

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
ZACATENCO
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN UN ACUEDUCTO
SOMETIDO A CARGAS EXTERNAS E INTERNAS”**

**T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN
INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T A
Ing. Jesús Zárate Nevárez**

Director: Dr. José Martínez Trinidad

MÉXICO, D.F.

2009.



SIP-14

INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 28 del mes de Marzo del 2007 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. para examinar la tesis de grado titulada:

“ANÁLISIS DE ESFUERZOS EN UN ACUEDUCTO SOMETIDO A CARGAS EXTERNAS E INTERNAS”.

Presentada por el alumno:

ZÁRATE

Apellido paterno

NEVÁREZ

Apellido materno

JESÚS

Nombre(s)

Con registro: B 0 2 1 8 8 9

Aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

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

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

[Signature]

Dr. José Martínez Trinidad Segundo Vocal

Presidente

[Signature]

Dr. Alexander Balankin Tercer Vocal

[Signature]

Dr. Orlando Susarrey Huerta Secretario

[Signature]

Dr. Iván Enrique Campos Silva Suplente

[Signature]

Dr. Luis Héctor Hernández Gómez

[Signature]

M. en C. Gabriel Villa y Rabasa

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

[Signature]

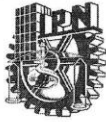
DR. JAIME ROBLES GARCIA



SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACION



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POGRADO E INVESTIGACIÓN.

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En La Ciudad de México, Distrito Federal; el día 07 del mes de junio del año 2009 el que suscribe Ing. Jesús Zárate Nevárez, alumno del Programa Maestría en Ciencias en ingeniería Mecánica, opción Diseño; con número de registro B021889, adscrito a la Sección de Estudios de posgrado e investigación de la ESIME, Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo intitulado: "Análisis de Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e internas", al Instituto politécnico Nacional para su difusión, con fines académico y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, grafico o datos del trabajo sin el permiso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: jzaratn@pep.pemex.com y/o jzaratn@Hotmail.com

Sin el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.


Ing. Jesús Zárate Nevárez.



AGRADECIMIENTOS

Un sincero agradecimiento:

Al personal administrativo del **Instituto Tecnológico de Poza Rica**, por facilitarnos sus aulas para la impartición de clases.

A los didactas del **Instituto Politécnico Nacional**, por encausarme a la terminación de este proyecto para mi superación profesional y personal.

A la administración de **Pemex Exploración y Producción Activo Integral Poza Rica – Altamira**, por permitir la ejecución de este estudio y análisis.

Al **Dr. José Martínez Trinidad** y **Dr. Luis Héctor Hernández Gómez** por el tiempo, la experiencia y esfuerzo que dedicaron para la realización de esta tesis.

Al **Ing. Pedro Bonilla**, por el apoyo obtenido para la terminación especialmente en el Capítulo III de esta tesis.

Al que más que jefe, un gran amigo **Ing. Javier Lara Segura**.

A los miembros del jurado de este trabajo: **Dr. José Martínez Trinidad**, **Dr. Alexander Balankin**, **Dr. Orlando Susarrey Huerta**, **Dr. Iván E. Campos Silva**, **Dr. Luis Héctor Hernández Gómez** y **M. en C. Gabriel Villa y Rabasa**; por su apoyo y comentarios realizados al presente escrito.

A **Dios** que me dio la vida, y me ha enseñado el camino del bien y del amor.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



Y especialmente a quien se nos adelantó:

Al **M. en C. Ricardo López** (q. d. e.) por el apoyo incondicional que siempre otorgo para la realización de este trabajo de tesis, pero sobre todo por la amistad que nos une.



DEDICATORIAS

Los esfuerzos, triunfos, logros y satisfacciones se los debo a ustedes que con el cariño y amor que me han brindado he podido llegar hasta esta superación personal.

Por su gran amor y apoyo:

A mi esposa Claudia Núñez Espinosa

Al amor de mi vida; **mi hija Hannia Camila Zárate Núñez**

Por su inmenso amor que me dan y hacen de mi una persona de bien.

A mis Padres:

Isaías Zárate Del Ángel y María de Jesús Nevares Ibarra.

A la familia de mí querido Hermano:

Isaías

“Chaisito”

Mariza

“Maricha” Alejandra

A mis Compañeros de trabajo del

Departamento de Ductos y Vías de Acceso.

A mis primos y tíos, en especial a mi tío:

Mario Nevares Ibarra.

Así como a mis abuelitos:

José Nevares Sánchez y María Elsa Ibarra.



CONTENIDO

Índice de Tablas.....	viii
Índice de Figuras.....	ix
Simbología.....	xi
Glosario.....	xii
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Objetivo.....	xviii
Justificación.....	xix
Introducción.....	xx

Capítulo 1.

La Importancia de los Sistemas de Ductos para el Suministro de Agua en Campos Petroleros.

1.1. Extracción del Petróleo.....	2
1.2. Sistema de Inyección de Agua.....	4
1.3. Características del Ducto.....	4
1.4. Obra Especial.....	8
1.5. Inicio de Solicitudes.....	9
1.6. Reubicación del Acueducto.....	10
1.7. Construcción de la protección del arroyo “El Mollejón”.....	11
1.8. Solicitud de Solución a Protección Civil.....	12
1.9. Planteamiento del Problema.....	12
1.10. Sumario.....	12
1.11. Referencias.....	13



Capítulo 2

Marco Teórico del Análisis de Integridad de Ductos.

2.1. Fundamentos del Análisis de Integridad.....	15
2.2. Fallas de Ductos en Servicio.....	16
2.3. Inspección no destructiva.....	17
2.4. Principios del Análisis de Integridad en Ductos.....	18
2.5. Criterios de Severidad de Defectos.....	19
2.5.1. Clasificación de Anomalías en Ductos en Función de su Severidad.....	20
2.6. Métodos de Análisis de Integridad.....	25
2.6.1. Análisis Probabilístico.....	25
2.6.2. Análisis Determinístico.....	25
2.7. Análisis de Integridad de Líneas no Inspeccionables con Equipo Instrumentados (Muestral)	25
2.8. Técnica de Inspección.....	27
2.9. Análisis de Flexibilidad.....	27
2.10. Obtención del TVR (Tiempo de Vida Remanente).....	31
2.11. Sumario.....	32
2.12. Referencias.....	33

Capítulo 3

Estudio Hidráulico.

3.1. Introducción.....	36
3.2. Hidrografía.....	36
3.3. Precipitación Máxima.....	37
3.4. Gasto Máximo.....	38
3.5. Características Fisiográficas de superficie drenada.....	38
3.6. Método Racional Básico.....	39



3.7. Método de Ven Te Chow.....	42
3.8. Método del Hidrograma Triangular Unitario.....	44
3.9. Resultados.....	45
3.10. Determinación de Gastos.....	46
3.11. Análisis Hidráulicos.....	46
3.12. Sumario.....	47
3.13. Referencias.....	48

Capítulo 4

Método del Elemento Finito Aplicado a Ductos.

4.1. Generalidades del Método del Elemento Finito.....	50
4.2. Metodología para el Análisis de Esfuerzos al Caso de Estudio mediante el Método del Elemento Finito.....	53
4.2.1. Fase del Preproceso.....	55
4.2.2. Fase de Solución.....	55
4.2.3. Fase de Postproceso.....	55
4.3. Planeación del modelo.....	56
4.4. Generación de modelos en ANSYS.....	56
4.4.1. Flujo sobre el ducto.....	56
4.4.2. Esfuerzos sobre el ducto.....	60
4.5. Sumario.....	65
4.6. Referencias.....	66



Capítulo 5

ANÁLISIS DEL ACUEDUCTO Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Planteamiento de la Metodología.....	68
5.2 . Construcción de Modelo del Elemento Finito.....	79
5.3 . Tipos de Elementos Utilizados.....	71
5.4. Objetivo.....	71
5.5. Alcances.....	71
5.6. Requerimiento de Diseño.....	72
5.6.1. Esfuerzo Circunferencial.....	72
5.6.2. Esfuerzo Longitudinal por Combinación de Cargas de Presión.....	73
5.6.3. Esfuerzo Combinado por Expansión.....	73
5.6.4. Esfuerzo Longitudinal Máximo.....	74
5.6.5. Esfuerzo de Von Mises.....	74
5.7. Desarrollo del Modelo.....	74
5.8. Resultados.....	77
5.8.1. Análisis de flujo sobre el ducto.....	77
5.8.2. Esfuerzos sobre el ducto.....	81
5.9. Análisis de Resultados.....	81
5.10. Sumario.....	90
5.11. Referencias.....	91
Conclusiones.....	92
Trabajos a Futuro.....	94
Anexos.....	95



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características de diseño del ducto.....	5
Tabla 1.2. Características de servicio del ducto.....	5
Tabla 3.1. Precipitación máxima diaria.....	37
Tabla 3.2. Análisis anual de la hidrografía.....	38
Tabla 3.3. Obtención del Pd.....	39
Tabla 3.4. Uso y tipo de suelo.....	40
Tabla 3.5. Tipo de curvas.....	43
Tabla 3.6. Relación de Tiempos.....	45
Tabla 3.7. Comparación del Histograma y la lluvia en exceso.....	46
Tabla 3.8. Relación del Hidrograma.....	46
Tabla 3.9. Resultados de los métodos empleados.....	47
Tabla 3.10. Resultados del método matemático empleado.....	49
Tabla 5.1. Características geométricas y propiedades del material del ducto.....	80
Tabla 5.2. Condiciones actuales de operación.....	80
Tabla 5.3. Esfuerzos y desplazamientos máximos actuantes.....	81
Tabla 5.4. Desplazamientos y Esfuerzos de Von Mises.....	95



ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1. Distribución del “Tubbing” o Tubería de Producción.....	2
Fig. 1.2. Vista del pozo Poza Rica 78 Productor de Agua.....	3
Fig. 1.3. Vista aérea del derecho de vía.....	6
Fig. 1.4. Vista aérea del derecho de vía en el fraccionamiento “Bella Vista”.....	7
Fig. 1.5. Croquis de la modificación de trazo del acueducto.....	9
Fig. 1.6. Perfil real de la protección del arroyo “El Mollejón”.....	10
Fig. 3.1. Vista Aérea de la Ciudad de Poza Rica.....	36
Fig. 3.2. Hidrograma real de la lluvia en la Ciudad de Poza Rica.....	46
Fig. 3.3. Planos del desplante de dentellones.....	48
Fig. 4.1. Diagrama que muestra el procedimiento para realizar un análisis estructural mediante el MEF.....	56
Fig. 4.2. Esquema del problema. Corregir la figura con los datos reales.....	59
Fig. 4.3. Figura modelo físico.....	59
Fig. 4.4. Figura modelo discretizando.....	60
Fig. 4.5. Figura condiciones de frontera.....	61
Fig. 4.6. Ejemplos a) campo de velocidades y b) campo de presiones.....	62
Fig. 4.7. Generación del modelo físico.....	63
Fig. 4.8. Modelo físico del ducto.....	63
Fig. 4.9. Modelo discretizado.....	64
Fig. 4.10. Restricciones.....	64
Fig. 4.11. Cargas aplicadas.....	65
Fig. 4.12. Descripción de los análisis realizados.....	66
Fig. 4.13. Ejemplo de resultados.....	66
Fig. 5.1. Cuadro Sinóptico. Opciones para crear el modelo de elementos finitos.....	70
Fig. 5.2. Perfil de velocidades a 3.94 m/s.....	82
Fig. 5.3. Perfil de Presión.....	83
Fig. 5.4. Perfil de velocidades a 2.51 m/s.....	83



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



Fig. 5.5. Perfil de Presión.....	84
Fig. 5.6. Perfil de velocidades a 1.09 m/s.....	84
Fig. 5.7. Perfil de Presión.....	85



SIMBOLOGÍA

Ø	Diámetro.
°c:	Grado Centígrado.
" :	Pulgada.
K:	Coeficiente de Calibración.
Km:	Kilómetro.
m:	Metro.
Mm:	Milímetro.



GLOSARIO

Acueducto:	Ducto de transporte que tienen por objeto enviar agua cruda asociada con otros hidrocarburos.
Abolladuras:	Depresión producida en una superficie del ducto debido a un golpe o apretamiento.
Análisis de integridad:	Es el análisis que se realiza para establecer criterios de severidad de defectos, requerimientos de inspección no destructivas y procedimientos de reparación que garanticen la seguridad del ducto durante su operación, la continuidad en la producción y mínimo impacto ambiental, todo lo anterior dentro de opciones económicas viables.
Anomalía Significativa:	Defecto que pone en riesgo estructural al ducto durante la operación.
ANSI:	Instituto Nacional Americano de Estándares. (Siglas en Ingles)
ANSI B31.3:	Código de Diseño de Sistema de Tubería para el Transporte de Productos Químicos.
ANSI B31.4:	Código de Diseño de Sistema de Transporte de HC Líquidos y Gases Licuados del Petróleo Amoniacos Anhídridos y Alcoholes.
ANSI B31.8:	Código de Diseño de Sistema de Tubería para el Transporte y Distribución de Gas.
API:	Instituto Americano del Petróleo. (Siglas en Ingles).
ASME:	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos. (Siglas en Ingles).
Bases de Diseño:	Es toda la información requerida para el desarrollo adecuado del proyecto.
Bases de Usuario:	Información requerida para el desarrollo adecuado del proyecto.
Conexiones:	Tes, bridas, reducciones, codos, etc.
Corrosión:	Es el proceso de naturaleza electroquímica, por medio del cual los metales refinados tienden a formas compuestos (óxidos, hidróxidos, etc.) termodinámicamente estables debido a la interacción con el medio.



GLOSARIO

Corrosión Atmosférica:	Es la corrosión por acción del medio ambiente y generalmente se presenta en las instalaciones aéreas.
Corrosión Generalizada:	Es una corrosión de tipo uniforme en toda la superficie de la instalación.
Daño Mecánico:	Aquellos que rebasan los límites de aceptación en la pared del tubo y son designados como "Fuera de Norma", como son, abolladuras, arrancaduras, etc.
Derecho de Vía:	Franja de terreno protegida y libre de construcción u otras alteraciones, donde se alojan los ductos al servicio de PEMEX con los señalamientos adecuados.
Ducto:	Sistema que se compone de diferentes partes como: válvulas, bridas, accesorios, espárragos, dispositivos de seguridad o alivio, partes y componentes que se integran para realizar transporte de hidrocarburos.
Ducto Enterrado:	Es aquel ducto terrestre que está alojado generalmente por lo menos a 1.0 m. bajo la superficie del terreno a partir del lomo superior en suelos secos o húmedos.
Evaluación:	Es la determinación de la integridad mecánica de una instalación existente.
Grieta o fisura:	Hendidura o abertura pequeña en la pared del tubo o en soldaduras longitudinales o circunferenciales.
Imperfección:	Son las que se encuentran dentro de los límites de aceptación o "Dentro de Norma". Pueden ser de fabricación (inclusiones no metálicas, etc.), así como también corrosiones interiores o exteriores, abolladuras, arrancaduras, etc.
Instalación superficial:	Porción de ducto no enterrado utilizado en troncales, válvulas de seccionamiento, trampas de envío y recibo que se emplean para desviar, reducir y regular la presión en el ducto, incluye válvulas, instrumentos de control y tubería.
Corrosión Atmosférica:	Es la corrosión por acción del medio ambiente y generalmente se presenta en las instalaciones aéreas.



Corrosión Generalizada:	Es una corrosión de tipo uniforme en toda la superficie de la instalación.
Daño Mecánico:	Aquellos que rebasan los límites de aceptación en la pared del tubo y son designados como "Fuera de Norma", como son, abolladuras, arrancaduras, etc.
Derecho de Vía:	Franja de terreno protegida y libre de construcción u otras alteraciones, donde se alojan los ductos al servicio de PEMEX con los señalamientos adecuados.
Ducto:	Sistema que se compone de diferentes partes como: válvulas, bridas, accesorios, espárragos, dispositivos de seguridad o alivio, partes y componentes que se integran para realizar transporte de hidrocarburos.
Ducto Enterrado:	Es aquel ducto terrestre que está alojado generalmente por lo menos a 1.0 m. bajo la superficie del terreno a partir del lomo superior en suelos secos o húmedos.
Evaluación:	Es la determinación de la integridad mecánica de una instalación existente.
Grieta o fisura:	Hendidura o abertura pequeña en la pared del tubo o en soldaduras longitudinales o circunferenciales.
Imperfección:	Son las que se encuentran dentro de los límites de aceptación o "Dentro de Norma". Pueden ser de fabricación (inclusiones no metálicas, etc.), así como también corrosiones interiores o exteriores, abolladuras, arrancaduras, etc.
Instalación superficial:	Porción de ducto no enterrado utilizado en troncales, válvulas de seccionamiento, trampas de envío y recibo que se emplean para desviar, reducir y regular la presión en el ducto, incluye válvulas, instrumentos de control y tubería.



GLOSARIO

Libranza:	Autorización especial que se concede a un ducto para llevar a cabo la rehabilitación de sus sistemas de control, seguridad, la sustitución de tramos, etc. Ésta autorización implica movimientos operativos tales como desvíos de producción ó diferimiento de la misma.
Temperatura de Diseño:	Es la temperatura esperada en el metal, bajo condiciones de operación máxima extraordinaria y que puede ser mayor o igual a la temperatura de operación.
Temperatura de Operación:	Es la temperatura máxima del ducto en condiciones normales de operación.
Tubo:	Porción cilíndrica que se utiliza estructuralmente o como parte de un sistema de conducción.
T R	Tiempo de retorno del agua de lluvia.



