (D9)$$

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

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = -\frac{E\alpha\Delta t}{(1-2\nu)} + \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (D10)$$

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

$$W_e = h \int_A \left(\frac{1}{2} \varepsilon^T C \varepsilon - \frac{E\alpha\Delta t}{(1-\nu)} \varepsilon^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right) dA \quad (D11)$$

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

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix} = \frac{1}{2A} \begin{bmatrix} -b^1 & b^2 & -b^3 \\ a^1 & a^2 & a^3 \\ a^1 & b^1 & a^2 b^2 & a^3 & -b^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_2^2 \\ u_1^3 \\ u_2^3 \end{Bmatrix} \quad (D12)$$

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

$$\int_A \Delta t dA = \int_A (\xi^1 \square t^1 + \xi^2 \square t^2, \dots, \xi^n \square t^n) dA \quad (D13)$$

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

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

$$\Delta t^M = (\Delta t^1 + \Delta t^2 + \Delta t^3, \dots, \Delta t^n) \quad (D14)$$

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

$$K_e = \frac{h}{4A} \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} -b^1 & a^1 \\ & a^1 & -b^1 \\ -b^2 & & a^2 \\ & a^2 & -b^2 \\ -b^3 & & a^3 \\ & a^3 & -b^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (D15)$$

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

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-\xi) & 0 & \xi & 0 \\ 0 & (1-\xi) & 0 & \xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1^1 \\ u_2^1 \\ u_1^2 \\ u_2^2 \end{bmatrix} \quad (D16)$$

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, de la energía interna de deformación se tiene finamente:

$$W_e = \frac{h}{2} u_e^T B^T C B u_e \int_A dA - \frac{Eh\alpha}{(1-\nu)} u_e^T B^T \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \int_A \Delta t dA \quad (D17)$$

$$W_e = \frac{1}{2} u_e^T u_e K_e - u_e^T \begin{bmatrix} -b^1 \\ a^1 \\ -b^2 \\ a^2 \\ -b^3 \\ a^3 \end{bmatrix} \frac{Eh\alpha\Delta t^M}{2(1-\nu)} \quad (D18)$$

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 Δ_d y el incremento del tiempo Δt [160].

$$R_d = \frac{\Delta_d}{\Delta t} \quad (D19)$$

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 D3.

$$\varepsilon^{EPT} = \left(\left(-\frac{\Delta\sigma_c t^2}{E} \right) - \frac{\frac{\pi E \beta}{\frac{D}{2} 4(1-\nu^2)}}{E} \right) \frac{Et\alpha\Delta T^M}{2(1-\nu)} \quad (D20)$$

En donde:

σ_c = Esfuerzo crítico en kg/cm²

E = Módulo de elasticidad del acero, 2.1 x 10⁶ kg/cm²

t = Espesor del cilindro en cm

D = Diámetro del cilindro en cm

ν = Coeficiente de Poisson

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

ΔT^M = Cambio térmico medio en Kelvin

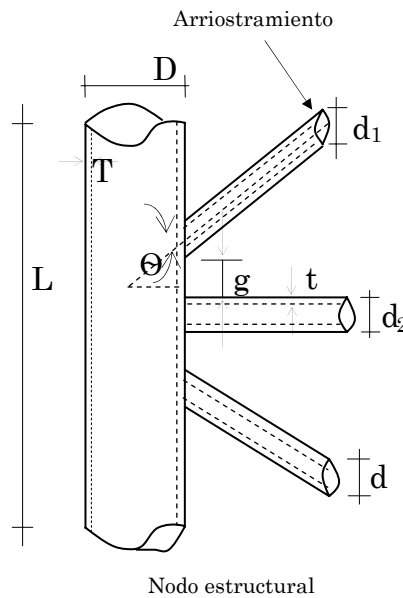


Figura D3. Junta estructural tipo K-T. (Bea y Young, 1993; Murthy, et al., 2004).

D3. 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 D4 (Megson, 2005; Zuheir, 2008; North, 1999).

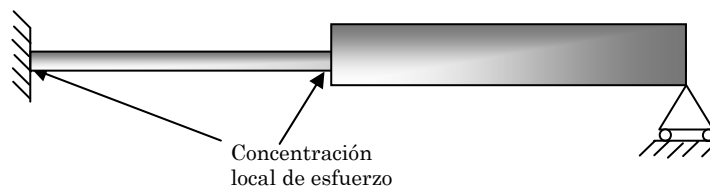


Figura 2.23. Concentración de esfuerzo. (Megson, 2005).

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 D5, se producen grietas microscópicas que crecen a cada aplicación hasta que el elemento estructural se fracture bruscamente.

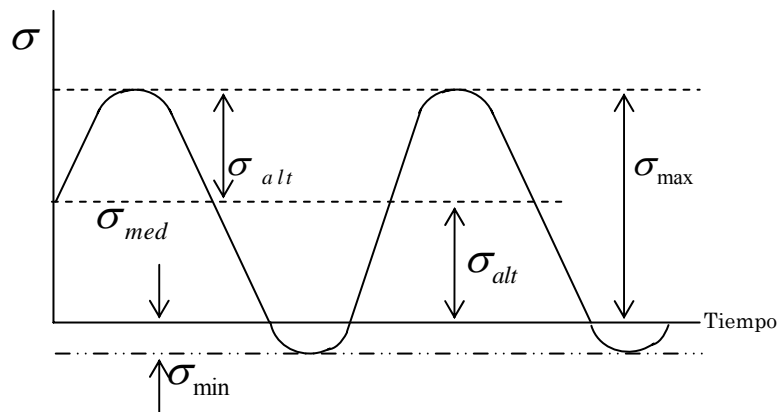


Figura D5. Alternando esfuerzo por fatiga. (Megson, 2005).

D3.1 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 D6.

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 (Gere y Goodno, 2009; Lublinier, 2006; Jenkins, 1980; API, 2004).

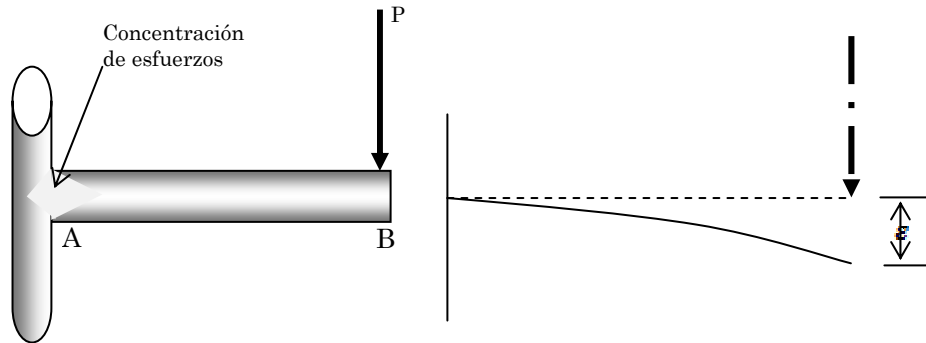


Figura D6. Concentración de esfuerzos en nodos. (Gere y Goodno, 2009).

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 E1, 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 $t = 0.2 \text{ pulg}$.

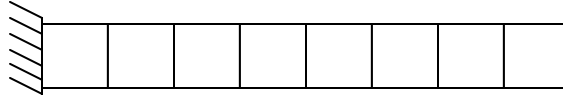


Figura E1. Sistema discretizado en elemento cuadriláteros

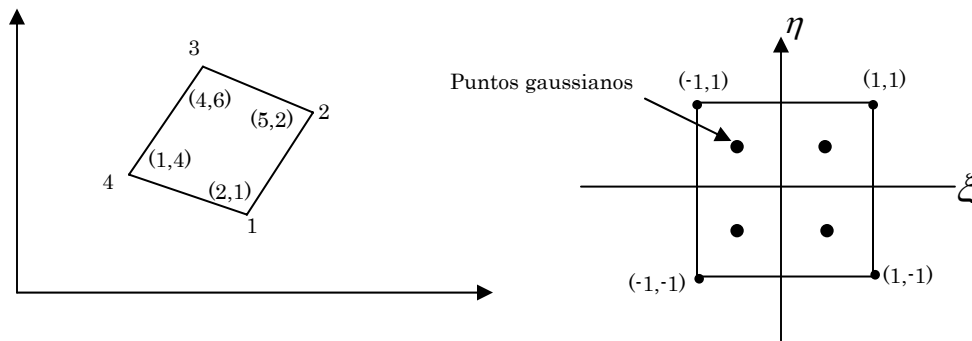


Figura E2. Elemento cuadrilátero en el sistema físico (x, y) y en el de referencia (ξ, η) .