RESUMEN

El activo integral Poza Rica – Altamira, es un centro de trabajo de P. E. P. (PEMEX Exploración y Producción) en el que se explotan hidrocarburos de iniciación primaria, los cuales están clasificados por su naturaleza en: Gaseosos y Líquidos. Para lo anterior, se requiere de toda una infraestructura de transporte y continuidad de la producción para llevarla a instalaciones para su procesamiento. La forma más factible y económica son: los ductos, tanto para el transporte del producto como para su extracción. Dentro de los métodos de extracción están los de inyección de gas o de agua y por métodos mecánicos como lo son las bombas lineales y horizontales. De dichos métodos uno de los más seguros para el medio ambiente y para la comunidad es el que utiliza el agua. Dicho método puede emplearse dentro de las ciudades, caso Poza Rica, para lo cual se cuenta con circuito o acueducto el cual cumple dos funciones que son primero inyectar agua a los pozos con poca presión interna y segunda proporcionar del vital líquido a las edificaciones del Activo. El circuito de la ciudad de Poza Rica cuenta con las siguientes características: Tubería de Acero al Carbono API 5L X52 s/c de 10" D. N. (254 mm), espesor original de pared de 0.500" (12.70 mm), longitud de 4.5 km y con una presión interna de 135 g/cm².

En el presente trabajo se realizó el estudio de una sección del acueducto señalada como obra especial debido a que en el kilómetro 2+400 cruza con el arroyo el Mollejón. Se consideran para el estudio las cargas debidas al cauce del arroyo, la variación del espesor del tubo y la presión de operación. Para realizar el análisis se empleo el método de elemento finito a través del programa comercial ANSYS. Los resultados de dicho análisis muestran que las deformaciones son muy pequeñas en comparación de la magnitud del ducto lo cual nos indica que no habrá deformaciones permanentes, los diferentes tipos de esfuerzos que se determinaron se encuentran dentro de los parámetros y satisface a las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 Y ASME B31.4. representados en la tabla 5.4 Logrando con esto que la modificación del trazo de la línea es apoyada por este estudio; obteniendo, así; la respuesta a la solicitud de Protección Civil de la Ciudad de Poza Rica y la junta de colonos del Fraccionamiento "Bella Vista" de la misma Ciudad, para vivir en un ambiente y entorno ecológico seguro.



ABSTRACT

The integral active Poza Rica – Altamira, it is a workplace of P. E. P. (PEMEX Exploration and Production) in which is exploited the Hydrocarbons of primary initiation, of which are qualify by their nature in: Gaseous and liquids. For the above mention it is needed of all the infrastructure of transportation and continuity in the production to take it to the installations for its process, the best and cheapest way are: ducts for the transportation of the product as well as for its extraction. Whit these forms of extraction there are injection of gas or water and mechanics like Linear Bombs and Horizontals; within the most secure for the environment and the community it is the water, that is why inside the cities there are circuits or aqueducts, where; besides injecting the water to the wells whit little internal pressure, it will provide this vital liquid to the active buildings. In Poza Rica City the circuit has the following characteristics: Carbon steel pipes API 5L X52 s/c of 10" D.N (254 mm) with original thick wall of 0.500" (12.70 mm) and a length of 12 m with internal pressure of 135 cm².

That is why this present job it was done by the study of the aqueduct which is in Poza Rica City, which is, in one of the points of its trip; it crosses "El Mellejon arroyo", considered to this study. The water charges in the course of the year of the 'Mellejon" the erosive action provoked by the raining and the corrosion by itself, like the tube characteristics and water pressure which is transported, using "ANSYS" program which is the one that makes the simulation based in the Finite Element Method in order to obtain the results of the external forces and internal ones which is subject the tube in the crossing of the river in its real action water point and in the breaking point. Achieving with this that the modification of the stroke of the line it is supported bye this study; getting like this; the respond to the application of Civil Protection in Poza Rica City and the board of settlers in "Bella Vista" Colony of the same City, in order to live in a secure.



OBJETIVO

Realizar el análisis de esfuerzos de un acueducto sometido a cargas externas e internas, empleando el método del elemento finito.

El estudio se enfoca en la obra especial que cruza el arroyo “El Mollejón”, se consideran la presión de operación la variación del espesor del ducto y la presión externa debido al cause del arroyo.

Objetivos particulares:

- Determinar la seguridad inherente del Acueducto y dar respuesta a la solicitud emitida por el departamento de Protección Civil y colonos del Fraccionamiento “Bella Vista” de la Ciudad de Poza Rica de Hidalgo, Veracruz; con respecto a la peligrosidad que representa el tener sobre el arroyo “El Mollejón”, la línea principal del Acueducto para la inyección y recolección de agua de P. E. P. Activo Integral Poza Rica – Altamira.
- Aplicar el Método del Elemento Finito, en el análisis de ductos presentes en P. E. P. Activo Integral Poza Rica – Altamira.
- Realizar el análisis de Vida Remanente del Acueducto.



JUSTIFICACIÓN

En los primeros años de la producción de petróleo en el área de Poza Rica, todos los pozos de explotación eran fluyentes por presión natural, pero conforme fue transcurriendo el tiempo; dicha presión fue bajando, siendo necesario inyectarles agua para realizar el proceso de recuperación de petróleo. El agua a presión es necesaria también para las bombas que mandan el crudo y el gas a su destino final donde son procesados y convertidos en productos utilizables; así como, para ser empleado en servicios auxiliares, oficinas del Activo Integral, edificio administrativo de Región Norte, Deportivo Petrolero, campos de deportivos y casas habitación de los trabajadores de confianza de PEMEX. De tal manera que las líneas de agua se considere como un elemento principal para la operación del Activo Integral Poza Rica – Altamira y de Región Norte de P. E. P.

En el caso específico de este trabajo, la línea de estudio conduce agua a alta presión (135 kg/cm^2) y se conoce como acueducto por ser la línea principal del circuito que pasa por todas las instalaciones utilizables de la paraestatal Petróleos Mexicanos. Cabe señalar que esta línea es la única línea que surte de este vital líquido a todas las instalaciones, de ahí su importancia. Sin embargo, en su trazo cruza el arroyo “El Mollejón” como obra especial y con las siguientes características: Tubería de Acero al Carbón API 5L X52 s/c de 10” D. N. (254 mm) con espesor original de pared de 0.500” (12.70 mm) y una longitud de 12 m, enterrada originalmente a 3 m bajo del espejo de agua, pero con la erosión y la construcción de los muros de contención, del arroyo; se encuentra actualmente a 30 cm sobre el espejo de agua.

Al realizar el estudio de impacto ambiental, el departamento de protección civil de la Ciudad de Poza Rica; recomendó se ejecute el estudio de resistencia mecánica del tubo en sus 12 metros donde cruza dicho arroyo.

Por lo tanto, en el presente trabajo se realiza el análisis numérico empleando el método del elemento finito para simular distintos escenarios donde se contempla la variación del espesor del ducto; así como, la influencia de las cargas externas debidas a la corriente del agua del arroyo.



INTRODUCCIÓN

Los pozos productores que se encuentran en la zona del Activo Integral Poza Rica fueron perforados hace mucho tiempo por lo que su presión de producción es baja y la forma de extraer hidrocarburo de estos pozos de baja presión natural es por dos métodos: inyección de gas natural o por inyección de agua. Los métodos están conformados por una red o circuito de líneas que transportan gas natural y/o agua en ductos a alta presión.

Ambos elementos, extraídos de los pozos productores de gas y/o agua procesados en las baterías e inyectados mediante tuberías a alta presión. Debido a cuestiones de seguridad y de necesidades operativas, ya que el gas es muy nocivo para los ductos de acero y peligroso para el medio ambiente; se utiliza la inyección de agua en los lugares de alto índice demográfico. Por lo que un ducto principal denominado acueducto; es conectado a los pozos que producen agua (aguadores) y por juego de presiones a los pozos con baja presión (estimulados).

En el Área Poza Rica, el acueducto tiene una línea principal que es utilizada para el transporte del vital líquido en las clínicas y hospitales, así como a las turbo bombas y oficinas de Petróleos Mexicanos de la Ciudad de Poza Rica, Veracruz; de esta línea principal se desprenden los ramales que inyectan agua a los pozos con la necesidad de estimulación, lo cual representa el 80 % de los pozos en proceso.

En el presente trabajo, se desarrolla un estudio de análisis de esfuerzos en un tramo de 12 m del Acueducto del Área Poza Rica en su línea principal de 12" Ø (30.48 cm.) que cruza el arroyo "El mollejón", a la altura del fraccionamiento "Bella Vista"; de la Ciudad de Poza Rica, Veracruz. Dicha línea presenta una presión interna de 135 kg/cm² y una presión externa variable. Esta última debido al cause del arroyo, que en época de lluvia es mayor.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



En la zona donde el acueducto cruza el arroyo, se encuentra empotrado en ambos extremos, contando con resistencia a la flexibilidad y tensión natural del ducto al encauzamiento de dicho arroyo. Siendo necesario realizar un estudio en los puntos de mayor presión y compresión del tubo, donde se obtengan resultados concretos para la aprobación y/o desaprobación de las condiciones y el trazo actual del derecho de vía, realizar recomendaciones de reforzamiento en dichos puntos o su reubicación. Para lo cual se utilizará el Método del Elemento Finito para simular distintas condiciones de operación para determinar el estado de esfuerzos y así determinar la seguridad inherente del ducto.

De acuerdo a lo anterior el trabajo queda dividido de la siguiente manera:

En el primer capítulo se establece la importancia de los Sistemas de Ductos para El Suministro de Agua en los Campos Petroleros, abordando la reseña histórica del petróleo, su función como fuente primordial para generar energía, la utilización de agua para la recuperación de hidrocarburo; así como, los inicios de las peticiones de reubicación del derecho de vía del acueducto, por parte de la compañía constructora del fraccionamiento “Bella Vista”.

En el segundo capítulo se instituye el Marco Teórico de Análisis de Integridad de Ductos como lo son; el Probabilístico y el Determinístico que nos dan como resultado la severidad de los defectos, cálculo de presión máxima de operación y la predicción de la vida útil del ducto, estos resultados son para poder obtener la resistencia en las condiciones actuales y el punto máximo de falla.

En el tercer capítulo se efectúa el Estudio Hidráulico con los datos históricos logrados durante treinta y cinco años, por la Comisión Nacional del Agua en su Región 27, donde se encuentra ubicada la Ciudad de Poza Rica; con esta hidrografía se realizaron los cálculos, utilizando los Métodos Básico Racional, de Ven Te Chow y del Hidrograma



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Triangular; para obtener como resultado la cantidad de agua que fluye por el arroyo “El Mollejón”.

En el cuarto capítulo se analiza el Método del Elemento Finito al caso de estudio para poder efectuar la comprobación del Análisis de Esfuerzos, todo ello con el fin común de llegar a un análisis muy preciso y así, poder obtener soluciones analíticas; que nos brinde información específica y fidedigna.

En el quinto y último capítulo se describe el Caso de Estudio con los resultados obtenidos de la simulación mediante el apoyo del programa computacional “ANSYS”, para un mejor entendimiento de los esfuerzos en el que se encuentra sometido el ducto en su estado actual y hasta la fuerza máxima, alcanzando su punto mas crítico.

Los resultados del presente trabajo son de utilidad para conocer los esfuerzos a los que son sometidos los ductos en condiciones de operación en obras especiales, como lo son los cruces de arroyos o ríos, que tengan desplantes de dentellones en sus orillas como protección a la erosión; donde se encuentran empotrados los ductos; así como, los niveles de seguridad del mismo para diferentes cargas. Siendo de beneficio para el personal que trabaja en la Región Norte y el Activo Integral Poza Rica – Altamira de Petróleos Mexicanos, para determinar del nivel de seguridad de sus instalaciones.



CAPÍTULO 1

LA IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE DUCTOS PARA EL SUMINISTRO DE AGUA EN LOS CAMPOS PETROLEROS.

En este capítulo se da a conocer la descripción general de la importancia del agua dentro del activo Integral Poza Rica - Altamira perteneciente a la Región Norte de PEMEX, las características generales de los ductos para inyección de agua como método de recuperación mejorada y el planteamiento general del caso de estudio.



El activo integral Poza Rica – Altamira, es un centro de trabajo de P. E. P. (PEMEX Exploración y Producción) en el que se explota hidrocarburos de iniciación primaria, los cuales están clasificados por su naturaleza en: Gaseosos y Líquidos. Para lo anterior se requiere de toda una infraestructura de transporte para la continuidad de la producción y su transporte a instalaciones para su procesamiento, la forma más factible de transporte son los ductos. Dentro de los más importantes con que se cuentan en este activo son los Acueductos o líneas principales de los circuitos de agua, ya que por medio de los ramales que se injertan a dicha línea principal, se les inyectan agua a los pozos productores de baja presión, siendo estos por su antigüedad o por su naturaleza.

1.1. Extracción del Petróleo.

La extracción, producción o explotación del petróleo se hace de acuerdo con las características propias de cada yacimiento. Para la producción de un pozo se baja una especie de cañón y se perfora la tubería de revestimiento a la altura de las formaciones donde se encuentra el yacimiento. El petróleo fluye por los orificios hacia el pozo y se extrae mediante una tubería de menor diámetro, conocida como "tubing" o "tubería de producción", en la figura 1.1 se observa la composición de este línea.

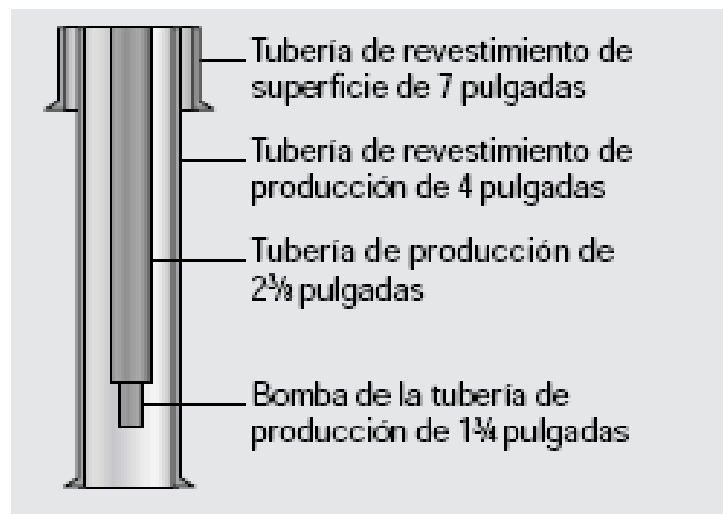


Figura 1.1 Distribución del "Tubing" o Tubería de Producción.

Si el yacimiento tiene energía propia, generada por la presión subterránea y por elementos que acompañan al petróleo (por ejemplo gas y agua), éste saldrá por sí solo. En este caso se instala en la cabeza del pozo un equipo llamado "árbol de navidad"; que se puede ver en la figura 1.2; que consta de un conjunto de válvulas para regular el paso del petróleo. ^[1.1]



Figura 1.2 Vista del pozo Poza Rica 78 o "Árbol de Navidad", pozo productos de agua.

A pesar de los avances alcanzados en las técnicas de producción, nunca se logra sacar todo el petróleo que se encuentra (in situ) en un yacimiento. En el mejor de los casos se extrae el 50 ó 60 por ciento. Por tal razón, existen métodos de "recuperación mejorada", para lograr la mayor extracción posible de petróleo en pozos sin presión natural o en declinación; tales como la inyección de gas, de agua o de vapor a través del mismo pozo productor o por intermedio de pozos inyectores paralelos a éste.

La inyección de vapor se emplea en depósitos que contienen petróleos muy viscosos. El vapor no sólo desplaza el petróleo, sino que también reduce mucho la viscosidad (al aumentar la temperatura del yacimiento), con lo que el crudo fluye más deprisa a una presión deseada pero resulta muy costoso por necesitar de un medio de calentamiento del agua y protección con aislantes para las líneas de transporte por lo que desde la década de los 90's se retiraron todos los ductos para este fin.

Por su parte la inyección de gas también se emplea como medio de extracción de hidrocarburo, siendo su ventaja principal que en este activo se tiene la mayor producción de gas a nivel nacional y la desventaja que contiene muchos agentes corrosivos (sulfhídricos), por lo que las normas de seguridad prohíben tener en zonas pobladas gasoductos para bombeo neumático.



1.2. Sistema de Inyección de Agua.

En un campo petrolero explotado en su totalidad, los pozos pueden perforarse a una distancia de entre 50 y 1500 metros, según la naturaleza del yacimiento. Si se bombea agua en uno de cada dos pozos, puede mantenerse o incluso incrementarse la presión del yacimiento en su conjunto. Con ello también puede aumentarse el ritmo de producción de crudo; además, el agua desplaza físicamente al petróleo, por lo que aumenta la eficiencia de recuperación. En algunos depósitos con un alto grado de uniformidad y un bajo contenido en arcilla o barro, la inundación con agua puede aumentar la eficiencia de recuperación hasta alcanzar el 60% o más del petróleo existente. La inyección de agua se introdujo por primera vez en los campos petroleros de Pensilvania a finales del siglo XIX, de forma más o menos accidental y desde entonces se ha extendido por todo el mundo. ^[1,2.]

En las zonas conurbadas ya no se realiza la inyección de gas o bombeo neumático por presentar mayor índice de peligrosidad en el transporte de este, bajo casa, edificios y calles; por lo que la solución es la inyección de agua a estos pozos.

El transporte de agua se realiza mediante la unión de tubos de acero al carbono, a lo largo de un trayecto determinado, se extrae de los pozos productores de agua y llegan hasta las bombas de inyección por gravedad o presión natural de estos pozos, se trata una parte de este líquido y el resto se manda a los pozos de producción de hidrocarburo por medio de una línea principal a alta presión y con ramales derivados de esta.

1.3. Características del Acueducto.

El mantenimiento de ductos en Petróleos Mexicanos, desde sus primeros años, se destacó por ser realizado en gran parte por medio de administración directa, a través de la mano calificada de su personal. Durante los primeros años se realizaron trabajos de interconexión de líneas para pozos productores de aceite, de los que no se obtenía producto; se les utilizó para realizar la inyección de agua para la recuperación del aceite en los pozos con problema por falta de presión para su recuperación.

En la década de los 50's se construyó la línea principal del circuito del acueducto, el cual surte de agua a los pozos productores de aceite con baja presión, así como a los edificios administrativos y sitios de operación de PEMEX, así como también; al estadio deportivo "Heriberto Jara Corona", que se encuentran dentro de la Ciudad de Poza Rica. La línea principal del circuito opera con una presión constante de 135



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



kgs/cm² en un ducto de 10" Ø desde el tanque Z (TZ) hasta el pozo del yacimiento de inyección de agua, Las características de diseño y servicio del circuito se presentan en las tablas 1.1 y 1.2

Tabla. 1.1 Características de diseño del ducto, datos obtenidos del departamento de Operación de pozos Activo Integral Poza Rica – Altamira ^[1.3.].

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL DUCTO	
MATERIAL	ACERO AL CARBÓN
<i>ESPECIFICACIÓN DE MATERIAL</i>	API 5LX-52
RESISTENCIA A LA CEDENCIA	35 Ksi
DIÁMETRO NOMINAL	10" (254 mm)
ESPESOR NOMINAL	0.500" (12.7 mm)
SERVICIO	ACUEDUCTO
LONGITUD	4.500 km
CLASE DE LOCALIZACIÓN	3

Tabla. 1.2 Características del servicio del ducto, datos obtenidos del departamento de Operación de pozos Activo Integral Poza Rica – Altamira ^[1.4.].

CARACTERÍSTICAS DE SERVICIO



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



PRODUCTO TRANSPORTADO	AGUA RECUPERADA
PRESIÓN DE OPERACIÓN	135 Kg/cm ²
TEMPERATURA DE OPERACIÓN	45 ° C

Este circuito circunda a la ciudad de Poza Rica pasando por los puntos estratégicos de la paraestatal Petróleos Mexicanos y en su sección del pozo Poza Rica 153 al pozo Poza Rica 120 con una longitud de 4.500 km. En el kilómetro 2 + 450 el circuito cruza el arroyo “El Mollejón”, por lo que realizó una obra especial para el cruce de dicho arroyo.

En la figura 1.3., se muestra el derecho de vía de la línea principal del circuito de agua que pasa por parte de la ciudad de Poza Rica demográficamente activa, y en la figura 1.4., se observa el punto del caso de estudio en el acueducto donde se intercepta con el Fraccionamiento “Bella Vista” aún en construcción; y el Arroyo “El Mollejón”.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.

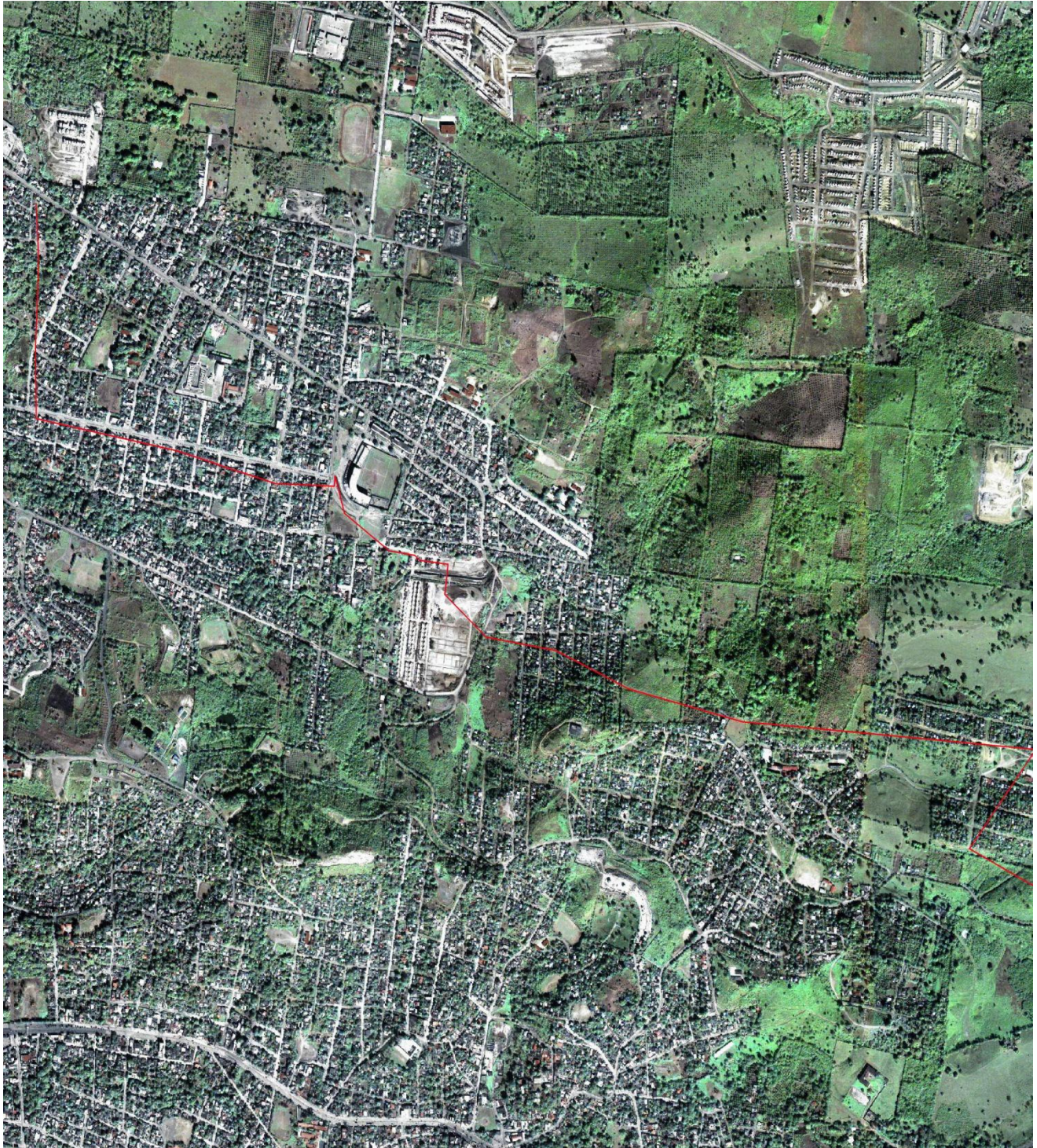


Figura 1.3 Vista aérea del derecho de vía, tomada vía satélite a una escala de 1:2000, con coordenadas vía GPS por personal de SICORI del Activo Integral Poza Rica - Altamira.



Figura 1.4 Vista aérea del derecho de vía del acueducto sobre el fraccionamiento en construcción, tomada vía satélite a una escala de 1:2000, con coordenadas vía GPS por personal de SICORI del Activo Integral Poza Rica - Altamira. [1.5.]

1.4. Obras Especiales.

Las obras especiales más importantes son: estaciones de bombeo o de compresión, trampas de "diablos", válvulas de seccionamiento, cruzamientos de corrientes fluviales, lagunas, esteros, pantanos, canales, presas, acueductos, oleoductos, cruce de vías de comunicación como ferrocarriles y/o caminos y cualquier otro tipo de obstáculo que interrumpa la construcción de la línea regular. Todas las obras especiales se rigen en base la norma de petróleos mexicanos [1.6.]

Una obra especial es considerada como tal cuando hay una interrupción en la secuencia de la producción de soldadura a lo largo de la línea regular, siempre que para lograr la continuidad de la tubería se requieran cuadrillas, equipos y sistemas de trabajo diferentes de los que se usan en la línea regular [1.7.]. El caso de estudio planteado en el presente trabajo, se toma como obra especial por cruzar un arroyo con una dimensión de 14 m de ancho, con características de escurrimiento de agua; así como, de socavación que se explicarán en capítulos posteriores.



1.5. Inicios de solicitudes.

Con el paso del tiempo, la mancha urbana de la ciudad de Poza Rica, Veracruz fue creciendo a tal grado que para el año de 1999, la compañía Industrias MAXIMO, S. A. de C. V. inicia los trabajos de construcción del fraccionamiento “Bella Vista”. Dicho fraccionamiento colinda con el arroyo “El Mollejón” y además por donde cruza la línea de agua principal del circuito.

La compañía Industrias MAXIMO, S. A. de C. V. inició trabajos en el predio ubicado en la parcela 14, lote 3, fracción 24, en la Cd. de Poza Rica, Veracruz; donde edificaría un total de 398 viviendas en una superficie de 57,134.43 m²; para lo cual, mediante oficios, solicitó la localización y ubicación de todas las líneas que pasaran por este predio a la paraestatal Petróleos Mexicanos. Para consecuentemente, de ser necesario solicitar el desmantelamiento o reubicación de líneas, según fuera el caso, ya que el predio se encontraba en un derecho de vía y en una zona netamente petrolera, por lo que se tenía la duda de que se encontrarán ductos en operación o fuera de servicio.

Así mismo, el Lic. Leonel González Díaz encargado legal de la compañía propietaria del predio, solicitó el sondeo sobre su posesión; para realizar los trabajos de construcción libre de ductos.

El C. P. Luis M. Galván Arcos, Superintendente General Interino del Distrito de Poza Rica, fue quien mediante el oficio N° 221-22000-27000-27500-11-580/99 (ver anexo A.1) con fecha del 14 de Mayo de 1999 contestó que se encontraban un derecho de vía de 13 m, en el cual no se podía realizar ningún trabajo de construcción, ya que así lo marcan la norma de seguridad y la norma de construcción para ductos. ^[1.8.]

1.6. Reubicación del Acueducto.

Viendo que el ducto que más afectaba para la construcción del fraccionamiento, era el acueducto de 10” Ø que atravesaba por la mitad dicho predio; como se muestra en el anexo A.2, donde se observa en la línea punteada el trazo del derecho de vía que tenía el acueducto, así como; los puntos de empate. La compañía constructora realizó una nueva solicitud el día 3 de Noviembre de 1999, para la reubicación del trazo final del ducto, ver figura 1.5; y donde se confirma que sobre la línea no se edificaría, en su lugar se construiría una calle con camellón de 4m de ancho como área verde alojando en el centro el acueducto.

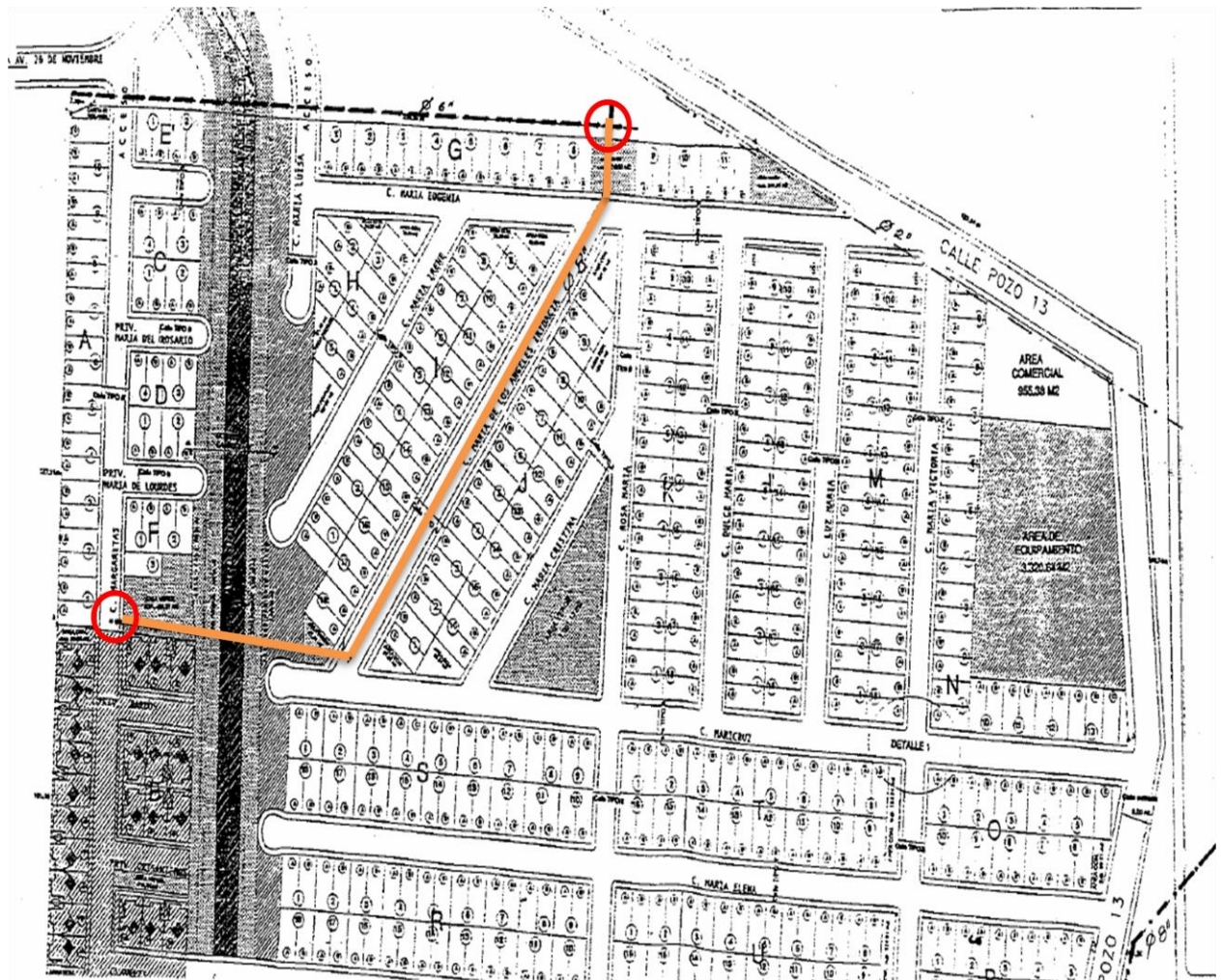


Fig. 1.5 Croquis de propuesta de trazo del derecho de vía del acueducto de 10" Ø, donde se muestra en la línea punteada la trayectoria real del ducto.

La línea de 10" Ø, se encuentra en funcionamiento por lo que no puede ser sometida a ningún trabajo de obra civil ya que esto implica un posible golpe o abolladura e incluso un par galvánico que puede producir una corrosión e iniciar con esto, la fuga de agua a una presión constante de 135 Kg/cm². , para mediante libranza ser interconectados los dos extremos de la lingada en construcción del nuevo trazo

1.7. Construcción de la protección del arroyo "El Mollejón".

Posteriormente a la terminación de la reubicación del Acueducto se procedió a realizar el muro de protección del arroyo que pasa por un costado del Fraccionamiento "Bella Vista", con características y



dimensiones como se muestra en la figura 1.6; quedando a una altura de 0.30 m del piso, por lo que personal de Protección Civil al realizar el recorrido para la entrega del muro de contención al municipio, observaron que era un riesgo el tener el ducto a tan poca distancia del piso, ya que la Ciudad de Poza Rica se encuentra en una zona de lías extremas, solicitando a la compañía constructora y a Petróleos Mexicanos un estudio para el aseguramiento de la línea, de la operación del ducto y del entorno ecológico.

VISTA FRONTAL

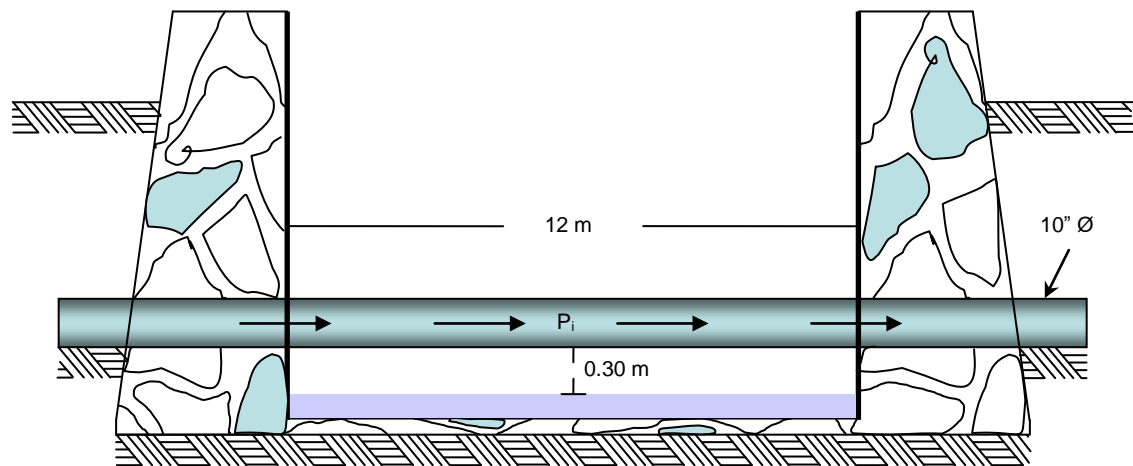


Fig. 1.6. Perfil real del cruce del acueducto de 12" Ø sobre el derecho de vía en el arroyo "El Mollejón".

1.8. Solicitud de solución a Protección Civil.

Derivado de los permisos de construcción que tramitó la compañía constructora ante el municipio de la ciudad de Poza Rica, para la edificación del fraccionamiento "Bella Vista"; la presidencia municipal realizó los análisis mediante el departamento de Protección Civil; quienes solicitaron que se construyera un muro de contención en los lados del arroyo "El Mollejón" para evitar la erosión y como medio de protección a pobladores de dicho fraccionamiento. Con esta nueva orden, la compañía al realizar la construcción del muro empotró al acueducto en su estado actual, al revisar la obra; personal del departamento de Protección Civil determinó que podría ser un riesgo el tener empotrada la línea por considerar que en época de lluvia el caudal del arroyo sube de nivel, arrastrando escombros y sedimentos, que podrían fracturar al ducto o en las soldaduras de él, a consecuencia de esto se realizó una solicitud a PEMEX que subiera de nivel la línea o se realizara un estudio de que tipo a la línea.



1.9. Planteamiento del Problema.

Partiendo de las peticiones hechas por el departamento de Protección Civil de la Ciudad de Poza Rica y por necesidades principales del Activo Integral Poza Rica – Altamira de PEMEX Exploración y Producción, es necesario, como primer punto; realizar el estudio del caudal del agua que arrastra el arroyo en época de lluvia para obtener la presión que ejerce sobre la línea, de esta presión; se analizará matemáticamente por medio de la mecánica de la fractura los puntos mas críticos y serán comprobados, los resultados; por medio de una simulación computacional.