Se empleara la regla de Gauss con 2×2 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:

$$\{x^e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 10 \\ 10 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad \{y^e\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 6 \\ 6 \end{Bmatrix} \quad (E1)$$

La matriz de elasticidad para esfuerzo plano es:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10.989 & 3.296 & 0 \\ 3.296 & 10.989 & 0 \\ 0 & 0 & 3.846 \end{bmatrix} \times 10^6 \quad (E2)$$

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:

$$J_{11} = \{x^e\}^T \frac{\partial N^T}{\partial \xi}$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1-\eta)x_1 + (1-\eta)x_2 + (1+\eta)x_3 - (1+\eta)x_4] \quad (E3)$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 + (1+0.57735)10 + (1-0.57735)10 - (1-0.57735)] = 5$$

De la forma similar se tiene

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 + (1+0.57735)0 + (1-0.57735)6 - (1-0.57735)6] = 0$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 - (1-0.57735)10 + (1-0.57735)10 + (1+0.57735)0] = 0 \quad (E4)$$

$$J_{11} = \frac{1}{4} [-(1+0.57735)0 - (1+0.57735)0 + (1-0.57735)6 + (1+0.57735)6] = 3$$

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix} \quad (E5)$$

El determinante se podría determinar cómo:

$$|\det J| = J_{11}J_{22} - J_{21}J_{12} = 15 \quad (E6)$$

Sea $dA = dx dy = |\det J| d\xi d\eta = |\det J| w_1 w_1 = 15$. Notar que los pesos en este caso son $w_1 = 1$. Las matrices $[G]$ y $[H]$ calculadas de acuerdo con

$$[G] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} & 0 \\ \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} & 0 \end{bmatrix} \quad (E7)$$

$$[H] = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\partial N_1}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \xi} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \xi} \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial \eta} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \quad (E8)$$

Aplicando la ecuación (B7) y (B8) tenemos:

$$\begin{aligned}
 [G] &= \begin{bmatrix} -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 & -0.1057 & 0 \\ -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 \end{bmatrix} \\
 [H] &= \begin{bmatrix} 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 & -0.1057 \\ 0 & -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{E9}$$

De modo que los renglones de $[B]$, son:

$$\begin{aligned}
 [J_{11}^* J_{12}^*][G] &= [-0.07890 + 0.07890 + 0.02110 - 0.2110] \\
 [J_{21}^* J_{22}^*][H] &= [0 - 0.1314 - 0.03520 + 0.03520 + 0.1314] \\
 [J_{21}^* J_{22}^*][G] + [J_{11}^* J_{12}^*][H] &= [-0.1314 - 0.0789 - 0.0352 + 0.0789 + 0.0352 + 0.0211 + 0.1314 - 0.0211]
 \end{aligned} \tag{E10}$$

Por lo que la matriz $[B]$ evaluada en el primer punto gaussiano 1 es:

$$[K]_1 = [B]_1^T [D][B]_1 t dA \tag{E11}$$

Donde dA está definido de esta forma:

$$[K]_1 = \begin{bmatrix} 4.044 & 2.221 & -1.516 & -0.921 & -1.083 & -0.595 & -1.444 & -0.704 \\ & 6.413 & -0.704 & 0.808 & -0.595 & -1.718 & -0.921 & -5.503 \\ & & 2.193 & -0.595 & 0.406 & 0.188 & -1.083 & 1.111 \\ & & & 1.1267 & 0.2469 & -0.2166 & 1.2698 & -1.718 \\ & & & & 0.290 & 0.159 & 0.387 & 0.188 \\ & & & & & 0.460 & 0.246 & 1.474 \\ & & & & & & 2.1409 & -0.595 \\ & & & & & & & 5.747 \end{bmatrix} \times 10^5 \tag{E12}$$

Punto gaussiano 2

(B13)

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 & -0.3943 & 0 \\ -0.3943 & 0 & -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{E13})$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0211 & 0 & 0.0211 & 0 & 0.0789 & 0 & -0.0789 & 0 \\ 0 & -0.1314 & 0 & -0.0352 & 0 & 0.0352 & 0 & 0.1314 \\ -0.1314 & -0.0211 & -0.0352 & 0.0211 & 0.0352 & 0.0789 & 0.1314 & -0.0789 \end{bmatrix}$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 2.140 & 0.595 & 0.387 & -0.246 & -1.083 & -1.269 & -1.444 & 0.921 \\ & 5.747 & -0.188 & 1.474 & -1.111 & -1.718 & 0.704 & -5.503 \\ & & 0.290 & -0.159 & 0.406 & -0.246 & -1.083 & 0.595 \\ & & & 0.460 & -0.188 & -0.216 & 0.595 & -1.718 \\ & & & & 2.193 & 0.529 & -1.516 & 0.704 \\ & & & & & 1.126 & 0.921 & 0.808 \\ & & & & & & -2.2215 & -2.221 \\ & & & & & & & 6.4138 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{E14})$$

Punto gaussiano 3.

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15 \quad (\text{E15})$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.3943 & 0 & 0.0789 & 0 & 0.0211 & 0 & -0.0211 & 0 \\ -0.1057 & 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0789 & 0 & 0.0789 & 0 & 0.0211 & 0 & -0.0211 & 0 \\ 0 & -0.0352 & 0 & -0.1314 & 0 & 0.1314 & 0 & 0.0352 \\ -0.0352 & -0.0789 & -0.1314 & 0.0789 & 0.1314 & 0.0211 & 0.0352 & -0.0211 \end{bmatrix} \quad (\text{E16})$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 2.193 & 0.595 & -1.516 & 0.704 & -1.083 & -1.111 & 0.406 & -0.188 \\ & 1.126 & 0.9215 & 0.808 & -1.269 & -1.718 & -0.2469 & -0.2166 \\ & & 4.044 & -2.221 & -1.444 & 0.704 & -1.083 & 0.595 \\ & & & 6.413 & 0.921 & -5.503 & 0.595 & -1.718 \\ & & & & 2.140 & 0.595 & 0.387 & -0.2469 \\ & & & & & 5.7476 & -0.1888 & 1.4747 \\ & & & & & & 0.2904 & -0.1595 \\ & & & & & & & 0.4605 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{E17})$$

Punto gaussiano 4.

$$J = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}, \quad J^{-1} = J^* = \begin{bmatrix} 1/5 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}, \quad |\det J| = 15$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.1057 & 0 & 0.1057 & 0 & 0.3943 & 0 & -0.3943 & 0 \\ -0.1057 & 0 & -0.3943 & 0 & 0.3943 & 0 & 0.1057 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{E18})$$

$$[B]_2 = \begin{bmatrix} -0.0211 & 0 & 0.0211 & 0 & 0.0789 & 0 & -0.0789 & 0 \\ 0 & -0.0352 & 0 & -0.1314 & 0 & 0.1314 & 0 & 0.0352 \\ -0.0352 & -0.0211 & -0.1314 & 0.0211 & 0.1314 & 0.0789 & 0.0352 & -0.0789 \end{bmatrix}$$

$$[K]_2 = \begin{bmatrix} 0.29 & 0.159 & 0.387 & 0.188 & -1.083 & 0.595 & 0.406 & 0.246 \\ & 0.460 & 0.246 & 1.474 & -0.595 & -1.718 & -0.188 & -0.216 \\ & & 2.14 & -0.595 & -1.444 & -0.921 & -1.083 & 1.269 \\ & & & 5.747 & -0.704 & -5.503 & 1.111 & -1.718 \\ & & & & 4.044 & 2.221 & -1.516 & -0.921 \\ & & & & & 6.413 & -0.704 & 0.8085 \\ & & & & & & 2.1937 & -0.5952 \\ & & & & & & & 1.1267 \end{bmatrix} \times 10^5 \quad (\text{E19})$$

Resultados Adicionales sobre Esfuerzos Críticos

En la presente Tabla F1 a la F5, se muestra la tendencia del riesgo estructural, al exceder los esfuerzos de fluencia y tensión del acero del acero y en las Figuras F1 y F2 se muestran algunos de los comportamientos de los esfuerzos críticos.

Tabla F1. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm ²	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 F2. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm ²	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 F3. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm ²	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 F4. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm ²	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 F5. Esfuerzos en elementos tubulares

Elementos	Nodos		Esfuerzos Kg/cm ²	Esfuerzos de fluencia- último Kg/cm ²	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	

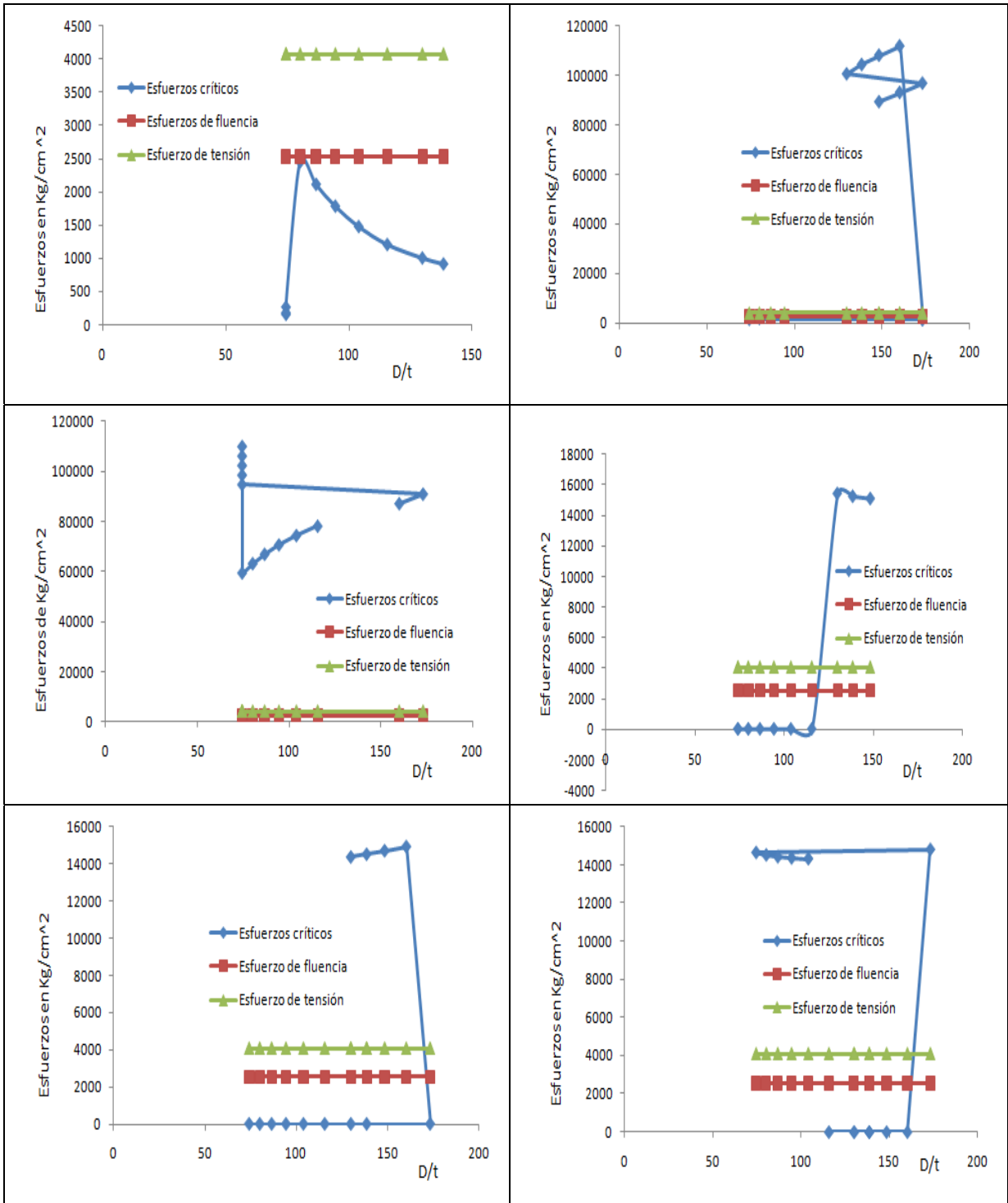


Figura F1. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares.