1.10. Sumario

Hasta aquí, se estudia la historia del petróleo en forma breve y el inicio del caso de estudio para una mejor comprensión de los siguientes estudios y razonamientos.



1.1. Referencias.

1.1. www.monografias.com/trabajos/petroleo2/petroleo2.shtml - 91k -

Responsable de la página: Julio Esper

Fecha de consulta: Septiembre del 2006

1.2. www.slb.com/media/services/resources/oilfieldreview/spanish04/aut04/editorial.pdf -

Responsable de la página: Usman Ahmed

Fecha de consulta: Septiembre del 2006.

1.3. Revista "Innovación al Futuro".

Autor: IMP Octubre del 2005.

1.4. Revista "Innovación al Futuro".

Autor: IMP Octubre del 2005.

1.5. Google. Com y SICORI.com

1.6. NORMA PEMEX No. 2.421.01, Capítulo 6, párrafo 6.4.

1.7. PEMEX CID-NOR-N-SI-0001/98, "Requisitos Mínimos de Seguridad para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento e Inspección de Ductos de Transporte", Grupo de Normatividad, Rev.0, Agosto 1998.

1.8. NRF-030-PEMEX-2003, "Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para Transporte y Recolección de Hidrocarburos", Subcomité Técnico de Normalización, Rev.0, Junio 2003.



CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO DEL ANÁLISIS DE INTEGRIDAD DE DUCTOS.

En este capítulo se da a conocer la descripción general del Marco Teóricos del Análisis de Integridad de Ductos para la obtención de resultados tal como el Tiempo de Vida Remanente de la sección del Acueducto que cruza el arroyo "El Mollejón". Posteriormente se hace el planteamiento del estudio Hidráulico del arroyo.

2.1. Fundamentos del Análisis de Integridad.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



El análisis de integridad se fundamenta en conocimientos teóricos y prácticos de mecánica de la fractura, la cual es una disciplina que estudia la resistencia de un cuerpo que presenta un defecto caracterizado como grieta. Para ello se basa en el conocimiento de tres aspectos:

1. La resistencia del material al crecimiento de grietas, es llamada tenacidad a la fractura y es una propiedad del material.
2. El factor de intensidad de esfuerzos K que determina la magnitud de esfuerzos en la punta de la grieta y que depende del tamaño y forma de la grieta, del tipo de cuerpo, por ejemplo: tubo, viga, etc., y de la forma de aplicación de carga (presión, flexión, etc.).
3. El tamaño, forma y localización de la grieta (si es radial, longitudinal, laminación, etc.).

Una de las aplicaciones de mayor impacto en ductos de la mecánica de fractura es la predicción de la vida útil. Cuando la causa primaria del fin de la vida del ducto es un proceso de fisura, la posibilidad que brinda la mecánica de la fractura al señalar la rapidez de propagación de una grieta y es precisamente lo que hace que la predicción de vida sea posible. Dicha predicción es relativamente simple y consiste en que, una vez detectada una grieta y conociendo su rapidez de propagación bajo las condiciones esperadas de servicio, el problema será calcular el tiempo de propagación de la grieta, desde su tamaño detectado hasta su tamaño crítico, ese tiempo será el *tiempo de vida residual*.

Un análisis mas detallado, permite conocer otros aspectos relevantes de la predicción de vida. Primero, todo componente estructural es diseñado bajo la suposición de que el material no contiene defectos y la resistencia de diseño es la determinada por las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las características geométricas (espesor, ancho, forma, etcétera) del componente. Cuando aparece una grieta, inicialmente esta no tiene un efecto en la resistencia residual, pero a medida que la grieta se propaga, la resistencia va disminuyendo.

El tamaño de grieta que comienza a provocar una disminución de la resistencia será por lo tanto, el tamaño mínimo a detectar mediante la inspección no destructiva; en otras palabras, dicha inspección debe tener la sensibilidad y resolución suficientes para detectar como mínimo, una grieta cuyo tamaño afecte la resistencia.



Es a partir del tamaño mínimo a detectar y hasta el tamaño crítico, que se obtiene el tiempo de vida útil, o sea la vida máxima garantizada del componente; no se puede garantizar una mayor vida, debido a que no se puede asegurar que se detecten grietas mas cortas que el tamaño mínimo.

La vida residual y la vida útil están determinadas por el punto de falla, que es aquel en que el tamaño de defecto provoca una resistencia residual igual al nivel de carga normal de servicio, haciendo que la fractura sea inminente.

2.2.- Falla de Ductos en Servicio.

Cuando el ducto se encuentra en servicio, está sometido a la acción de diferentes fuerzas y acciones agresivas provenientes del servicio y del ambiente al que está expuesta, los cuales tienen influencia en el deterioro de su estado físico. Este deterioro es causado por:

- Disminución de la resistencia del material.
- Reducción de la sección transversal o del espesor de pared.
- Aparición de grietas.

Así mismo, los diversos tipos de deterioro tienen como consecuencias:

- Reducción en la capacidad del ducto de soportar cargas.
- Posibilidad de fallas inesperadas y catastróficas.
- Reducción en la vida útil.

Las condiciones de servicio severo y la inestabilidad de las condiciones de operación, aumentan el grado de deterioro, reduciendo de manera muy importante la vida útil de los ductos. Las formas de daño más comunes que acortan la vida útil de estos son:

- Corrosión localizada.
- Corrosión uniforme.
- Erosión y desgaste.
- Agrietamiento inducido por hidrógeno.



- Agrietamiento por corrosión bajo esfuerzos.

La susceptibilidad de un material a estas formas de daño depende de la interacción de varios factores entre los que destacan las propiedades mecánicas, la composición química, pH y temperatura del ambiente, la presión o carga de trabajo, las condiciones de servicio y las formas de protección aplicadas, por lo que para la predicción de vida deben de analizarse todos y cada uno de los factores antes mencionados.

2.3.- Inspección no destructiva.

A partir de una inspección no destructiva, la cual se puede observar en el anexo B.1; se establecen el tamaño, forma, tipo y distribución de los defectos presentes en la estructura.

Esta inspección se debe realizar para detectar daños contenidos en el espesor, pared externa y pared interna del ducto, en líneas que no sea posible inspeccionarla con equipo instrumentado.

Las técnicas que pueden emplearse son alguna o algunas de las siguientes:

- Inspección visual
- Líquidos penetrantes
- Partículas magnéticas
- Inspección con equipo de ultrasonido
- Inspección con ondas guiadas

Esta inspección debe realizarse por técnicos de nivel II como mínimo, especializados en las técnicas indicadas en 8.1.4. Todos ellos calificados de acuerdo con la norma mexicana NMX-B-482-1991^[2.1] y/o ASNT SNT-TC-1A^[2.2] o equivalente.

Se debe realizar una inspección visual detallada, medición de espesores de pared, inspección muestral de uniones soldadas y barrido en zonas críticas tales como: elementos con daño previo, zonas de concentración de esfuerzos y zonas de daño potencial por ambiente y condiciones de operación severos, así como llevar a cabo la limpieza del área por inspeccionar para efectuar las pruebas no destructivas.



2.4.- Principios del Análisis de Integridad en Ductos.

El análisis de integridad consiste en la evaluación del estado estructural del ducto, basándose en la identificación del tipo y grado de severidad de los defectos presentes en él, a partir de los reportes de inspección no destructiva y la información técnica del ducto.

El análisis de integridad esta con base en el cálculo de:

1. La presión o carga máxima permisible de operación del ducto o algún tramo en presencia de defectos.
2. El tamaño máximo tolerable de defecto.
3. La rapidez de crecimiento del defecto.

Estos cálculos están fundamentados en los conocimientos de la mecánica de la fractura y se apoyan en el conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales de fabricación y las dimensiones de los defectos presentes, detectados por inspección no destructiva. Esta información debe ser obtenida del historial propio del ducto y de los reportes de inspección y mantenimiento.

Por otra parte, los datos de propiedades mecánicas, caracterización metalúrgica y otros datos, se obtienen mediante pruebas de laboratorio o se utilizan los valores nominales de acuerdo a la especificación del material de construcción. El análisis de esfuerzos será un requisito cuando ésta se presente y sus resultados serán tomados en cuenta para el análisis de integridad.

2.5.- Criterios de Severidad de Defectos.

Los criterios utilizados en ductos terrestres para definir si un defecto debe ser considerado como severo, para dictaminar posteriormente si el tramo que lo contiene debe ser reparado o retirado de servicio son:

1. $PMPO \leq Pop$ (donde PMPO es la Presión Máxima Permisible de Operación y Pop es la Presión de Operación).
2. Pérdida de espesor $\leq 80\%$.
3. Todas las grietas mayores que las permitidas por las normas de construcción^[2,3] son severas, serán analizadas por mecánica de fractura. Este criterio no aplica a laminaciones ni ampollas, las cuales serán objeto de un análisis especial.



4. TVR o Plazo para la próxima inspección. (TVR es tiempo de vida remanente).
5. Deformación plástica mayor de 0.5%.
6. Un tramo o totalidad de ducto, deberá considerarse para retiro, si la cantidad o extensión de defectos es tal que el costo de la reparación resulta antieconómico de llevar a cabo. El límite antieconómico es determinado por el usuario.

Los siguientes índices definen cuantitativamente el nivel de riesgo de falla. Este límite deberá ser establecido tomando en cuenta factores tales como:

- 1) Importancia estratégica del ducto.
- 2) Análisis de riesgo en caso de falla.
- 3) Costo de la reparación.
- 4) Prioridad en los programas de mantenimiento, etc.

2.5.1.- Clasificación de Anomalías en Ductos en Función de su Severidad.

Para una mejor comprensión de la severidad y prioridad de los defectos a continuación se definen los siguientes términos:

Presión de Diseño (Pd): Es la presión máxima permisible en ausencia de defectos y en cumplimiento con todas las especificaciones de diámetro, espesor, propiedades del material y condiciones de servicio, incluye un factor de seguridad.

Generalmente esta definida en términos de la presión que produciría un esfuerzo circunferencial en la pared del tubo, igual a una fracción del esfuerzo de cedencia mínimo especificado del material de fabricación de la tubería.

Presión de Operación (Pop): Es la presión manométrica a la cual se opera el ducto en condiciones normales y estables. Para efectos de análisis, estas mediciones de presión son tomadas en los orígenes de las líneas ya que se desprecian las pérdidas por fricción, disminución de temperatura o reducción de flujo.

Presión de falla (Pf): Es la presión que causa una condición indeseable o de riesgo del tramo que contiene el o los defectos analizados; es decir la presión que produce deformación plástica, crecimiento de



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



defectos, deterioro acelerado de materiales, fuga, colapso y explosión; esta presión es calculada en base a los principios de mecánica de la fractura y de resistencia de materiales.

Presión Máxima Permisible de Operación (PMPO): Es la presión máxima a la cual se puede operar un ducto que contiene defectos, preservando su integridad y su factor de seguridad por diseño.

Tamaño Crítico de Defecto: Es el tamaño de defecto que produce una condición indeseable y de riesgo.

Tiempo de Vida Remanente (TVR): Es el lapso de tiempo que transcurre desde tamaño de construcción hasta el tamaño crítico, que es el tamaño que produce una fuga o falla. El TVR es mayor cuando en el periodo de la próxima inspección no hay riesgo de falla o el tiempo esperado es mayor que el de servicio, pero si el TVR es menor que el periodo de la próxima inspección integral o que el tiempo esperado de servicio, el defecto debe repararse.

Si la reparación no es posible realizarla de inmediato, el TVR puede emplearse para establecer el plazo de la siguiente inspección. Si el TVR es menor de 6 meses, deberá tomarse una acción correctiva inmediata.

Combinación de defectos: Se considera como la combinación de dos o más defectos, tales como pérdidas internas o externas de metal con defectos de fabricación, falta de fusión, coronas bajas, socavados, quemaduras por arco eléctrico, porosidad, etc. los cuales pueden interactuar entre ellos.

Agrupación de defectos: Cuando dos defectos están muy cercanos entre si, pueden ser considerados como uno solo para efectos del cálculo de la PMPO y TVR; en tal caso, sus dimensiones pueden agruparse y reportarse como un solo defecto.

Riesgo de falla: Se define como la condición de la tubería que implica un evento no deseado tal como una fuga, una fractura o una explosión: dicha condición, provoca que la capacidad de la tubería para contener herméticamente el fluido que transporta y la presión interna a la cual está sometido, sea reducida o eliminada.

El riesgo de falla se determina en función de la presión máxima permisible de operación (**PMPO**) ó del tiempo de vida remanente (**TVR**) de la tubería.



Relación de Presiones (RP) indica a que porcentaje de la **PMPO** está operando el ducto y por lo tanto es indicativa del margen de seguridad existente.

Se define como:

$$RP = \frac{PMPO}{POP} \quad 2.1$$

En base a lo anterior se obtienen tres situaciones:

1. Si **RP** es mayor o igual que 1.0, no se afecta el factor de seguridad y el ducto puede ser operado a la **Pop**.
2. Si **RP** es menor de 1.0 pero mayor que **FS** (Factor de Seguridad), la operación tiene cierto riesgo, pues ya está haciendo uso del factor de seguridad establecido por la norma y se debe tomar una acción correctiva en un plazo menor a los 12 meses; no obstante, mientras se ejecuta la acción correctiva la **Pop**, no debe incrementarse por arriba de la **PMPO** reportada en el análisis de integridad.
3. Si **RP** es menor o igual que **FS**, se debe tomar una acción correctiva inmediata que puede ser:
 - Reducción de la presión de operación por debajo de la **PMPO**,
 - Colocación de un refuerzo o ejecución de acción correctiva recomendada inmediata y
 - Suspensión del servicio.

Relación de esfuerzos (RS) Es la relación entre el esfuerzo de cedencia mínimo especificado (**So**) y el esfuerzo equivalente de Von Mises (**Svm**) en el tramo analizado. La relación se calcula de la forma siguiente:

$$RS = \frac{SVM}{So} \quad .2.2$$



Si la relación de esfuerzos es igual o mayor que 0.9, el tramo analizado tiene esfuerzos mayores a los permisibles y debe tomarse una acción correctiva.

Prioridades de acción correctiva. La prioridad de acción correctiva es un factor que define la urgencia con la que se debe tomar una acción correctiva en un tramo de ducto que se ha dictaminado para reparación o sustitución del trazo, de acuerdo a los criterios de severidad. Debido a que un ducto puede fallar por aumento de presión, se define un factor de priorización para cada una de estas formas de falla.

La prioridad se establece de la forma siguiente:

Prioridad 1

Muy severa, riesgo inminente de falla en tiempo de varios días o con aumentos leves de presión de operación (10 a 20% arriba de Pop).

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 1 debe cumplirse:

$$RP \leq 1.2 FS \quad \text{o} \quad TVR < 6 \text{ meses} \quad \text{o} \quad RS \leq 0.9$$

Prioridad 2

Anomalía severa con alta probabilidad de falla con aumentos de presión moderados o en plazo de meses.

Para que la anomalía se clasifique como prioridad 2 debe cumplirse:

$$1.2 FS \leq RP \leq 0.55 FS + 0.5 \quad \text{o} \quad 6 \text{ meses} < TVR \leq 1 \text{ año} \quad \text{o} \quad 1 < RS \leq 1.2$$

Prioridad 3

Anomalía con severidad moderada, riesgo de falla sustancial, posibilidad de falla si la Pop (Presión de Operación) se aproxima a la Pd (Presión de Diseño), ó en represionamientos grandes ó en presencia de altos esfuerzos secundarios en eventos tales como: golpes de ariete, sismos, deslizamientos de terreno, golpes de maquinaria, etc.



Para que la anomalía se clasifique como prioridad 3 debe cumplirse:

$$0.55FS + 0.5 < RP \leq 1.1 \text{ o } 1 \text{ año} < TVR \leq 5 \text{ años o } 1.2 < RS \leq 1.5$$

Prioridad 4

Anomalía con severidad leve, riesgo posible si no se realiza la reparación recomendada; la reparación se efectúa con la intención de restablecer la resistencia de diseño y la vida útil del ducto.

Para que la anomalía esté clasificada como tipo 4 debe cumplirse lo siguiente:

$$RP > 1.1 \text{ Y } PMPO < PD \text{ o } 5 \text{ años} < TVR \leq 10 \text{ años o } RS > 1.5 \text{ y } 0.9 SMP_{vm} < S_{vm}$$

Prioridad 5

Anomalía no severa, riesgo dentro de lo permisible por el factor de seguridad. El criterio a seguir para definir si una anomalía es prioridad 5 es que las condiciones de RP, TVR y RS deben ser superiores a lo establecido para la prioridad 4.

2.6. Métodos de Análisis de Integridad.

Para efectuar el análisis de integridad a ductos, existen 2 metodologías; el método Probabilístico y el Determinístico, este último puede ser muestral con base en los resultados de inspección con equipo instrumentado.

2.6.1. Análisis Probabilístico.

La complejidad en el acceso físico a una línea que se encuentra sumergida en cruce de arroyo o río, provoca que sea muy difícil verificar su estado, de manera que no se tenga una certeza de los datos necesarios para un Análisis de Integridad, como son: espesores, propiedades de materiales, dimensiones de defectos, etc.; estas incertidumbres pueden ser manejadas mediante un análisis probabilístico que permita tomar decisiones dentro de un nivel de seguridad o confiabilidad adecuado.



2.6.2. Análisis Determinístico.

El análisis Determinístico parte de los resultados de inspección no destructiva ya sea con equipo instrumentado de inspección interna o de tipo muestral. El análisis de integridad consiste en: Evaluación de la severidad de los defectos presentes, cálculo de la presión máxima permisible de operación, predicción de vida útil y emitir recomendaciones de reparación.

Los modos de esfuerzos son identificados de los reportes de inspección o de cálculos teóricos o de simuladores para líneas no inspeccionables, por las condiciones obtenidas se realiza el Análisis Determinístico para este caso de estudio.