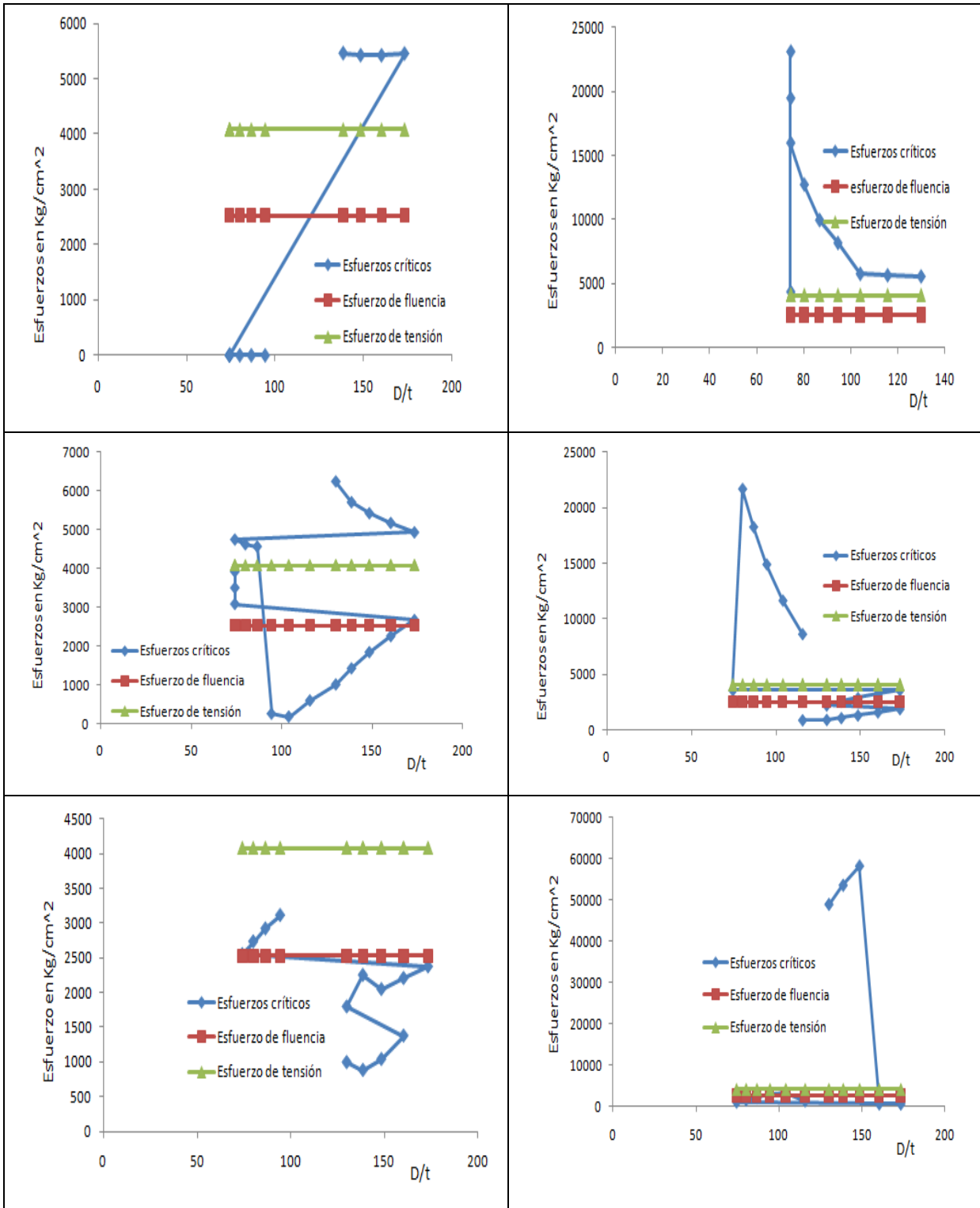


Figura F2. Comportamiento de Esfuerzo Crítico en los elementos estructurales tubulares.

Resultados Adicionales Sobre Deformación Plástica

En este apéndice se muestran las deformaciones plásticas de los nodos estructurales de la plataforma marina.

Tabla G1. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"

oc	ε _p	β	τ	K
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
3976.18488	0.99860087	0.63636364	0.4	0.54418265
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

Tabla G2. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"

oc	ϵ^p	β	τ	K
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
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

Tabla G3. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma "P-A"

oc	ϵ^p	β	τ	K
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
4411.60851	17.2615377	1	0.1	0.99436373

Tabla G4. Deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma “P-A”