2.7. Análisis de Integridad de Líneas no Inspeccionables con Equipo Instrumentado (Muestral).

Para conocer el estado de un ducto, que por razones que sean, no se puede inspeccionar con equipo instrumentado, se propone realizar una inspección de carácter muestral, es decir; seleccionado un número de tramos del ducto que conformen una muestra representativa del estado general de la tubería y que permitan, sin necesidad de inspeccionar al 100% la totalidad de la tubería, inferir su estado de integridad estructural con un nivel de confianza de al menos el 96%. Con una inspección de tipo muestral, se puede tener una evaluación confiable de un ducto si consideramos los siguientes aspectos.

- Debe ser posible la inspección por el lado externo de la tubería, mediante técnicas y procedimientos que garanticen la detección de cualquier defecto interno o externo contenido en la pared del tubo.
- La inspección muestral busca la predicción del estado de una tubería con base en el estado de una muestra de tamaño limitado, que es estadísticamente confiable.

Si bien es cierto que en la inspección muestral no se revisa el 100% del ducto, sus procedimientos proporcionan la suficiente información para determinar la posibilidad de que existan daños severos no detectados en el tubo, así como para establecer las condiciones de operación que garanticen con el nivel de confianza aplicado al análisis, la operación segura del ducto.

Este tipo de análisis parte de los resultados de inspección no destructiva, mediante las técnicas visuales, líquidos penetrantes y por ultrasonido, que incluye inspección del cuerpo del tubo, costura longitudinal y uniones soldadas, para posteriormente realizar el análisis de integridad de los tramos



inspeccionados evaluando la severidad de defectos encontrados y recomendar técnicas de reparación si es necesario con base en el:

- Cálculo de la Presión Máxima Permisible de Operación, considerando su estado actual, durante el avance de los trabajos de reparación y una vez concluido el programa de reparaciones establecido.
- Predicción de vida remanente.

2.8. Técnicas de Inspección.

Las técnicas de ensayo no destructivo que se usaran para la inspección son las siguientes:

- Inspección visual (IV)
- Ultrasonido (UT)
- Líquidos penetrantes (LP)
- Rayos X

La inspección deberá incluir un reporte de:

- a) Estado de la superficie del tubo,
- b) Condiciones del terreno,
- c) Localización de costuras,
- d) Otros defectos,
- e) Daño físico,
- f) Deformación,
- g) Curvatura del tramo, etc.

Cada reporte debe contener la siguiente información:

- Distancia absoluta del tubo inspeccionado.
- Diámetro, espesor medio y longitud del tramo inspeccionado.
- Esquema del tramo del ducto con la ubicación del defecto.
- Identificación y dimensiones de indicaciones.
- Localización de costuras.



2.9. Análisis de Flexibilidad.

El análisis de flexibilidad es un método que consiste en la determinación del estado de esfuerzos y deformaciones en un ducto bajo la acción de una o mas cargas. Da las bases para el diseño de una nueva línea, ya sea superficial o enterrada; así mismo, permite determinar el estado de esfuerzos en una tubería existente.

Los sistemas de tubería tienen la suficiente flexibilidad para prevenir la expansión o contracción térmica o movimientos de los soportes, los cuales puedan causar:

- Identificación de los modos de falla.
- Definición de la función de estado límite.
- Medición de incertidumbres de las variables aleatorias.
- Cálculo de la probabilidad de falla.
- Determinación de los niveles de confiabilidad.
- Calibración de factores de seguridad.
- Evaluación de resultados.

Así mismo se puede utilizar para:

- Evaluación de soportaría.
- Cambios de trazo y perfil en línea regular.
- Cambios de trazo y perfil en instalaciones.
- Cambios en condiciones de operación.
- Evaluación de grado de severidad bajo cargas ocasionales como: vientos, sobrepresiones, desplazamientos inducidos.

Si la expansión no es absorbida por la compresión axial directa del tubo, la flexión debe prevenirse por medio de uso de curvas, loops o contrapesos, así mismo, se debe construir sistemas para absorber las dilataciones térmicas por medio de juntas de expansión, juntas deslizables o juntas de bola. Si la junta de expansión, anclas o ataduras son usadas con suficiente fuerza y rigidez deben ser instaladas para proveer resistencia a las fuerzas máximas de presión, fluido y las ocasionales utilizadas dentro del análisis.



Para realizar un análisis de flexibilidad se aplica la siguiente metodología:

- a) Inicialmente se determina si se trata de un diseño para una línea nueva o es una línea existente, pudiendo ocurrir en estas últimas cambios en su diseño original por causas externas como deslaves, inundaciones, sismos, etc., o desplazamientos significativos por cambios en las condiciones de operación como incremento de volumen de producción, presión, temperatura, etc.
- b) Posteriormente se clasifica a la línea con base a su localización geográfica, pudiéndose tratar de líneas superficiales, enterradas o tubería sumergida, las cuales tienen características propias influenciadas por el medio externo sobre el que se desarrollan.
- c) El siguiente paso es determinar el tipo de servicio que tiene la línea, esta clasificación se realiza con base en el tipo de producto transportado así como por su localización, dividiéndose principalmente en Oleoductos, Gasoductos y Acueductos ^[2.4].

Las tuberías localizadas en plantas de proceso pueden comprender tanto gasoductos como oleoductos sin distinción, siempre y cuando se encuentren dentro de los límites de la planta, aplicándose factores de seguridad mayores a los comprendidos en línea regular. Línea regular es un sistema de ductos empleados para la conducción de hidrocarburos, líquidos o gaseosos de una instalación a otra.

Definido el tipo de servicio se puede establecer las normas y códigos que se van a utilizar, siendo estos los principales; la Norma CID-NOR- NSI-0001/98^[2.2.1], Código ASME B 31.1^[2.3.1], B 31.4^[2.4.1] y NRF-030-PEMEX-2006 ^[2.5].

Dentro de los códigos mencionados anteriormente se establecen los requerimientos de diseño, los cuales indican todas las características que debe poseer el sistema de transporte para trabajar de manera segura y eficiente. Una vez realizado esto se prosigue con la recopilación de toda la información necesaria para hacer las bases de diseño del análisis de flexibilidad, esta información consiste en:

Levantamiento topográfico, mediante el cual se realiza el dimensionamiento del sistema de tuberías, midiendo las elevaciones y cambios de dirección respectivamente. Dentro del levantamiento topográfico, se dimensionan además de la tubería, el tipo y cantidad de soportes, para considerarlos en el análisis; de igual manera se verifica que estén funcionando correctamente (que este soportando) y el tipo de protección mecánica que hay entre ducto y soporte, la cual generalmente consiste de una resina de poliuretano de alta densidad.



En el caso de tubería superficial se hace un dimensionamiento para cada tramo de tubería y se toma la especificación de todos los elementos que contiene el arreglo, denominando elemento a todos los codos, tees, válvulas, bridas, etc., que comprenden el arreglo de tubería.

Otra de las bases de diseño necesarias para el análisis comprende las condiciones de operación, la geometría y características mecánicas del material, el tipo de suelo para el caso de tubería enterrada, así como su localización geográfica.

Con toda la información recopilada se procede al cálculo de esfuerzos y deformaciones, estos pueden efectuarse a través de las fórmulas establecidas en la normatividad, sin embargo, solo aplican para problemas sencillos de cargas estáticas, ya que su grado de dificultad se incrementa al considerarse más elementos o cargas dinámicas; los cálculos antes referidos también pueden realizarse a través de los programas de computo especiales que reducen el tiempo de análisis. Uno de las técnicas mas usadas para el análisis de flexibilidad es el Método del Elemento Finito (MEF), el cual debido al desarrollo comercial de las computadoras es el mayormente utilizado.

Una vez determinado el campo de esfuerzos se comparan con los esfuerzos permisibles establecidos en el código empleado y en caso de rebasar estos límites permisibles se emiten las recomendaciones necesarias para disminuir los esfuerzos o en su caso retirar la pieza.

Generalmente los resultados se muestran a través campos de colores, que establecen la distribución de esfuerzo en el sistema, a cada color le corresponde un rango, indicando que en esa zona se tienen valores dentro del rango.

2.10. Obtención del TVR (Tiempo de Vida Remanente).

Del kilómetro 1 + 624.7 al 1 + 625.7 en el punto más significativo se tiene una velocidad de corrosión (V_c) de 0.00946 in/año ó 0.020284 cm/año, dándonos un resultado de tiempo de vida remanente de 23 años, el cual se obtuvo por medio de la siguiente ecuación 2.3

$$V_c = \frac{\text{Espesor Nominal (Ducto)} - \text{perdida de metal } \left[\frac{d}{t}\right]}{\text{Tiempo de servicio}} \quad 2.4$$

Donde:



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



Espesor Nominal (Ducto) = 0.500 pulg. = 0.500 * 2.54 = 1.27 cm.

Tiempo de servicio = 34 años.

Y la pérdida de metal [d/t] tomada en campo para este punto = 0.1785 pulg.

[d/t] 0.1785 * 2.54 = 0.45339 cm.

Por tanto, sustituyendo valores:

$$V_c = \frac{0.500 \text{ pulg.} - 0.1785 \text{ pulg.}}{34 \text{ años}} = 0.00945 \text{ pulg./año} = 0.00945 * 2.54 = 0.02401 \text{ cm./año}$$

Con este resultado, se obtiene el Tiempo de Vida Remanente (TVR), ecuación 2.4.

$$TVR = \frac{(0.8)(\text{Espesor Nominal}) - \text{pérdida de metal } \left[\frac{d}{t}\right]}{\text{Velocidad de corrosión}} \quad 2.4$$

Donde:

Espesor Nominal = 80% de pérdida permisible (0.80).

Pérdida de metal = [d/t] obtenida en campo, en cada punto.

Velocidad de corrosión = V_c (resuelta de la ecuación 1, en cada punto).

Sustituyendo los datos en cada punto tenemos que:

$$TVR = \frac{(0.8 \times 0.500 \text{ pulg.}) - 0.1785 \text{ pulg.}}{0.00946 \text{ pulg./año}} = \frac{0.40 \text{ pulg.} - 0.1785 \text{ pulg.}}{0.00946 \text{ pulg./año}}$$

$$TVR = \frac{0.2215 \text{ pulg.}}{0.00946 \text{ pulg./año}} = 23.41 \text{ años.}$$



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Tenemos como resultado general que el gasoducto de 24" (60.96 cm) \emptyset de San Andrés a Poza Rica tiene una vida de tiempo remanente en su punto más crítico de 19 años, menos 9 años del factor de seguridad dándonos sólo 10 años a una presión máxima permisible de operación de 124 kg/cm².

2.11. Sumario.

Para la solución del Método del Elemento Finito, el cual se verá con mayor detalle en los siguientes capítulos; es necesario conocer los estudios del Método de Análisis de Integridad, los cuales se abordan en este capítulo para un mayor discernimiento de los resultados obtenidos en esta tesis.



2.11. Referencias.

- 2.1. NMX-B-482-1991, Capacitación, Calificación y Certificación de Personal de Ensayos No Destructivos (*Training Qualification and Certification of NonDestructive Testing Personnel*), 1991
- 2.2. ASNT SNT-TC-1^a Ed. 2006, Recommended Practice for Nondestructive Testing Personnel Qualification and Certification (Práctica Recomendada para Calificación y certificación del Personal para Pruebas No Destructivas).
- 2.3. ASME B31.G. Manual for Determining the Remaining Strength of Corroded Pipelines, 1991. (Manual para determinar el esfuerzo remanente de ductos con corrosión). 1991.
- 2.4. Norma CID-NOR-N-SI-0001, “Requisitos Mínimos de Seguridad para el Diseño, Construcción, Operación, Mantenimiento e Inspección de Ductos de Transporte”, Grupo de Normatividad, Rev.0, Agosto 1998.
- 2.5. Código ASME B31.1, Codes for Pressure Piping, 1989, (Código para líneas de producción). 1989.
- 2.6. Código ASME B31.4, Liquid Transportation Systems for Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia, and Alcohols. 2002. (Sistemas de transporte de hidrocarburos líquidos, gas L:P:, amonia y alcoholes). 2002.
- 2.7. NRF-030-PEMEX-2006, Diseño, Construcción, Inspección y Mantenimiento de Ductos Terrestres para Transporte y Recolección de Hidrocarburos



API 5L-1995 : Specification for Line Pipe



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



-
- NRF-026-PEMEX-2001 Protección Con Recubrimientos Anticorrosivos para Tuberías Enterradas y/o Sumergidas.
 - NRF-096-PEMEX-2004 Conexiones y Accesorios para Ductos de Recolección y Transporte de Hidrocarburos



CAPÍTULO 3

ESTUDIO HIDRÁULICO.

En este capítulo se realiza el estudio hidráulico de arroyo "El Mollejón", de la precipitación pluvial en los meses más críticos, así como también; la obtención del gasto máximo a través de esta sección del arroyo. Posteriormente se ven las generalidades Método del Elemento Finito aplicado a Ductos.



3.1. Introducción.

En la gran mayoría de los ductos subterráneos y submarinos, que trasladan enormes cantidades de hidrocarburos, gases y agua; indispensables para industrias relacionadas a la energía, se suscitan anomalías tales como abolladuras, corrosión, arrugas, pliegues, ovalamientos y rupturas que producen fugas, debidas principalmente a la actividad sísmica o la erosión ^[3.1], además, la mayor parte de las tuberías fueron colocadas desde hace muchos años.

En este capítulo se realizará el estudio de la Hidrografía en la Zona III; RH 27 que comprende la Región Noroeste del estado de Veracruz; para poder cuantificar la cantidad real de agua en tiempo normal, así como; la época de lluvia que cae en la Ciudad de Poza Rica, en estos últimos años; para la determinación del cálculo de la cantidad de agua que transporta el arroyo “El Mollejón” en el momento más crítico y determinar así el caudal (Gasto) que ejerce esta cantidad de líquido sobre la línea en estudio.

3.2. Hidrografía:

La zona que comprende el área de estudio se ubica dentro de la región hidrológica RH27 conocida como “Tuxpan-Nautla”, la cual ocupa la porción noroeste del territorio veracruzano y esta integrada por las cuencas de los ríos Nautla, Tecolutla, Cazones y Tuxpan, además de la Laguna de Tamiahua.

El arroyo “El Mollejón” se localiza en la región hidrológica RH27; figura 3.1.; pertenece a la cuenca hidrográfica del Río Cazones, dicho arroyo se ubica en las inmediaciones de la localidad de Poza Rica, es afluente de este río; su cuenca tiene una extensión aproximada al punto de cruce de 7.028 km², y tiene una longitud de cauce principal aproximada de 5.655 km con una pendiente promedio de 1.498 % ^[3.2].



Figura 3.1. Vista aérea general de la ciudad de Poza Rica, marcando la Ubicación en la parcela 14, lote 3, fracción 24.

3.3. Precipitación Máxima.

De la información obtenida en la Comisión Nacional del Agua, se determinó por medios estadísticos la altura de precipitación de diseño para estructuras en corrientes libres, de $T_r = 100$ años; dando como resultado la tabla 3.1; donde observamos las precipitaciones máximas y mínimas mensuales en cada año, de los cuales; los números marcados, son las cantidades máximas de precipitación, las celdas en blanco son los meses que no se contó con lluvia y al final se obtienen los totales por cada año y el promedio por cada mes ^[3.3], todo esto correspondiente a las lluvias acumuladas en 24 Hrs. en la estación meteorológica de la ciudad de Poza Rica.



Conforme a las normas de diseño hidráulicas establecidas para este tipo de obras; se observa que los resultados obtenidos por el método Gumbel, en este período de retorno, se aproximan al *promedio* alcanzado. De donde la lluvia máxima puntual se calcula con la siguiente formula (3.1):

$$Xp = Pm - \frac{Xn}{\delta} \left(Sx - \ln \ln \left(\frac{100}{100-1} \right) \right) \quad 3.1$$

Sustituyendo valores en la ecuación se tiene que:

$$Xp = 107.222 - \frac{52.99}{1.1313} \left(0.541 - \ln \ln \frac{100}{100-1} \right) = 297.43mm \quad 3.1$$

3.4. Gasto Máximo.

La metodología utilizada en la determinación del gasto máximo ordinario corresponde a la aplicación de los métodos: Racional Básico ^[3.8], Ven Te Chow ^[3.9] e Hidrograma Triangular Unitario ^[3.10].

3.5. Características Fisiográficas de superficie drenada.

Con apoyo en las cartas topográficas del INEGI se determinó, el área de la cuenca Ac, la Longitud de la Corriente Principal, así como la Pendiente del arroyo; por el método Taylor – Schwartz ^[3.11], Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Uso y tipo de suelo.