σ	ϵ^p	β	τ	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

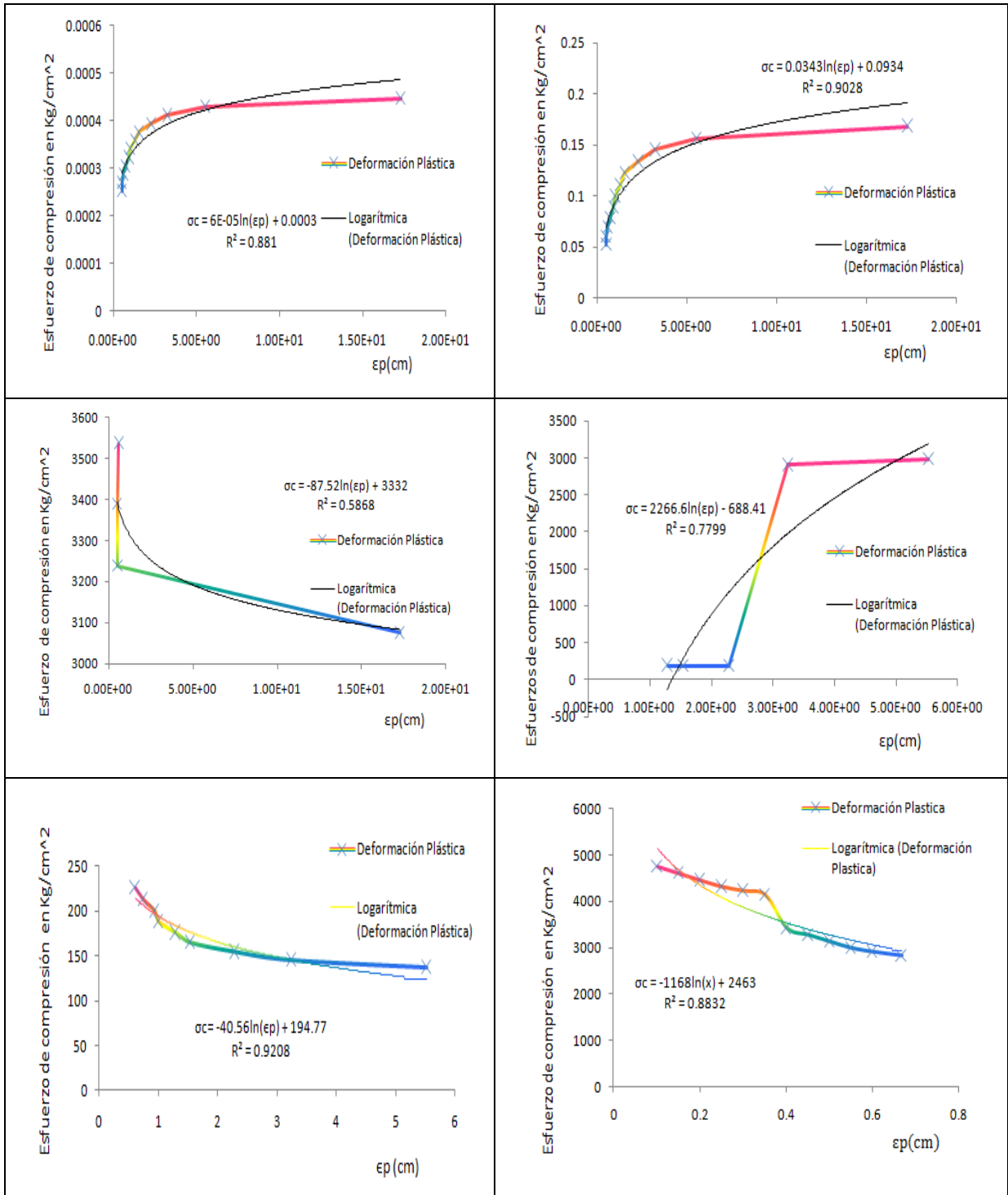


Figura G1. Deformación plástica en nodos estructurales

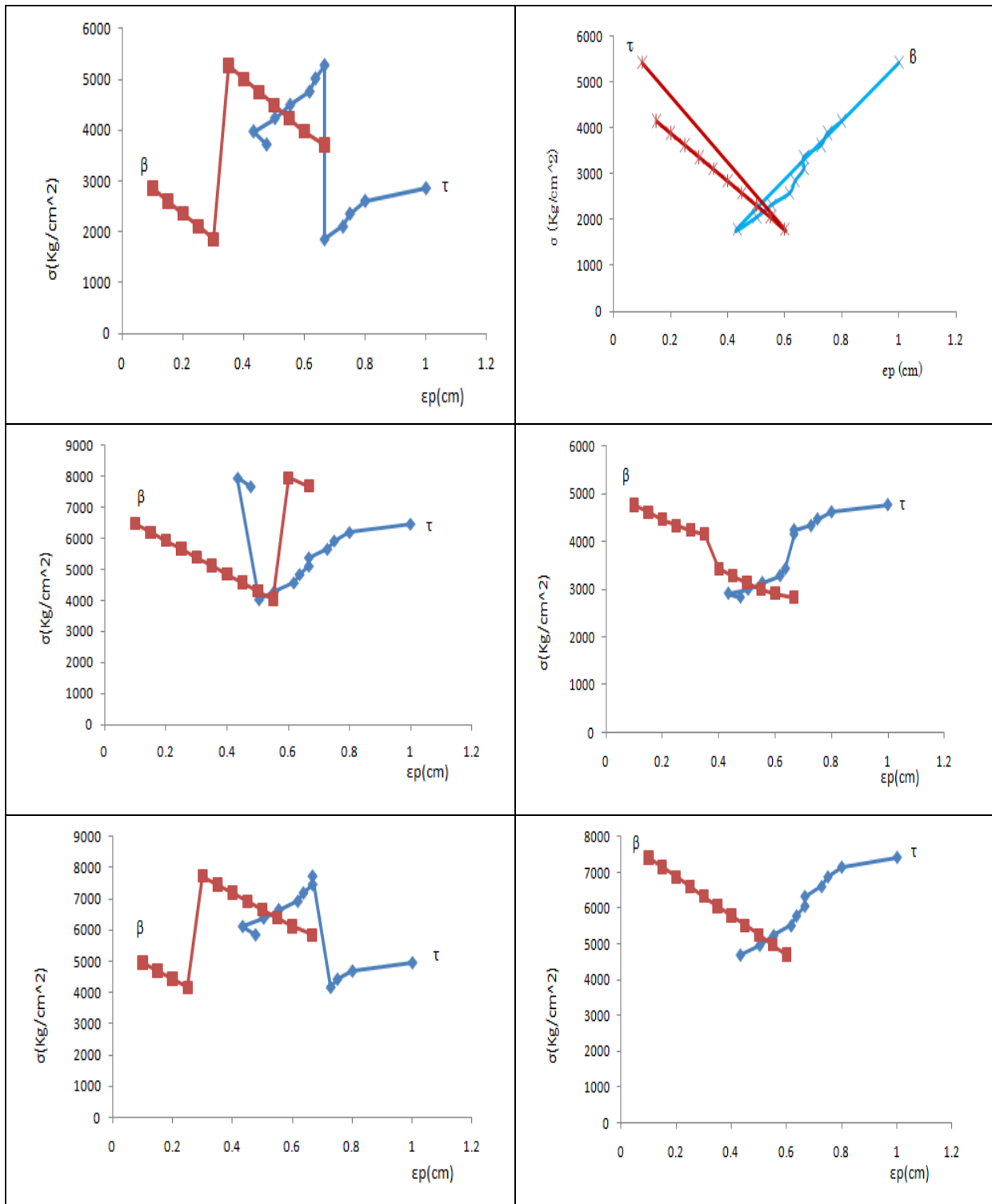


Figura G2. Deformación plástica en nodos estructurales, relación diámetro y espesor

Resultados Adicionales Sobre Deformación Térmica

En este anexo se muestran las deformaciones térmicas de los nodos estructurales de la plataforma marina.

Tabla H1. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\varepsilon r(cm)$	ε^{EPT}	σ_f	σ_T
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
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

Tabla H2. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\varepsilon r(cm)$	ε^{EPT}	σ_f	σ_T
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
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

Tabla H3. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\varepsilon r(cm)$	ε^{EPT}	σ_f	σ_T
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
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

Tabla H4. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\varepsilon r(cm)$	ε^{EPT}	σ_f	σ_T
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
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

Tabla H5. *Esfuerzos de deformación térmica*

$\sigma(Kg/cm^2)$	$\Delta T(K)$	$t(s)$	$\varepsilon r(cm)$	ε^{EPT}	σ_f	σ_T
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
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

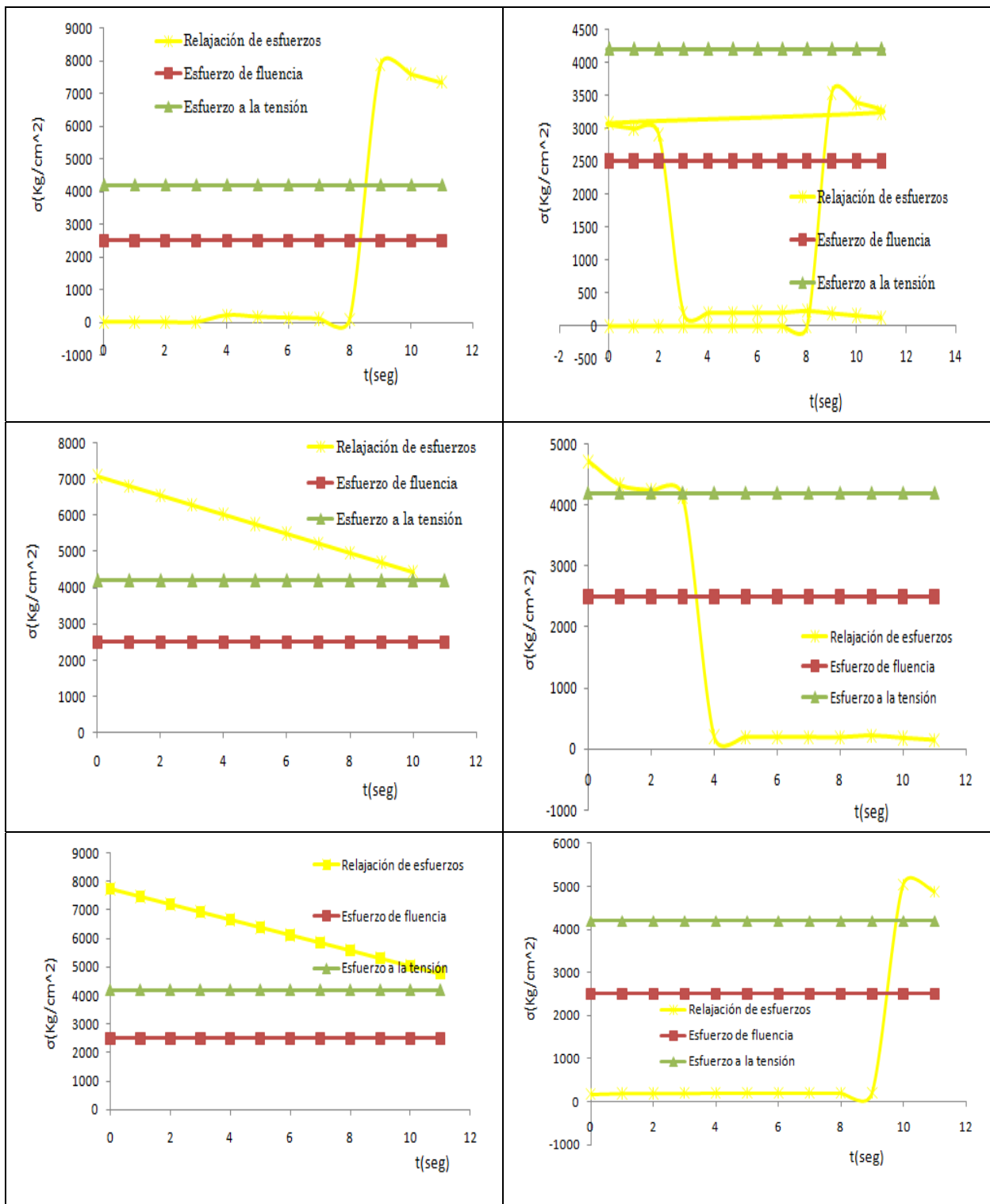


Figura H1. Esfuerzo de relajación

Resultados en Base a la Teoría de Sistemas Complejos

Esta forma rugosa es de tipo fractal siendo 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 I1, se muestran los esfuerzos de estos esfuerzos por el software Benoit.

Tabla I1. *Esfuerzos-teoría de sistemas complejos*

R/S	R-L	VG	<u>Hprom</u>	R/S	R-L	VG	<u>Hprom</u>
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 transforma 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 esto 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 I1, 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.

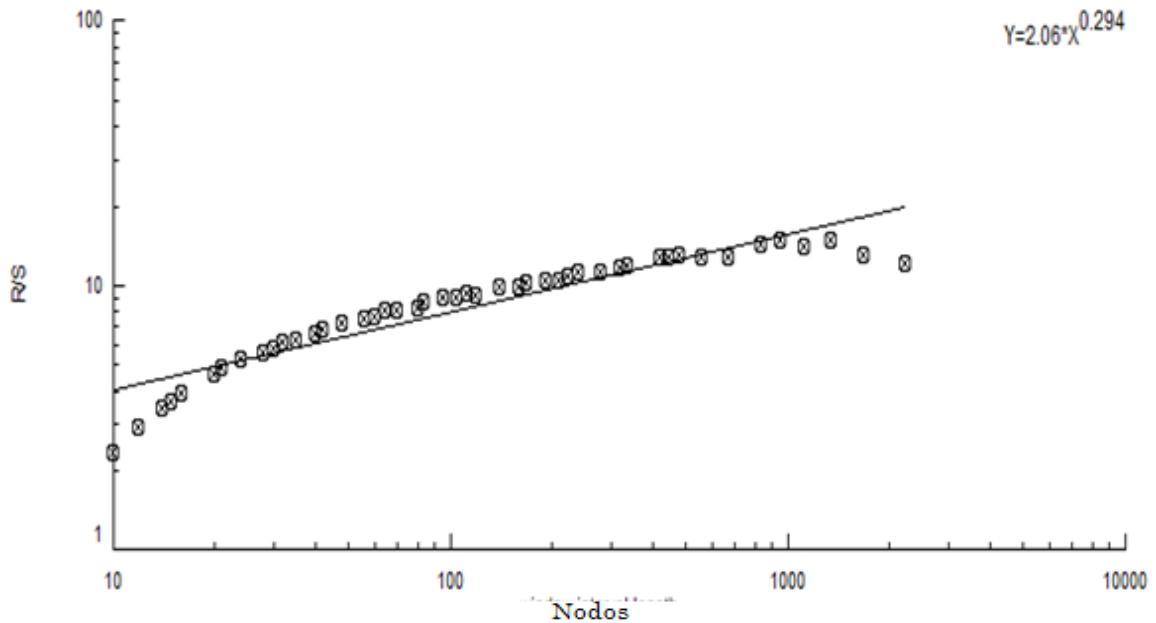


Figura I1. Rango escalado de esfuerzos

Así mismo se observa en la Figura I2, 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.

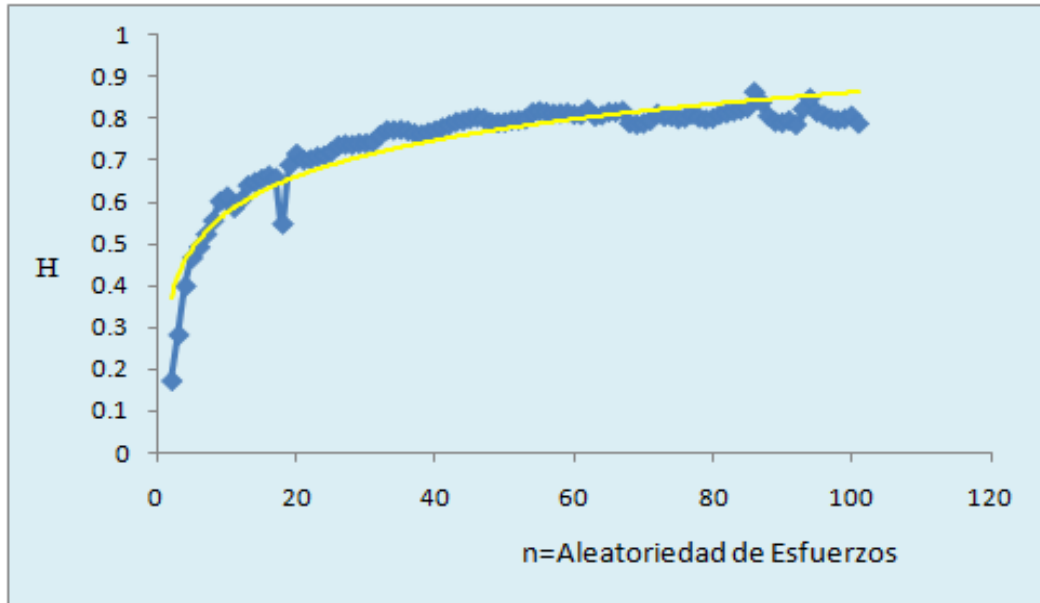


Figura I2. Exponente de Hurst

Por lo que la Figura I3, 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 sobre-esfuerzo a la estructura que con lleve al colapso plástico y con ello pérdidas irreparables.

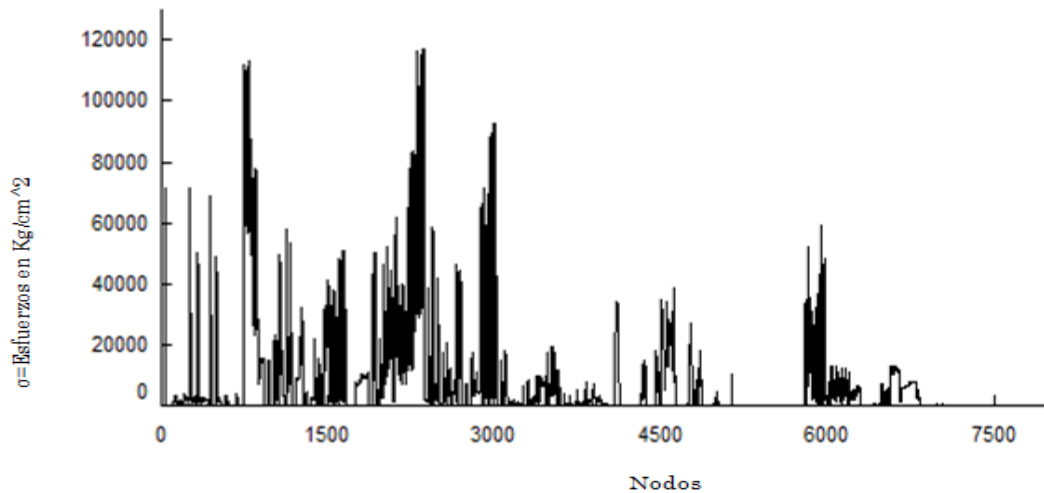


Figura I3. Fluctuación de los esfuerzos en superficie rugosa

En la Figura I4, 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.

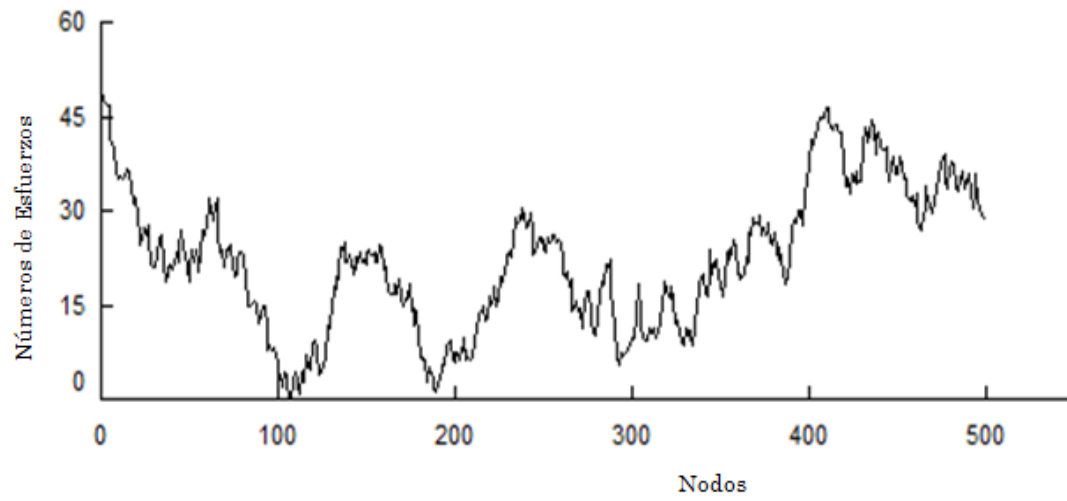


Figura 14. Esfuerzos auto similares en la superficie rugosa

Inspección No Destructiva

J1. 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 numero 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.

J1.1 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 (Viramontes, et al., 2005; Alarcón, 2005).

- 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:

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. (AISC, 1998).

J1.2 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 (Nuñez, et al., 2004; ASM, 1998):

- ✓ 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

J2. 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. (AWS-1, 2008; MIL-STD, 1995).

J2.1 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. (ASTM, 1999; Borucki, 1998), como se ve en la Figura J1.



Figura J1. Ensayo por líquidos penetrante.

J2.1.1 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. (ASTM, 2009; Carpintero, 2011).

J2.2 Ensayo por Partículas Magnéticas

Las primeras referencias, sobre el uso de propiedades magnéticas del fierro 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 fierro, 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 Figuras J2 y J3.



Figura J2. Inspección de partículas magnéticas. (ASM, 1998).

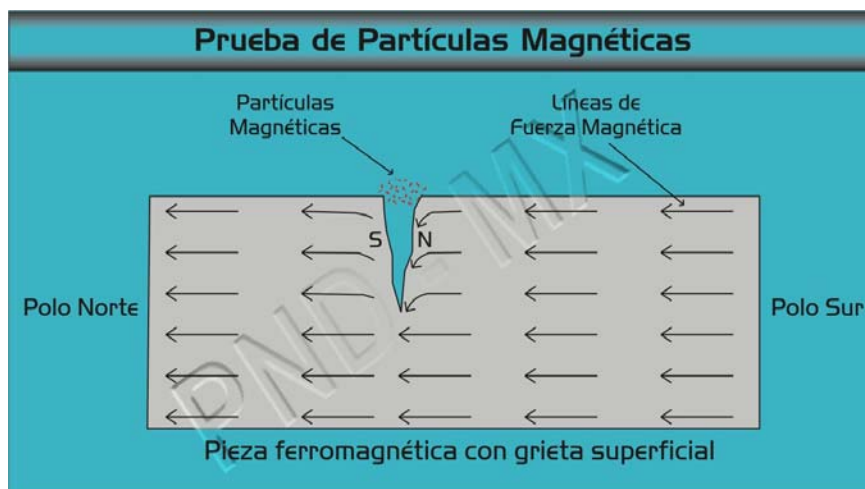


Figura J3. Línea de fuerzas magnéticas. (AWS-D1, 2008).

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 sub-superficiales. 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. (ASTM, 2011).