USO (CONDICIONES DE APERTURA)	TIPO DE SUELO				
	A	B	C	D	Resultado
Caminos de tierra (5 %)	-	82	-	-	4.10
Bosques naturales muy ralo (50 %)	-	82	-	-	41.00
Potrero (10 %)	-	79	-	-	7.90
Pastizales (35 %)	-	82	-	-	28.70
Número de escurrimiento "N"					<u>81.70</u>



3.6. Método Racional Básico.

La lluvia media para la cuenca se determina con la fórmula (3.):

$$X_{mc} = \left[\frac{297.43}{2.71830^{(0.0284)(7.0)} 10.54} \right] = 295.20mm \quad 3.2$$

El tiempo de concentración T_c en horas, se determina con los siguientes métodos:
De Kirpich/Rowe^[3,12]:

$$T_c = 0.0003245 \left[\frac{L}{S^{0.385}} \right]^{0.77} \quad 3.3$$

Donde:

L: Longitud del cause principal (m),

S: Pendiente promedio (mm)

Sustituyendo valores:

$$T_c = 0.0003245 \left[\frac{5655}{0.01498^{0.385}} \right]^{0.77} = 1.27h \quad 3.3$$

De Ven Te Chow (según cuencas mayores a 250 km² o cuencas grandes) tenemos la ecuación 3.4.

$$t_{ck} = 0.005 \left[\frac{5655}{\sqrt{1.498}} \right]^{0.64} = 1.11h \quad 3.4$$

Resultados de los tiempos de concentración tabla 3.2:

Tabla 3.2

Kirpich en h	Chow en h
1.27	1.11



Dado que el tiempo de concentración es menor a 24h., la lluvia correspondiente a este valor del tiempo; se determina con la siguiente fórmula, para lo cual el valor empleado de $e = 0.65$

Con el valor K ecuación (3.5) podemos establecer el valor de la precipitación media acumulada (X_a) ecuación (3.6) en el tiempo T_c mediante la fórmula 3.7:

$$K = \frac{(1-e)Pmc}{24^{(1-e)}} \quad 3.5$$

$$K = \frac{(1-(0.62))(295.20)}{24^{(1-0.65)}} = 33.97 \quad 3.5$$

$$X_a = \frac{K \times Tc^{(1-e)}}{(1-e)} = \frac{33.97 \times 1.0873^{0.35}}{0.35} = 105.53mm \quad 3.6$$

$$X_a = \frac{33.97 \times 1.27^{0.35}}{0.35} = 105.53mm \quad 3.7$$

Calculando la pérdida por evaporación (en mm), con la ecuación 3.8:

$$Y = (Y_e)(T_c) = (0.1375) (1.27) = 0.17mm \quad 3.8$$

Calculando la pérdida por infiltración Z_1 (en mm), con la ecuación 3.9 y 3.10:

$$K = \frac{1-U(24)}{24^{1-U}} \quad 3.9$$

$$Z_1 = \frac{(239)(T_c)^{1-U}}{1-U} \quad 3.10$$

Sustituyendo:

$$K = \frac{1-(0.40)(24)}{24^{1-0.40}} = 2.13 \quad 3.9$$

$$Z_1 = \frac{(239)(1.27)^{1-0.40}}{1-0.40} = 4.11 \quad 3.10$$



$$C_R = \left[1 - \frac{(Y+Zj)}{X_a} \right] (1 - m) \quad 3.11$$

Sustituyendo valores:

$$C_R = \left[1 - \frac{(0.17+4.11)}{105.53} \right] (1 - 0.20) = 0.8266 \quad 3.11$$

La precipitación en exceso, o de escurrimiento se obtiene mediante la ecuación 3.12.

$$P_e = 10 \left[\frac{\left(\frac{105.53}{10} - \frac{508}{82} + 5.08 \right)^2}{\left(\frac{105.53}{10} + \frac{2032}{82} - 20.32 \right)} \right] = 59.329mm \quad 3.12$$

El coeficiente de escurrimiento es.

$$C_E = \frac{P_e}{X_a} \quad 3.13$$

Sustituyendo los datos correspondientes tenemos la siguiente expresión,

$$C_E = \frac{59.329}{105.53} = 0.562mm \quad 3.13$$

El coeficiente de escurrimiento normalmente se determina como el promedio obtenido en ambos métodos, así que:

$$C = \frac{(C_E + C_R)}{2} = \frac{(0.562 + 0.8328)}{2} = \frac{(1.395)}{2} = 0.6975 mm$$

Pero en éste caso, por ser una cuenca pequeña para la cual el Método Racional Básico no es muy confiable, se optará por emplear el coeficiente de escurrimiento calculado con la precipitación en exceso:

$$C = 0.69 mm$$

Y aplicando el valor de 1.5 según las condiciones de la cuenca, el cual es tomado de la tabla 3.3:



Tabla 3.3. Tipos de curvas ^[3,13].

Tipo de curva	Valores de	Recomendaciones para su uso.
Parábola	1.50	Para cuencas que por las condiciones de cauce y cubierta vegetal es de esperarse un efecto atenuador sobre el pico de la creciente
Triángulo Isósceles y Coseno	2.00	Cuenca en condiciones normales del cauce y cubierta vegetal, sin zonas de inundación.
Probabilidad	2.40	Cuencas pequeñas de escasa vegetación, impermeable, cauce profundo y sin zonas de inundación.

Tenemos que el gasto máximo ordinario aplicando la fórmula del Método Racional Básico (3.14) es.

$$Q_{Max} = \frac{\sigma C A_c X_a}{7.2 T_c} \quad 3.14$$

$$Q_{Max} = \frac{(1.59)(0.69)(7.028)(105.53)}{7.2 (1.27)} = 83.94 \frac{m^3}{s} \quad 3.14$$

Si se considera un período de retorno de 100 años; el gasto de Q = 59.68 m³/s

3.7. Método de Ven Te Chow.

La precipitación en exceso determinada es: P_e = 59.33mm

El tiempo de retraso es (en cuencas pequeñas, igual a t_c):

$$t_c = 1.27 \text{ hrs}; \quad r = 1.27 \text{ hrs.}$$

El tiempo pico de t_p se obtiene por la ecuación 3.15.

$$t_p = t_c^{1/2} + 0.6 t_c \quad 3.15$$

$$t_p = (1.27)^{1/2} + (0.6 \times 1.27) = 1.1269 + 0.762$$



$$t_p = 1.72 \text{ h}$$

La duración de escurrimiento directo se obtiene de la ecuación 3.16.:

$$d_e = 2(t_c)^{1/2} \tag{3.16}$$

$$d_e = 2(1.27)^{1/2} = 2(1.1269) = 2.2539 \text{ hrs.}$$

El tiempo base del escurrimiento t_b se obtiene de la ecuación 3.17:

$$t_b = d_e * t_p \tag{3.17}$$

$$t_b = 2.2539 \times 1.889 = \underline{4.2573 \text{ hrs.}}$$

Tabla 3.4. Relación de Tiempos

Tiempo de concentración t_c	Tiempo de retraso t_r (en cuencas pequeñas es igual a t_c)	Tiempo pico t_p	Tiempo de duración d	La relación d_e/t_r	El factor de reducción Z
1.27	1.279	1.72	2.105	1.90	0.98

Finalmente el gasto máximo ordinario de diseño aplicando la fórmula del Método de Ven Te Chow es:

$$Q_p = \frac{0.278 P_e A_c Z}{d_e} \tag{3.18}$$

Donde; $P_e = 59.329 \text{ mm}$, $A_c = 7.028 \text{ km}^2$, $Z = 0.98$ y $d_e = 2.2539 \text{ hrs.}$

Por lo tanto, sustituyendo valores

$$Q_p = \frac{0.278 (59.33)(7.028)(0.98)}{2.253} = 50.400 \frac{m^3}{s}$$



3.8. Método del Hidrograma Triangular Unitario.

El coeficiente de escurrimiento es $C = \frac{P_e}{X_a} = 0.562$ y los intervalos del

Histograma de análisis de la tormenta son de 1.00 hrs., tabla 3.8.

Tabla 3.5. Comparación del Histograma y la lluvia en exceso

	intervalo	Xa	Hietograma	He	Hidrograma
1	0.04	105.53	4.22	59.33	0
2	0.048		5.07		0
3	0.088		9.29		2.75
4	0.222		23.43		16.89
5	0.378		39.89		33.35
6	0.122		12.87		6.34
7	0.057		6.02		0
8	0.045		4.75		0

El gasto máximo ordinario aplicando el Método del Hidrograma Triangular Unitario, como se muestra en la tabla 3.6. y en la figura 3.2.; es de:

$$Q_{max} = 20.77 \text{ m}^3/\text{seg.}$$

Tabla 3.6. Relación del Hidrograma.

Intervalo	K	He	Ac	N	tc	tp	Qp
1	0.556	0.00	7.023	2	1.27	0	0
2	0.556	0.00	7.023	2	1.27	0	0
3	0.556	2.75	7.023	2	1.27	1.135	4.73
4	0.556	16.89	7.023	2	1.27	2.14	15.45
5	0.556	33.35	7.023	2	1.27	3.14	20.77
6	0.556	6.34	7.023	2	1.27	4.14	2.99
7	0.556	0.00	7.023	2	1.27	0	0
8	0.556	0.00	7.023	2	1.27	0	0

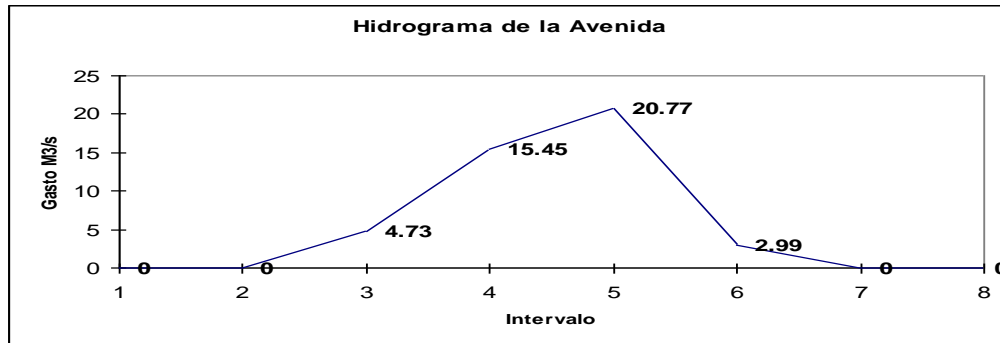


Figura 3.2. Hidrograma real de la lluvia en la Ciudad de Poza Rica.

El valor del gasto unitario es:

$$q_u = 0.556 \left(\frac{A_c}{t_b} \right) \quad 3.19$$

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.19 tenemos la siguiente expresión.

$$q_u = 0.556 \left(\frac{7.028}{4.58} \right) = 0.8532 \frac{\text{km}^2}{h}$$

3.9. Resultados:

En la tabla 3.7 vemos los diferentes resultados de cada método empleado para determinar el gasto o cantidad de agua en metros cúbicos sobre segundo en un período no mayor a 100 años, obteniendo como mayor exponente el Método Racional Básico con 83.94 m³/s.

Tabla 3.7. Resultados de los métodos empleados

METODO EMPLEADO	GASTO DETRAMINADO EN M ³ /S	
	Para TR = 50 años	Para TR = 100 años
Racional básico		83.94
Ven Te Chow		49.56
Hidrograma Unitario Triangular		20.77
Promedio		51.42



Para evitar el efecto erosivo del agua se construirán transiciones de entrada y salida con desplante de dentellones de 1.50m de alto, por debajo del lecho del arroyo, figura 3.3.

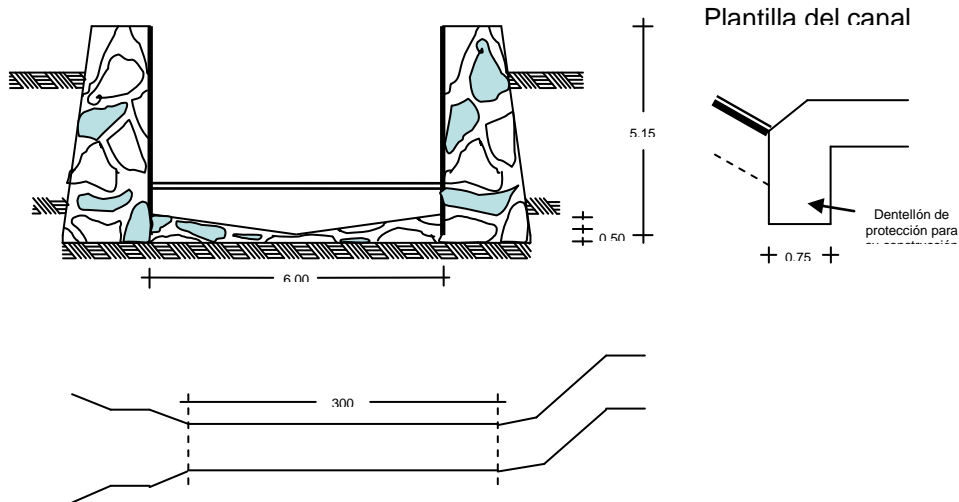


Figura 3.3. Planos del desplante de dentellones

3.10. Determinación de Gastos:

Considerando las normas hidrológicas de la CNA, el período de retorno para el tipo de obra de encauzamiento, le correspondería un Tiempo de Retorno (T_r) de 50 años, sin embargo el comportamiento del arroyo “El Mollejón” es influenciado por las crecientes del río Cazonces; por lo que se utilizará el gasto establecido por el método Hidrograma unitario triangular determinado para 100 años, con la finalidad de quedar dentro de un margen de seguridad aceptable, en los demás cálculos utilizaremos gasto $Q = 51.50 = 52.00 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.11. Análisis Hidráulico.

De la aplicación del modelo matemático Hec Ras^[3.14] se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.8.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Tabla 3.8. Resultados del método matemático empleado.

Ras PLAN: Plan 01 Reach: Arr Mollejón	Q Total	Min Ch El	W. S. Elev.	Crit W. S.	E. G. Elev.	E. G. Slope	Vel. Chanl.	Flow Área	Top Width	Froude # Chnl.
	(m ³ /s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m/m)	(m/s)	(m ²)	(m)	
11	52.0 0	88.2 5	90.94	-	91.04	0.00108 0	1.52	40.74	23.00	0.33
10	52.0 0	88.0 5	90.92	-	90.99	0.00099 9	1.09	47.58	32.00	0.29
9	52.0 0	87.4 0	90.60	-	90.92	0.00384 5	2.51	20.69	7.26	0.48
8	52.0 0	86.1 0	88.12	-	88.91	0.01357 7	3.94	13.19	7.18	0.93
7	52.0 0	86.4 0	88.16	88.1 6	88.49	0.01501 6	2.57	20.27	30.77	1.01
6	52.0 0	86.0 0	87.94	-	88.19	0.00616 6	2.20	23.67	22.84	0.69
5	52.0 0	85.9 0	87.70	87.7 0	88.02	0.01229 3	2.65	22.04	33.62	0.95
4	52.0 0	85.0 0	87.56	-	87.68	0.00340 8	1.56	35.28	40.40	0.51
3	52.0 0	84.9 0	87.24	87.2 4	87.52	0.01936 0	2.61	22.36	38.66	1.10
2	52.0 0	84.2 5	85.99	85.9 9	86.60	0.01228 0	3.47	15.01	12.29	1.00

3.12. Sumario.

Hasta el momento se han obtenido los resultados que arrojan los métodos hidráulicos de las cargas externas que produce el agua en el arroyo “El Mollejón” sobre el acueducto, lo que sigue es tener el conocimiento del Método del Elemento Finito para realizar la simulación como medio de comprobación de las cargas que actúan externa e internamente sobre el Acueducto.



3.13. Referencias.

- 3.1. INEGI, 2006. Síntesis geográfica de Veracruz, México. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática, 113 pp.
- 3.2. Información obtenida de la carta Geográfica Poza Rica F14D65, Escala 1:50,000 "Veracruz", del INEGI.
- 3.3. Comisión Nacional del Agua, "Calculation of Monthly and Annual 30 Year Estándar Normals (WNO-TD/No 341" de la Organización Meteorológica Mundial.
- 3.4. INEGI, 2006. Carta estatal, Regionalización fisiográfica, México D. F. Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática
- 3.5. <http://www.igeograf.unam.mx/instituto/publicaciones/boletin/bol45/b45art1.pdf>
Responsables de la página: María de Lourdes Romo y Mario A. Ortiz Pérez.
Fecha de consulta: Septiembre del 2006.
- 3.6. Ward, R. (1975) "Principles Of Hydrology", McGraw-Hill. Segunda Edición.
- 3.7. Camargo Hernández, G. Y Salazar S. D. 1980. Elementos de Hidráulica para Ingenieros. Ed. ATUACH. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo, México.
- 3.8. French Richard, H. 1992. Hidráulica de Canales Abiertos, Primera Edic. Ed. McGraw-Hill. México, D. F.
- 3.9. Chow, Ven Te. 1959 "Open Channel Hydraulics", McGraw-Hill.
- 3.10. SARH (Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos).1978. Recomendaciones para el Diseño y Revisión de Estructuras para el Control de Avenidas. México, D. F. 296 p.
- 3.11. Torres Coronel, S. 1992. Hidráulica. Primera Edic. Ed. CECOSA, México, D. F.
- 3.12. Sotelo Ávila, G. 1994. Hidráulica General, Vol. 1, Fundamentos. Primera Edic. Ed. LIMUSA-NOREGA EDITORES. México, D. F.
- 3.13. <http://www.geofisica.unam.mx/~cecilia/cursos/Relieve&Topog.pdf>
Responsables de la página: Cecilia Caballero Miranda.
Fecha de consulta: Septiembre del 2006.
- 3.14. King Horace W.; Wisler, Chester O. y Woodburn, James G. 1991. Hidráulica. Primera Edic. en Español. Ed. Trillas. México, D. F.



CAPÍTULO 4

MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO APLICADO A DUCTOS.

En este capítulo se da a conocer las generalidades del Método del Elemento Finito, así como; la reseña histórica y sus fundamentos para el conocimiento de este método en este estudio.

4.1. Generalidades del Método Elemento Finito.



El Método de Elemento Finito es relativamente nuevo, ya que sus inicios fueron en el Año de 1941, donde Hrenikoff^[4.1] presentó una solución de problemas de elasticidad usando el método denominado “frame work”. En 1943, Courant^[4.2] presenta trabajos realizados en interpolaciones lineales basado en subregiones triangulares para modelar problemas de torsión. Después a mediados de los años 50’s Turner^[4.3] desarrolla matrices de rigidez para la solución de problemas de elasticidad en barras y vigas, entre otros elementos. Con grandes logros y siguiendo los pasos de Turner, las Corporaciones MacNeal-Schwendler y Computer Sciences elaboran en la NASA el primer programa de importancia basado en análisis mediante el método del elemento finito, llamado NASTRAN^[4.4] el cual fue empleado en la industria aeroespacial, aunque también tuvo otras aplicaciones en áreas de la ingeniería civil. En el análisis de estructuras. Pero no fue hasta 1960 cuando Clough^[4.5], utilizó por primera vez el término de elemento finito y en 1967 fue publicado el primer libro de elemento finito por Zienkiewicz y Chung^[4.6].

Cuando se produce la llegada de los primeros ordenadores en la década de los 50, el cálculo de estructuras se encontraba en un punto en el que los métodos de cálculo predominantes consistían en técnicas de relajación (métodos de Cross y Kani) que se realizaban de manera manual y por tanto resultaban bastante tediosos. El cálculo de una estructura de edificación de varios pisos, por ejemplo, podía llevar varias semanas, lo cual suponía un costo sustancial de tiempo en detrimento de la posibilidad de invertir este en la optimización de la estructura.