J2.2.1 Procedimiento de Partículas Magnéticas

La metodología de partículas magnéticas son cuatro, su objetivo principal es detectar discontinuidades superficiales y sub-superficiales en materiales ferro-magnéticos 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.

J2.3 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.

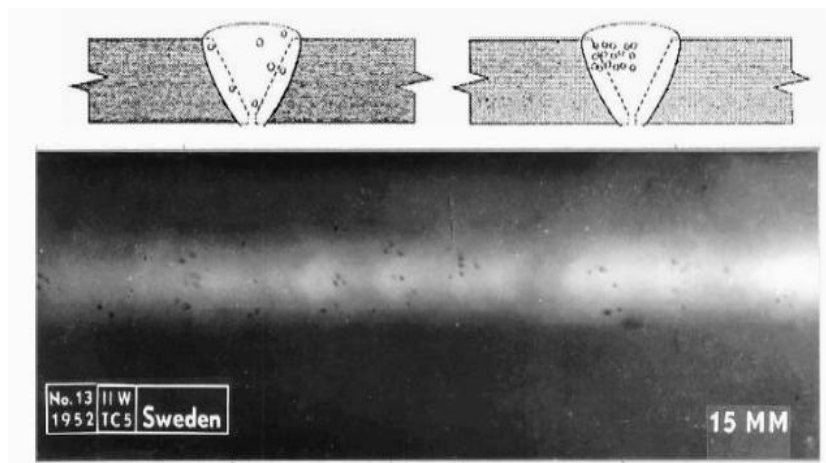


Figura J4. Defecto de porosidad presente en la radiografía. (Peñafiel, 2010).

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. (ASM, 1998; ASTM, 2005).

J2.4 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 J5.



Figura J5. Corriente parasita.

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.

J2.5 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 J6, 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.

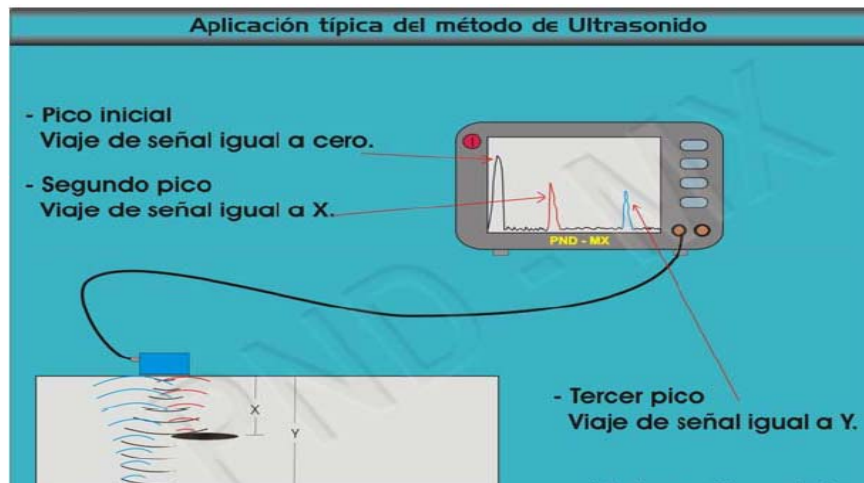


Figura J6. Ultrasonido. (Peñafiel, 2010).

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. (Bray y McBride, 1992; Berger, 1995; Chase, 1998; Davidson y Chase, 1999).

J3. Ventajas y desventajas de la NDE

En la tabla J1, se da a conocer un resumen de sus ventajas y desventajas de los ensayos antes mencionados y otros disponibles en la industria petrolera.

Tabla J1. *Resúmenes de ventajas y desventajas.* (Ramírez, 1982).

Método NDI	Aplicación	Ventajas	Desventajas
Óptico visual	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.
Líquidos Penetrantes	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.
Corrientes parásitas de alta frecuencia	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.
Corrientes parásitas de baja frecuencia	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.
Emisiones acústicas	Detección de delaminación, despegues, vacíos y núcleos aplastados en materiales compuestos y del tipo panal 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.
Rayos X	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.
Partículas magnéticas	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.
Ultrasonido	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.

Ejemplos Fotográficas de Inspección Estructural en Plataformas Marinas

Este Anexo muestra algunos ejemplos reales de inspecciones que se llevan a cabo en las plataformas marinas fijas en el Golfo de México.



Figura K1. Ejemplos de corrosión en los equipos/instalaciones en una plataforma marina.

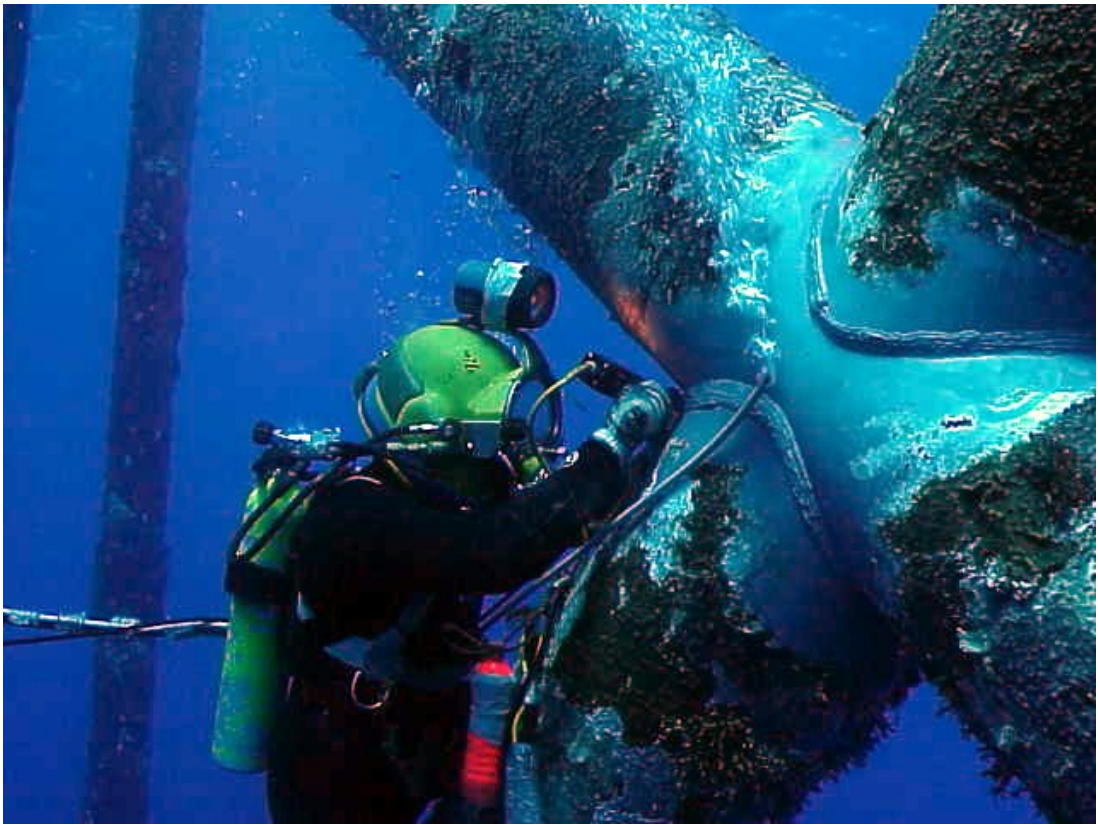


Figura K2. Buzo inspeccionando uniones estructurales de una plataforma marina.



Figura K3. Buzo trabando en los miembros estructurales de una plataforma marina.



Figura K4. Equipo de monitoreo.

Productos del Proyecto de Investigación

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

- ☞ **Félix Hernández, J. L.**, Santos Reyes, J. (2011). Artículo aceptado para publicación en una revista indizada (ISI-JCR).
- ☞ **José Lourdes Félix Hernández**, Rafael A. Corona y Jaime Reynaldo Santos Reyes. (2010). Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas, *Ingeniería estructural*, vol. 43, 44-53.
- ☞ **José Lourdes Félix Hernández**, Jaime R. Santos Reyes y Ma. Zonia Tapia García. (2010). Deformación elástica, plástica y térmica (EPT) en nodos tubulares estructurales. *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.
- ☞ **Félix, J. L.**, Alvarado, R., Santos, J. (2009). Plastic and elastic deformation analysis of structural joints of offshore platforms. *Proc of the XVIII International Materials Research Congress (IMRC 2009)*, 16-20 August, 2009, Cancún, México.
- ☞ **Félix Hernández, J. L.** y Santos Reyes, J. R. (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, ISBN: 978-84-692-8516-9.
- ☞ **J. L. Félix Hernández**, J. Santos Reyes. (2008). "Stress assessment of the structural elements of the ku-maloob-zaap offshore platform". *Proceedings of the XVII International Materials Research Congress (IMRC 2008)*, August 17 -21, 2008, Cancun, México
- ☞ **José Lourdes Félix Hernández** 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.)*, Noviembre 7 y 8, 2008, Veracruz, Ver.

☞ José Lourdes Félix Hernández, Rafael A. Corona y Jaime Reynaldo Santos Reyes. (2010). Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas, *Ingeniería estructural*, vol. 43, 44-53.

Deformación plástica en nodos estructurales de plataformas marinas

José Lourdes Félix Hernández, Rafael A. Corona,
y Jaime Reynaldo Santos Reyes

Grupo: "Seguridad, Análisis de Riesgos, Accidentes
y Confiabilidad de Sistemas" (SARACS),
Instituto Politécnico Nacional Esime Zacatenco, México, D.F.

Resumen

Las plataformas marinas de extracción de crudo y gas, se encuentran sometidas a cargas estáticas, dinámicas, huracanes y oleaje, entre otras. Se producen concentraciones de esfuerzos que se manifiestan en deformaciones plásticas en los nodos. Si no se tiene un particular cuidado en el diseño y ejecución de dichas estructuras, estos esfuerzos pueden conducir a su colapso. Este trabajo presenta los resultados de un análisis de deformación plástica en los nodos de la plataforma marina "P-A", mediante el uso del software ANSYS.

Summary

Oil & gas offshore platforms are being continuously under static, dynamic and environmental (i.e. hurricanes, waves, etc.) loads. Very often, these loads could trigger plastic deformations in the tubular joints of the structure of the installation. If these stresses are not considered in the design and construction stages of this type of structures; these can and lead to the collapse of this type of installations. This paper presents the results of the analysis of plastic deformations in tubular joints of the offshore platform "P-A"; the analysis was conducted by using the software ANSYS.

Introducción

En general, el colapso de un sistema estructural, como una plataforma marina, puede originarse en 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 ha publicado una gran cantidad de trabajos de investigación sobre la concentración de tensiones en las uniones tubulares de estructuras. Por otra parte, desde la concepción y construcción de las primeras plataformas marinas, se ha intensificado la investigación sobre las estructuras tubulares. La mayor parte de esta investigación ha sido motivada por la necesidad de garantizar un diseño confiable de las estructuras tubulares. Así mismo, han ocurrido redefiniciones en lo concerniente a los esfuerzos para las conexiones soldadas con autógena entre los miembros tubulares de



☞ José Lourdes Félix Hernández, Jaime R. Santos Reyes y Ma. Zonia Tapia García. (2010). Deformación elástica, plástica y térmica (EPT) en nodos tubulares estructurales. *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.

XVII
CONGRESO NACIONAL DE
INGENIERÍA ESTRUCTURAL

LA INGENIERÍA ESTRUCTURAL
Y EL DESARROLLO SUSTENTABLE

del 6 de Noviembre de 2010
León, Guanajuato

07-39 DEFORMACION ELÁSTICA, PLÁSTICA Y TÉRMICA (EPT) EN NODOS ESTRUCTURALES TUBULARES

José Lourdes Félix Hernández, Jaime R. Santos Reyes y Ma. Zonia Tapia García

07-40 CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE TÚNELES EN SUELOS BLANDOS QUE SE RECOMIENDAN INCORPORAR A LA NORMATIVIDAD MEXICANA

Eliás Antolín Tavera Gutiérrez, Yolanda Alberto Hernández, Oscar Sergio Aguilar Pérez y David Yáñez Santillán

07-41 PRESENTACIÓN DE UN NUEVO MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DEL PERIODO FUNDAMENTAL DE VIBRACIÓN EN SUELOS ESTRATIFICADOS (AGH-2010)

José Alejandro Gómez Hernández

TEMA 7- Análisis y diseño de
estructuras especiales

www.smie.org.mx
tel (55) 56659784
tel y fax (55) 55285975
smie1@prodigy.net.mx



Salir

Página 4/4





DEFORMACION ELASTICA, PLASTICA y TERMICA (EPT) EN NODOS ESTRUCTURALES TUBULARES

José Lourdes Félix Hernández¹, Jaime R. Santos Reyes¹ y Ma. Zonia Tapia García²

RESUMEN

En este trabajo se da a conocer el comportamiento de los esfuerzos elástico, plástico y térmico en los nodos estructurales tubulares de una plataforma marina. La metodología empleada para dicho análisis fue el uso del programa ANSYS. La conclusión principal es que después del factor de 0.9 de intensidad de esfuerzo térmico en los nodos estructurales se comienza a generar dislocaciones en el material, generando ciertas fisuras debido a la rapidez de deformación a consecuencia de la temperatura. Finalmente, se espera llevar a cabo un análisis y diseño de una plataforma marina con el factor de intensidad de esfuerzos térmico.

ABSTRACT

In this work is made known the behavior of the stresses elastic, plastic and heat efforts in the structural tubular nodes of a marine platform. The methodology used for this analysis was the ANSYS program. The main conclusion is that after 0.9 factor intensity of thermal effort in the structural nodes it begins to generate dislocations in the material generating some cracks because of the speed of deformation as a result of the temperature. Finally, it's expected to carry out an analysis and design of a marine platform with the factor of intensity of thermal efforts

INTRODUCCIÓN

Se han realizado investigaciones, dirigidas a procedimientos analíticos que simulan con más precisión las altas concentraciones de esfuerzos en los nodos estructurales. Debido, a la complejidad de los procesos físicos involucrados en la soldadura hacen que ninguna solución matemática simple logre dar respuesta aceptable a las tensiones y deformaciones en los nodos, afectando la integridad estructural de las plataformas marinas de acero, exponiéndolo a desastre estructural (Pozo Morejón et al., 2009).

El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada. 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 sometido dicha estructura costa fuera repercutirá en los nodos (Madhukar, 2002, Marija Romanjek Blimel, 2007). Todas las uniones, de una estructura de plataforma marina se proyectan de forma que le permitan conseguir nivel de seguridad aceptable, buen comportamiento en servicio y durabilidad y, debe ser capaces de resistir al menos los esfuerzos previstos para ellas en el análisis global de la estructura. Sin embargo, ha sido un problema importante menos resuelto para diseño, del cual el colapso incremental por carga repetidas son a efecto de interacción entre arriostramiento o brace en la unión o junta para uniones múltiples (M.L. Kaminski, et. al., 2000); siendo este motivo por el cual se ha venido bosquejando el estándar internacional para el diseño y la construcción de estructuras offshore, bajo los auspicio del estándar internacional, ISO (2004), y la actualización en curso a API RP2A (Adrian F. Dier, 2005).

-
- 1 Grupo: "Seguridad, Riesgo y Confiabilidad de Sistemas", Ingeniería de Sistemas, SEPI-ESIME, IPN, Edif. 5, 2º. Piso, U.P. "Adolfo López Mateos", C.P. 07738, México, D.F. Email(s): jfelixhmx90@ipn.mx, jsantosr@ipn.mx
 - 2 Profesora, Instituto Tecnológico de Villahermosa, Carretera Frontera Km. 3.5 Cd. Industrial, Villahermosa Tabasco, Teléfono: (01) 993-3530259; mozartga@yahoo.com.mx

- ➔ Félix, J. L., Alvarado, R., Santos, J. (2009). Plastic and elastic deformation analysis of structural joints of offshore platforms. *Proc of the XVIII International Materials Research Congress (IMRC 2009)*, 16-20 August, 2009, Cancún, México.



XVIII
INTERNATIONAL
MATERIALS
RESEARCH
CONGRESS
IMRC 2009

GENERAL PROGRAM

Cancún, México. August 2009



$$A_1 = K_I / (2\pi)^{1/2} \quad (2)$$

The calculation of the intensity stress factor (K_I) is obtained by using the finite elements method and the technique of specific strains and extrapolation of values around the crack tip.

The results are compared with analytic approach and also the strain field acquired by finite elements will be compared with an experimental analysis by strain gauges.

S8-P07

EFFECT OF FATIGUE DAMAGE ON THE DYNAMIC TENSILE BEHAVIOR OF CARBON STEEL WELDED JOINTS

Carlos Rubio-González^a, Edgar Miranda-Paniagua^b, Gerard Mesmacque^c, Ulises Sánchez-Santana^a

^a Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial, Pie de la cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, Querétaro, Qro., 76130, México.
E-mail: crubio@cidesi.mx^b Instituto Tecnológico de Morelia, Av. Tecnológico 1500, Morelia; Mich. 58120, México^c Laboratoire de Mécanique de Lille, Université de Lille 1, UMR CNRS 8107, Villeneuve d'Ascq 59650, France

In different engineering applications such as automobile and train crashes, the high speed impact of debris as well as the high speed manufacturing processes, makes it necessary to have a deep understanding of the dynamic behavior of materials and components. There are different experimental techniques to determine the constitutive material behavior. Several constitutive models have been proposed to predict the dynamic response of engineering structures. However, in all cases, initial damage-free material is assumed and the structures are without fatigue damage when tested. The dynamic response of fatigue damaged AISI 1018 steel welded joints subjected to impact loading is investigated in this work. The tensile Hopkinson bar apparatus is used in the dynamic experiments. Welded joints with and without post weld heat treatment are used. Samples subjected to previous high cycle fatigue are considered. Results show that previous fatigue damage affects the quasi-static and dynamic tensile behavior. The effect of the previous fatigue damage on the quasi-static and dynamic tensile behavior on the base material and the welded joint is compared. Previous fatigue damage has a detrimental effect on ductility of 1018 steel welded joints, principally under dynamic loading.

S8-P08

PLASTIC AND ELASTIC DEFORMATION ANALYSIS IN STRUCTURAL JOINTS OF OFFSHORE PLATFORMS

Félix, J. L., Alvarado, R., Santos, J.

Grupo: "Seguridad; Análisis de Riesgos, Accidentes y Confiabilidad de Sistemas" (SARACS), Departamento de Posgrado de Ingeniería de Sistemas, Instituto Politécnico Nacional Esime Zacatenco, Edificio 5, 2do Piso, U.P. "Adolfo López Mateos", 07738, México, D.F. jfelixmx90@yahoo.com

Oil & gas offshore platforms are being continuously under static, dynamic and environmental (i.e. hurricanes, waves, etc.) loads. Very often, these loads could trigger plastic deformations in the tubular joints of the structure of the installation. If these stresses are not considered properly in the design and operational stages of this type of structures; these can and have led to the collapse of this type of facilities. A number of events of this type have occurred worldwide; the most recent occurred in 2007 when the whole structure of an offshore platform collapsed. This papers presents a description of the results of the analysis of the plastic deformation in the tubular joints of the offshore platform "P-A"; the analysis has been conducted by using the software ANSYS. Future work will include a structural reliability analysis of this offshore platform.

- ☞ Félix Hernández, J. L. y Santos Reyes, J. R. (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, ISBN: 978-84-692-8516-9.