La llegada de la computadora permitió el resurgimiento del método de los desplazamientos ya conocidos en siglos anteriores (Navier, Lagrange, Cauchy), pero que eran difíciles de aplicar dado que al final conducían a la resolución de enormes sistemas de ecuaciones inabordables desde el punto de vista manual.

Se plantea entonces el *cálculo matricial de estructuras*. Éste parte de la discretización de la estructura en elementos lineales tipo barra de los que se conoce su rigidez frente a los desplazamientos de sus nodos. Se plantea entonces un sistema de ecuaciones resultado de aplicar las ecuaciones de equilibrio a los nudos de la estructura. Este sistema de ecuaciones se esquematiza de la siguiente manera:

$$P = k \cdot u \quad (4.1)$$

Donde las incógnitas son los desplazamientos en los nodos (vector u) que se hallan a partir de las fuerzas en los nudos (vector P) y de la rigidez de las barras (matriz de rigidez k). Conocidos dichos desplazamientos es posible determinar los esfuerzos en las barras. *La solución obtenida es exacta.*



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Para la resolución de los sistemas de ecuaciones se potencia el estudio de la adaptabilidad de los algoritmos ya conocidos (Gauss, Cholesky, Crout, Gradiente conjugado, etc). El ahorro de tiempo es sorprendente y con ello el uso del método matricial se extiende. Este desarrollo se hace especialmente notable en estructuras de edificación donde la discretización de los pórticos en barras, es prácticamente inmediata a partir de las vigas y los pilares.

Sin embargo, y a pesar de desarrollarse la modelación de elementos superficiales mediante barras (losas con emparrillados, elementos curvos mediante aproximaciones de elementos rectos, etc.), se plantean grandes dificultades ante estructuras continuas (superficies y volúmenes) y con geometrías complejas. De ahí que sea precisamente dentro del campo aeroespacial donde comienzan a desarrollarse las nuevas técnicas del MEF.

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. Para ello trabaja discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras), que se conectan entre sí mediante "nodos". La solución ahora es sólo aproximada en función de los resultados obtenidos para los nodos. El MEF parte del cálculo matricial en el planteamiento del equilibrio en los nodos mediante un sistema de ecuaciones resultado de la contribución de los elementos.

Dada su generalidad, el método se amplió a otros campos no estructurales como la conducción de calor, la mecánica de fluidos, etc. donde compitió con otros métodos numéricos como el de las diferencias finitas que aún siendo más intuitivos, tenían de nuevo dificultades de planteamiento para geometrías complejas.

Con la llegada de los centros de cálculo y los primeros programas comerciales en los años 60's, el MEF a la vez que se populariza en la industria y refuerza sus bases teóricas en los centros universitarios.

En los años 70's se produce un gran crecimiento de la bibliografía así como la extensión del método a otros problemas como los no lineales. Se estudian nuevos tipos de elementos y se sientan las bases matemáticas rigurosas del método, que había aparecido antes como técnica de la ingeniería que como método numérico de la matemática.

Por último, a partir de la década de los 80's, con la generalización de los ordenadores personales, se extiende el uso de los programas comerciales que se especializan en los diversos campos, instaurándose el uso de pre y post procesadores gráficos que realizan la discretización y la representación gráfica de los



resultados. Se continúa en el estudio de la aplicación del método a nuevos modelos de comportamiento (plasticidad, fractura, daño continuo, etc.) y en el análisis de los errores.

En la actualidad dentro del campo estructural el MEF comparte protagonismo con el método matricial, siendo muchos los programas que mezclan el análisis por ambos métodos, debido sobre todo, a la mayor necesidad de memoria que requiere el análisis por elementos finitos. De esta manera se ha dejado la aplicación del MEF para el análisis de elementos continuos tipo losa, mientras que los pórticos siguen todavía discretizándose en barras y utilizando el método matricial.

Como se puede ver, el Método del Elemento Finito es una herramienta poderosa en la solución de problemas en el área de la ingeniería. Sus aplicaciones tienen un gran campo de trabajo, por ejemplo: en el análisis de esfuerzos y deformaciones de automóviles, aeronaves, edificios y estructuras, al igual que tiene en los campos de estudio en mecánica de fluidos, flujo magnético, pruebas en prototipos y todos ellos con el fin común de llevarlos a un análisis muy preciso y poder obtener soluciones analíticas, que nos brinde información específica y fidedigna.

Con los grandes avances tecnológicos que se han logrado en el área de la computación y sobre todo en los sistemas de Diseño Asistido por Computadora, ahora es relativamente más fácil la modelación de prototipos, en los cuales se puede tener geometrías y superficies complicadas e irregulares, aplicaciones de cargas en forma específica para el estudio preciso de los esfuerzos internos y tener una modelación ajustada a los perfiles y estructuras que se emplean teniendo en consideración ciertas características como el cambio de secciones, estructuras huecas, con pared delgada y con características en secciones transversales muy específicas.

4.2. Metodología para el Análisis de Esfuerzos al Caso de Estudio mediante el Método del Elemento Finito.

El método de elemento finito (MEF) es un método de análisis numérico mediante el cual se pueden obtener soluciones aproximadas de una amplia variedad de problemas de ingeniería. Principalmente donde la complejidad en la geometría, propiedades del material y condiciones de frontera que se presentan en los problemas reales implica que no se pueda o se complique la obtención de una solución cerrada (exacta) del problema en un período de tiempo razonable. Además, actualmente el MEF es un método ampliamente empleado en la solución de problemas de ingeniería ^[4.2].



El procedimiento general para resolver un problema estructural aplicando el método del elemento finito, se puede resumir como se muestra en el diagrama de la figura 4.1^[4.3].

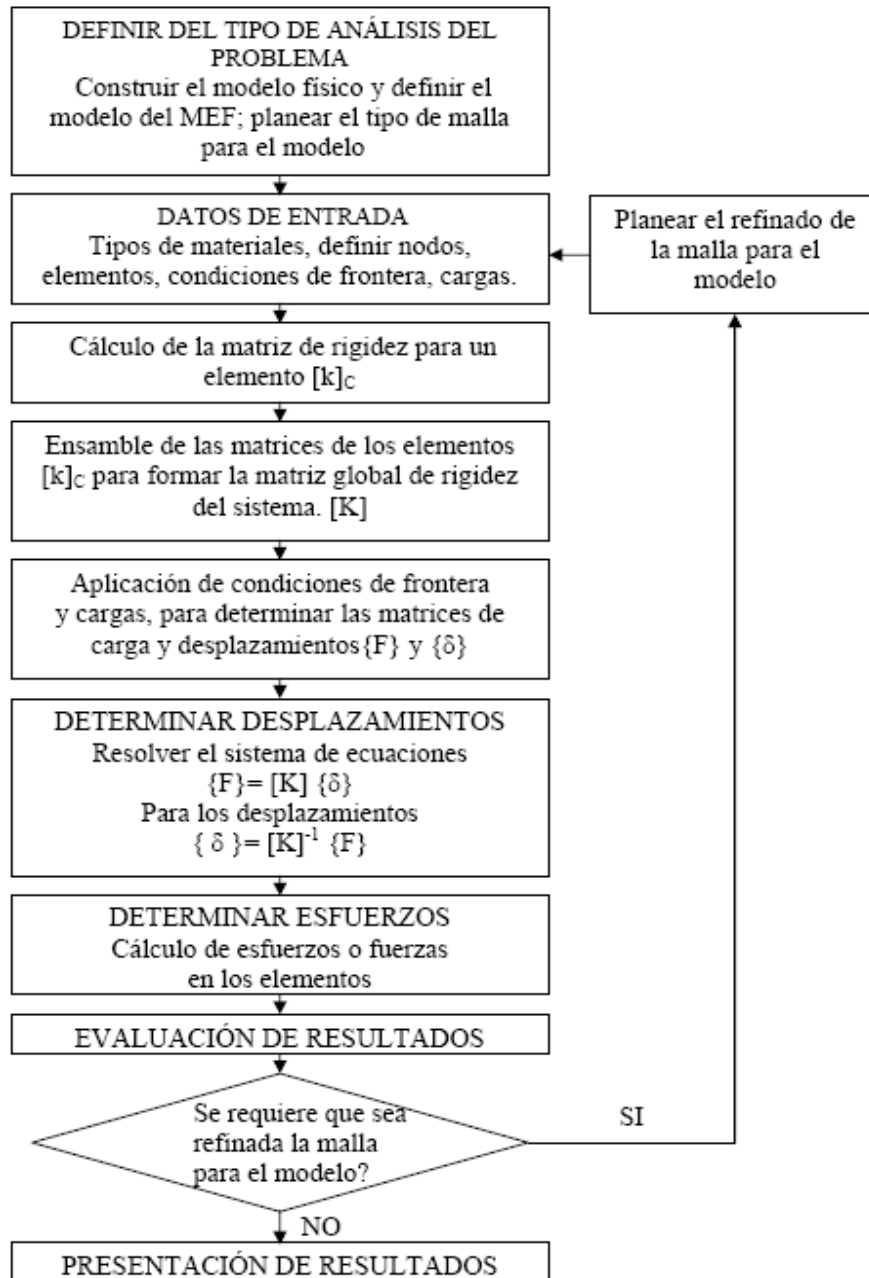


Figura 4.1. Diagrama que muestra el procedimiento para realizar un análisis estructural mediante el MEF.

Por su parte algunos autores ^[4.2, 4.4] plantean que la aproximación del análisis, empleando algunos programas basados en el método elemento finito, se pueden dividir como a continuación se enuncia:



4.2.1. Fase del Preproceso.

- Crear el modelo de la geometría del problema.
- Especificar el tipo de elemento.
- Definir las constantes reales (si son requeridas por el tipo de elemento)
- Definir las propiedades del material.
- Discretizar el dominio en elementos finitos
- Asumir una función de forma o dicho de otra manera buscamos una función que nos represente el comportamiento físico de un elemento.
- Desarrollar las ecuaciones para un elemento.
- Ensamblar los elementos que representan el problema completo.

4.2.2. Fase de Solución.

- Definir el tipo de análisis y las opciones del análisis.
- Aplicar condiciones de frontera, condiciones iniciales y cargas.
- Obtener la solución. Se resuelve el conjunto de ecuaciones algebraicas simultaneas (lineales o no lineales) para obtener los resultados nodales, tales como por ejemplo; desplazamientos o temperaturas para los distintos nodos.

4.2.3. Fase de Postproceso.

- Análisis y validación de resultados. Obtención de información importante o de interés. En este punto generalmente se incluye la visualización gráfica de resultados, despliegue de vectores, formas deformadas y el listado de resultados en forma tabular.

Estos pasos de manera general se pueden resumir en la generación del modelo, solución y análisis y revisión de resultados. A continuación se describen dichos puntos enfocándose al problema de estudio.

4.3. Planeación del modelo.

Para abordar el problema se realizaron dos análisis empleando como herramienta el programa ANSYS.



- Análisis de flujo sobre el ducto. Donde el objetivo son las cargas externas que se presentan sobre el ducto, determinando la presión que se presenta sobre el ducto debido a las distintas velocidades de corriente que se presentan.

- Análisis de esfuerzos. Donde el objetivo es determinar los esfuerzos que se presentan en el ducto debido tanto a la presión interna y externas.

En el caso de ambos análisis, dada la relativa simplicidad, el modelo físico y de elemento finito fue desarrollado directamente en el programa ANSYS. Para lo cual se requirió de información relativa a las dimensiones y condiciones de operación del ducto en cuestión. El modelo fue construido con la técnica conocida como de abajo hacia arriba. Es decir se parte de la creación de keypoints para después crear entidades de mayor jerarquía.

4.4. Generación de modelos en ANSYS.

4.4.1. Flujo sobre el ducto.

Se construyó el modelo físico partiendo de las dimensiones del ducto el cual presenta un diámetro de 0.2540m. Se realizaron las simulaciones considerando la velocidad máxima, promedio y mínima que presenta el flujo de agua sobre el ducto en la obra especial (ver capítulo 3, punto 3.11. Análisis Hidráulico).



VISTA LATERAL

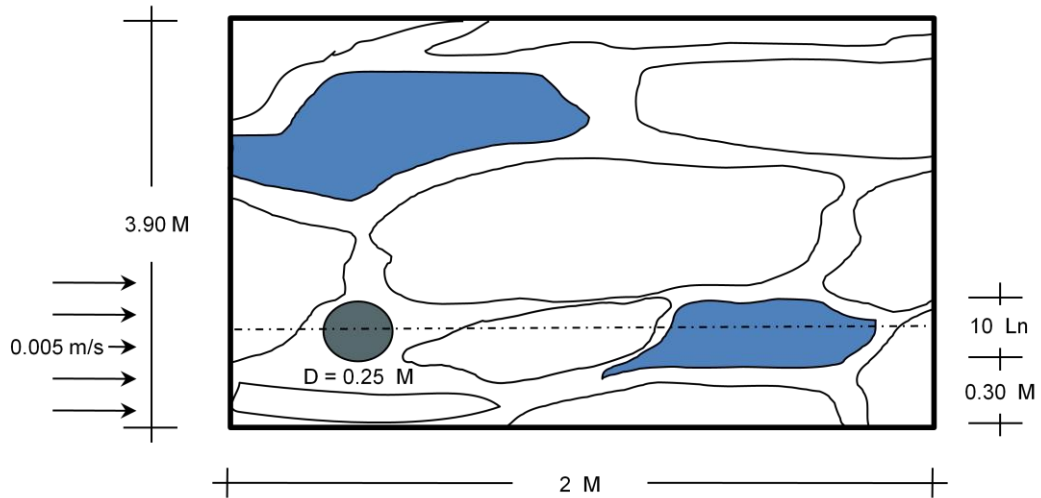


Figura 4.2. Esquema del problema.

Las dimensiones utilizadas para definir el área de flujo son arbitrarias y sirven para establecer las condiciones de frontera del flujo sobre el cilindro.

De tal manera que se procedió a crear dos áreas, una rectangular y una circular. La segunda se restó a la primera mediante operaciones booleanas. De tal manera que se definiera el modelo físico del problema.

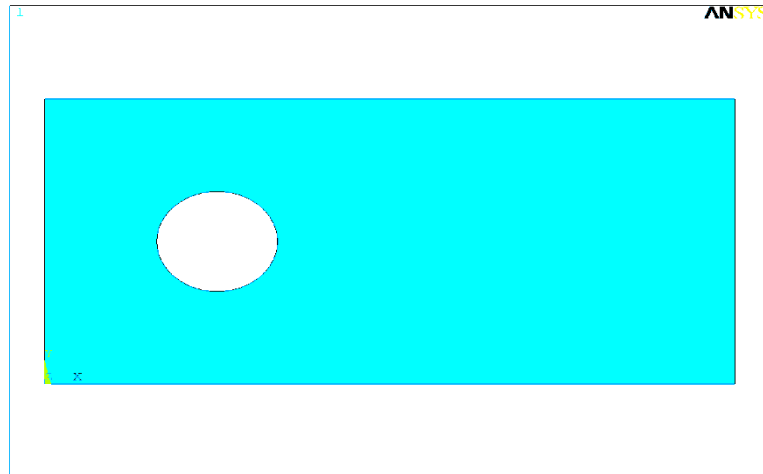


Figura 4.3. Figura modelo físico.



Posteriormente se definió el tipo de elemento a utilizar en la discretización del continuo, para este caso fue utilizado el elemento FLUID141, este se puede utilizar para modelar sistemas fluido/térmico en estados estables o transitorios que involucran regiones que presentan fluidos. Para los elementos CFD FLOTRAN, las velocidades son obtenidas del principio de conservación de momento y la presión es obtenida mediante el principio de conservación de masa.

Con dicho elemento se realizó la discretización del continuo, la cual se realizó mediante la opción de creación de una malla de forma libre, la cual no tiene restricciones en término de las formas de los elementos, y no tiene un patrón específico. Mediante dicho procedimiento fueron generados los elementos. Posteriormente, se asignaron las propiedades del fluido como son la viscosidad y la densidad. Se realizó el análisis de convergencia en los resultados para establecer la convergencia en la solución y por ende el número correcto de elementos a utilizar.

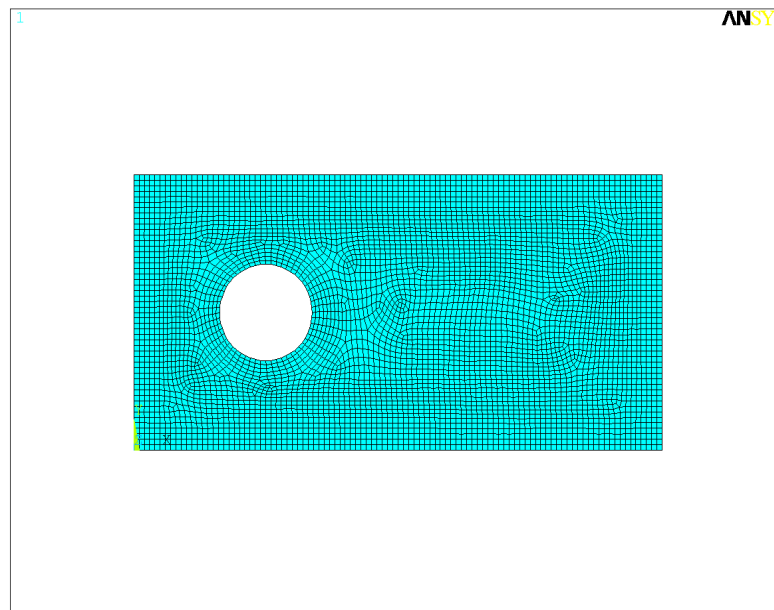


Figura 4.4. Figura modelo discretizado.