Federación
Iberoamericana
de Ingeniería
Mecánica



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

IX Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica

17 - 20 de Noviembre de 2009

Las Palmas de Gran Canaria - Islas Canarias - España



cibim9



DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN NODOS ESTRUCTURALES DE PLATAFORMAS MARINAS

Félix Hernández¹, J. L. y Santos Reyes¹, J. R.

¹Grupo: "Seguridad, Análisis de Riesgos, Accidentes y Confiabilidad de Sistemas" (SARACS), Departamento de Posgrado de Ingeniería de Sistemas, Instituto Politécnico Nacional, ESIME-Zacatenco, Edificio 5, 2do Piso, U.P. "Adolfo López Mateos", 07738, México, D.F., *jfelixhmx@yahoo.com, jsantosr@ipn.mx

Área Temática: Estructuras

RESUMEN

Las plataformas marinas de producción de crudo y gas se encuentran sometidas a cargas estáticas, dinámicas y las fuerzas de huracanes, oleaje, entre otros. Estas concentraciones de esfuerzos se transforman en deformaciones plásticas, las cuales se manifiestan en los nodos de dichas estructuras. Si no se tiene un cuidado en el diseño y operación de estructuras mencionadas, estos esfuerzos pueden conducir al colapso de las mismas. Este trabajo presenta los resultados de un análisis de deformación plástica en los nodos estructurales de la plataforma marina "P-A", mediante el uso del software ANSYS. Como futuro trabajo se espera llevar a cabo un análisis de la temperatura en los nodos ya que durante la deformación plástica, ocurren incrementos de temperatura en la zona plástica debido a la disipación del trabajo plástico, siendo este fenómeno visto como efecto termoplástico basado en la ley general de la termodinámica; el trabajo plástico proporciona considerar como fuente de disipación interna de calor y se realizará el análisis de confiabilidad estructural de dichos nodos en plataforma.

PALABRAS CLAVE: Estructura, Nodo, Deformación Plástica, Plataforma Marina

INTRODUCCIÓN

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. 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 [1, 2, 3]. Además, se puede argumentar que desde la concepción y construcción de las primeras plataformas marinas se ha intensificado la investigación sobre estructuras tubulares [1, 2, 3, 4, 5]. La mayor parte de estos han sido motivados, por la necesidad de garantizar un diseño confiable de las estructuras tubulares. Así mismo han ocurrido redefiniciones en lo concerniente a los esfuerzos para las conexiones soldadas con autógena entre los miembros de acero estructural tubular, tales como las estructuras de plataformas costa fuera de producción de crudo y gas. 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. La comprensión de los esfuerzos en sus uniones tubulares ha llevado a la necesidad de un diseño robusto y a mejorar las metodologías de evaluaciones estructurales [6]. En un sistema estructural tubular, la región de la conexión se define como nodo o juntas; los nodos se pueden clasificar como circulares o rectangulares, en formas de tipo K, T, X, K-T, K-K e Y [7, 8, 9, 10, 11]. En los nodos se forma una alta concentración de esfuerzos y aumento de esfuerzos residuales generando grietas; además, en estas zonas de intersecciones de los elementos estructurales, las juntas se consideran completamente rígidas [12], de modo que es muy común la presencia de defectos en la soldadura debido a la discontinuidad, generándose la fatiga a consecuencia de cargas cíclicas [13, 14, 15, 16, 17]. Así mismo, los esfuerzos residuales son uno de los factores más importantes para la resistencia a la fatiga [18, 10, 19, 20]. En estas conexiones los esfuerzos de deformación plástica generan tensiones residuales, estas siguen existiendo incluso después de que se deje de imponer cargas externas; formándose así una articulación plástica en el sistema al exceder completamente su esfuerzo de fluencia. El control de este esfuerzo de fluencia es uno de los aspectos más importantes de los materiales para la aplicación en ingeniería estructural [21, 22]. Esta articulación plástica se localiza, en las intersecciones de los

- ☞ José Lourdes Félix Hernández 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.)*, Noviembre 7 y 8, 2008, Veracruz, Ver.

XVI CONGRESO NACIONAL

DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL

Menú

- Conferencias magistrales
- Consulta de artículos
- Estatutos y reglamentos
- Miembros institucionales
- Créditos
- Conferencias técnico-comerciales

www.smie.org.mx
tel. (55) 5665 9784
tel y Fax (55) 5528 5975
smie1@prodigy.net.mx



SALIR

XVI CONGRESO NACIONAL

DE INGENIERÍA ESTRUCTURAL

● Tema 7: Análisis y diseño de estructuras especiales

- 7-09 UNA SOLUCIÓN NO SIMÉTRICA EN LA OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL DE PUENTES EMPLEANDO ALGORITMOS GENÉTICOS
Gutiérrez Astudillo Nayar C., Peniche Vera Rebeca del R., Carrión Viramontes Francisco, Alvarado Cárdenas Roberto
- 7-10 ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS CRÍTICOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES TUBULARES DE UNA PLATAFORMA MARINA
Félix Hernández José Lourdes, Santos Reyes Jaime
- 7-11 MUROS TILT UP VS MUROS PRECOLADOS
López Esquivel Manuel, González Ruiz Juan Pablo
- 7-13 COMPARATIVA EN EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y DE COSTOS DE NAVES CONSTRUIDAS CON SISTEMAS DE MARCOS Y CON MUROS TILT-UP
Treviño Granados Alberto, Rivero Balentín, Jean Perrilliat Raúl, Huerta Carpizo Carlos
- 7-15 DISEÑO NORMALIZADO DE LAS ESTRUCTURAS MAYORES DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS DE TRANSMISION
Jorge Iván Vilar Rojas, Juan Carlos Corona Fortunio, Fernando de Artola Noble
- 7-16 VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO SISMICO DE TANQUES ELEVADOS PARA ALMACENAMIENTO
Martínez Contreras José Arturo
- 7-17 ESTIMACIÓN DE PRESIONES DE FALLAS DE TUBERÍAS CORROÍDAS POR MEDIO DE MODELOS BASADOS EN TEORÍA DE LA PLASTICIDAD
Maxime Bony, Alamilla Jorge, Vai Rossana, Flores Esteban
- 7-20 ANÁLISIS SÍSMICO PARAMÉTRICO DE PUENTES EN CURVA
Pozos-Estrada Adrián, Gómez Martínez Roberto, Hong Hanping, León Israel Ivan



ANÁLISIS DE LOS ESFUERZOS CRÍTICOS EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES TUBULARES DE UNA PLATAFORMA MARINA

José Lourdes Félix Hernández¹ y Jaime Santos Reyes¹

RESUMEN

El presente trabajo describe un análisis de los esfuerzos críticos en los elementos estructurales de una plataforma marina. Para este estudio se consideraron las características de la plataforma marina KU-MALOOB-ZAAP ubicada en el Golfo de México. La metodología empleada para dicho análisis fue el uso del programa ANSYS. La conclusión principal es que ciertos elementos estructurales exceden su límite de fluencia. Mas investigación se requiere, por ejemplo, determinar los esfuerzos térmicos residuales. Finalmente, se espera llevar a cabo un análisis de confiabilidad estructural de dicha plataforma marina.

ABSTRACT

The present work describes an analysis of the critical stresses in the structural elements of an offshore platform. The features of the KU-MALOOB-ZAAP offshore platform have been used for the present study. The methodology for the analysis has been the use of the software ANSYS. The main conclusion is that some of the structural elements of the offshore platform have exceeded their fluency limits. More research is needed in order to determine the thermal stress residual. Finally, a structural reliability analysis for the offshore platform is needed.

INTRODUCCIÓN

A partir de la construcción de las primeras plataformas marinas se intensificó la investigación sobre el cálculo de las fuerzas actuantes en estructuras tubulares expuestas a las fuerzas de huracanes, tormentas, oleaje, entre otros (Galano, et al., 1995; Murray, et al., 1995; Bea y Young, 1993; Vughts, 1990; Vinje y Haver, 1994; Grant, et al., 1995). Dichas estructuras cuyos elementos son en general, cilindros verticales, horizontales y diagonales. Éstos elementos estructurales cilíndricos son eficientes para absorber la energía cinética pero sufren deformación plástica (Gupta et al., 2008). Las estructuras tubulares cilíndricas huecas están sometidos a subsidencias de aumento de cargas externas, produciendo fluencia, haciendo que su valor efectivo de rigidez y a la flexión descienda paulatinamente, en el que se forman un número de secciones plenamente plásticas suficientes para transformar los elementos estructurales tubulares en un mecanismo de inestabilidad global, siendo esta el dilema de la estabilidad del cilindro axialmente comprimido (Liu, 1988). De este modo presentándose el esfuerzo crítico con tendencias a un mecanismo de colapso estructural para dicha plataforma en su totalidad (Ferreira et al., 2004). El colapso por pérdida de inestabilidad global de las estructuras tubulares pasa a ocupar, un primer plano, siendo la inestabilidad la precursora en que se defina el concepto de carga crítica correspondiente. A causa de ciertas cargas críticas, existe la posibilidad de inducir deformaciones grandes y peligrosas por parte de momentos distribuidos que se incrementan con ellas hasta que precipitan acciones de tipo colapso. A continuación se enlistan los tipos comunes de inestabilidad elástica: pandeo (forma de falla que resulta de la inestabilidad estructural debido a una carga de compresión (Byars y Sinder, 1975)); por compresión, cuando un cilindro está sometido a torsión (Irving, 1979).

¹ Grupo: "Seguridad, Riesgo y Confiabilidad de Sistemas", Ingeniería de Sistemas, SEPI-ESIME, IPN, Edif. 5, 2º. Piso, U.P. "Adolfo López Mateos", C.P. 07738, México, D.F. Email(s): jfelixhmx90@ipn.mx, jsantosr@ipn.mx.