Se establecieron las condiciones de frontera, asignando los valores de los campos de velocidad del flujo. A la línea ubicada en el lado izquierdo se asignó el valor correspondiente a la velocidad del fluido. Mientras que al resto de las líneas (incluyendo las que forman el círculo que representa el ducto) se asignó el valor de cero

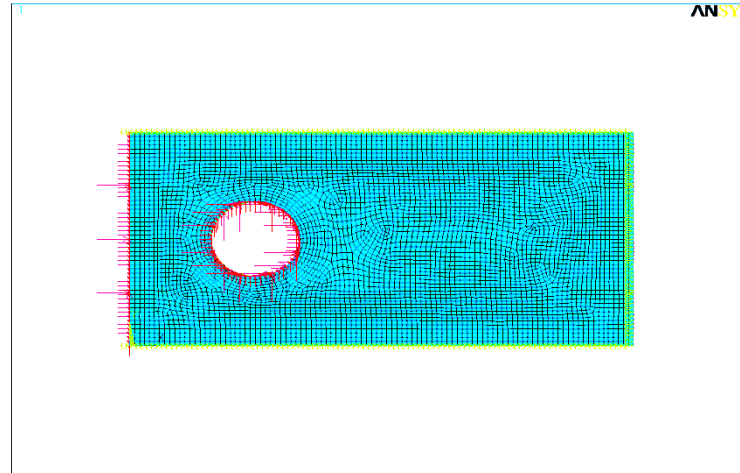


Figura 4.5. Figura condiciones de frontera.

Se realizó la solución con el modulo de FLOTRAN CFD del programa ANSYS. Esta es la herramienta para realizar el análisis computacional de dinámica de fluidos. Es una herramienta con la cual se pueden realizar análisis 2-D y 3D de campos de flujo de fluidos.

Finalmente se realizó el pos procesamiento de la información. Donde el punto medular fue determinar la presión máxima que se presenta debido al paso de fluido sobre el ducto para las velocidades de análisis. En la figura 4.5 se muestra un ejemplo de las simulaciones obtenidas tanto para el perfil de velocidades como el de presiones.

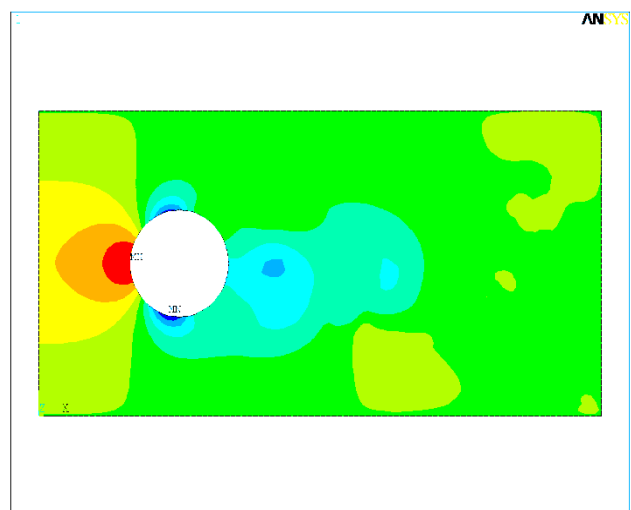
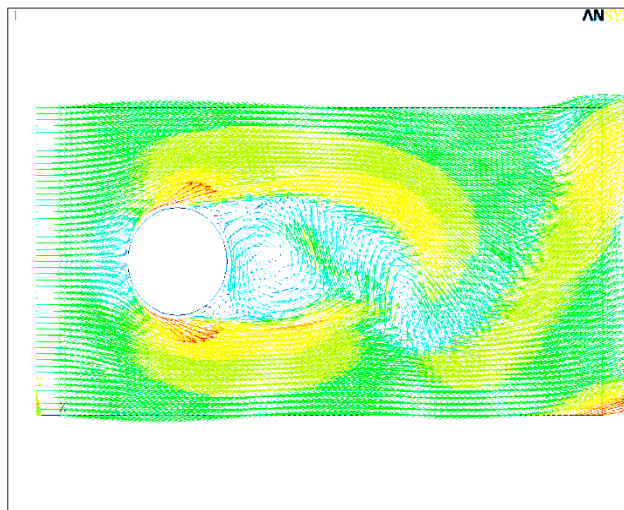


Figura 4.6. Ejemplos a) campo de velocidades y b) campo de presiones



En las simulaciones fueron consideradas tres velocidades máxima 3.94 m/s, promedio 2.51 m/s y mínima 1.09 m/s. Dichas velocidades fueron obtenidas del análisis Hidráulico (ver capítulo 3, tabla 3.8. Análisis Hidráulico).

4.4.2. Esfuerzos sobre el ducto.

Una vez obtenido el valor de la presión que ejerce el fluido sobre el ducto. Se procedió a realizar la simulación considerando la presión que ejerce el fluido sobre el ducto (externa) y la presión de operación (interna). Además, se considera la variación del espesor en tres etapas donde se considera el espesor de diseño, el real (obtenido a través de una corrida de diablo instrumentado) y el de retiro.

Se construyó el modelo físico partiendo de las dimensiones del ducto en la obra especial, (ver capítulo 1, punto 1.3. Características del Acueducto).

El modelo físico se construyó empleando la técnica de abajo hacia arriba. Se partió con la construcción de un círculo definido por un keypoint coincidente con el sistema de coordenadas global y con el centro del ducto. Se construyeron líneas auxiliares, las cuales sirvieron como base para realizar la operación booleana de extrusión. Con dicha operación se generaron las áreas, 24 en total, que constituyeron la geometría final del ducto, es decir el modelo físico del problema.

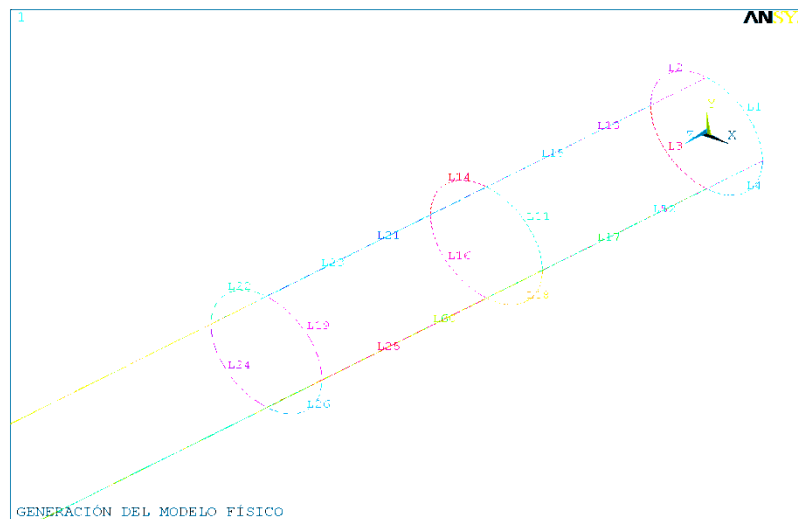


Figura 4.7. Generación del modelo físico

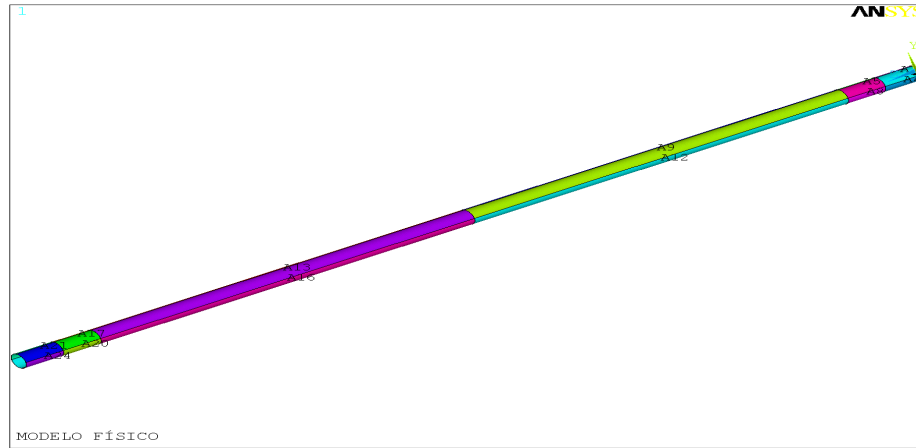


Figura 4.8. Modelo físico del ducto.

Una vez definido el modelo físico del problema se procedió a discretizar el mismo. Para lo cual se utilizó un elemento SHELL 93.

Dicho elemento permitió variar una constante real, la correspondiente al espesor del elemento, para considerar la variación del espesor del ducto.

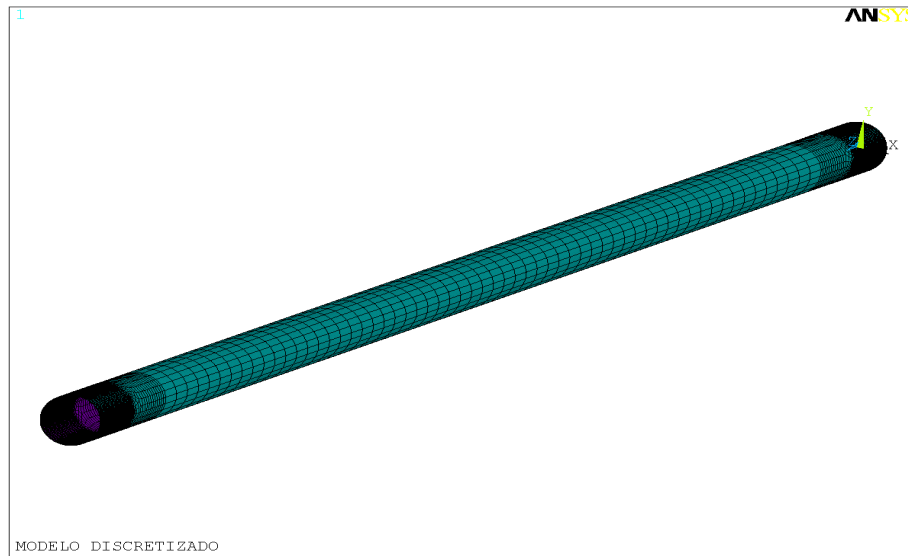


Figura 4.9. Modelo discretizado.

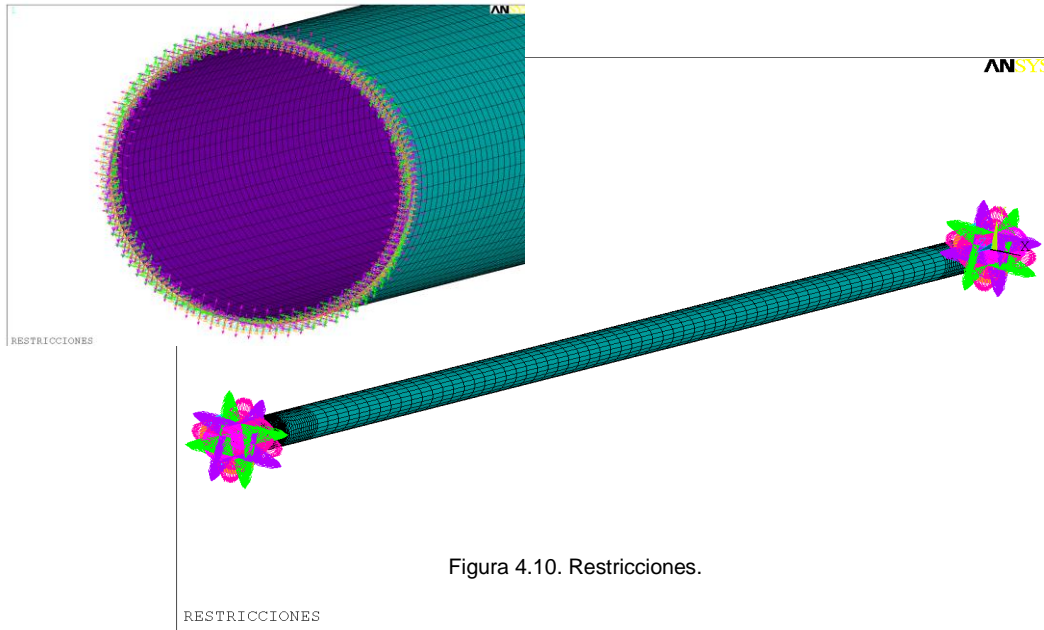


Figura 4.10. Restricciones.

En la figura 4.10 se muestran a manera de ejemplo las presiones aplicadas (internas y externas) como contornos.

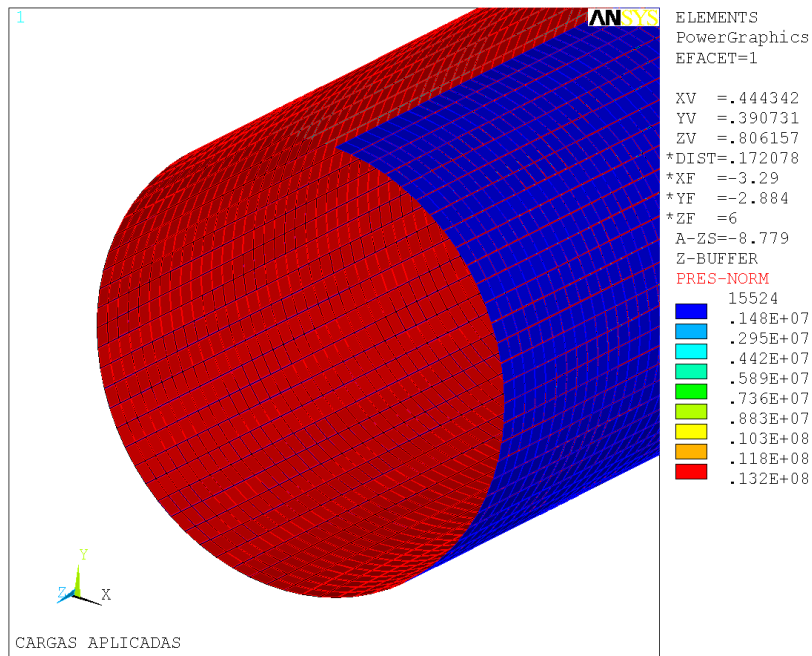
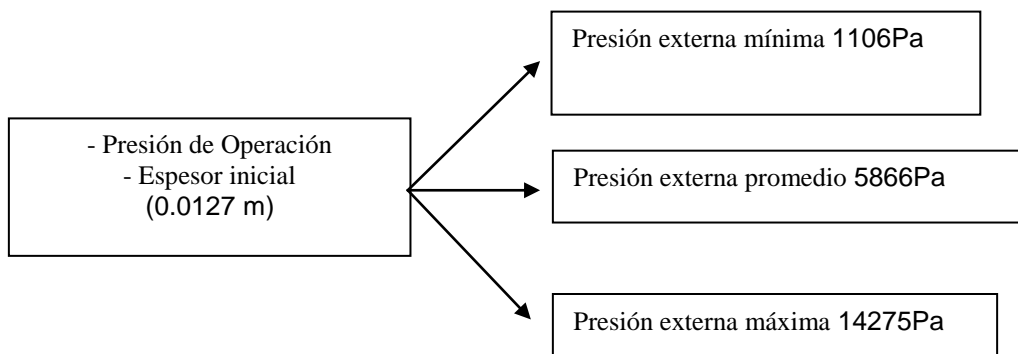


Figura 4.11. Cargas aplicadas.

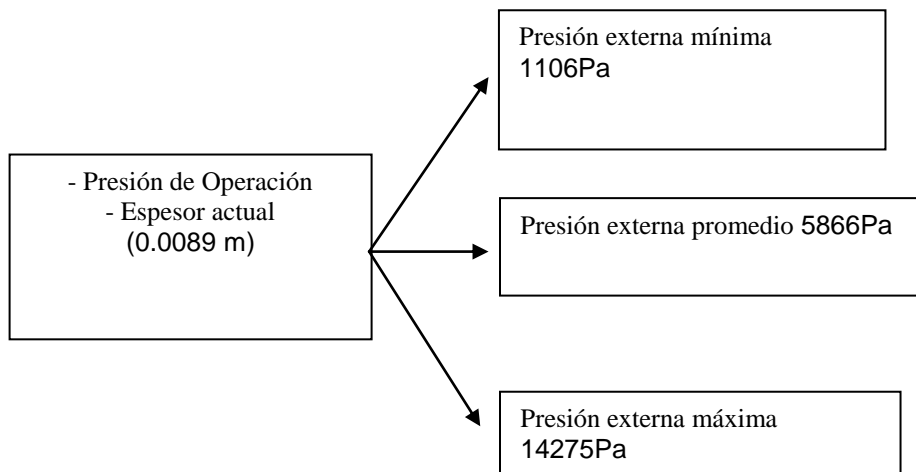


Se realizaron nueve simulaciones las cuales se muestran a continuación. La presión interna (presión de operación) se mantuvo constante. Se consideraron los tres valores de presión obtenidas en el análisis realizado en FLOTRAN. Así mismo, se consideraron tres valores de espesor del ducto (inicial, actual y retiro).

Caso 1



Caso 2





Caso 3

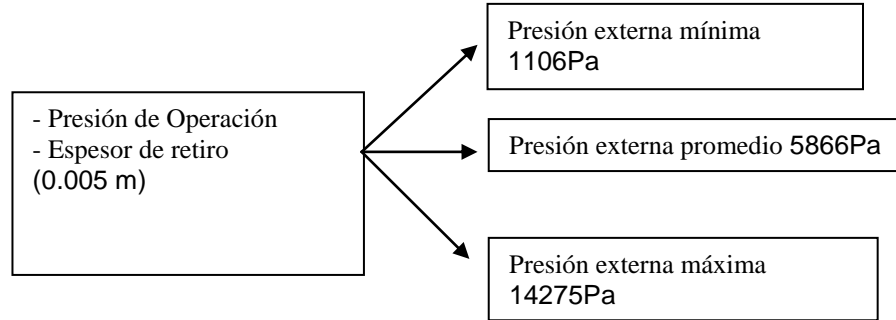


Figura 4.12. Descripción de los análisis realizados

En la figura 4.13 se muestra un ejemplo de los casos analizados.

Figura 4.13 obtención del desplazamiento y de los esfuerzos equivalentes (Von Mises)

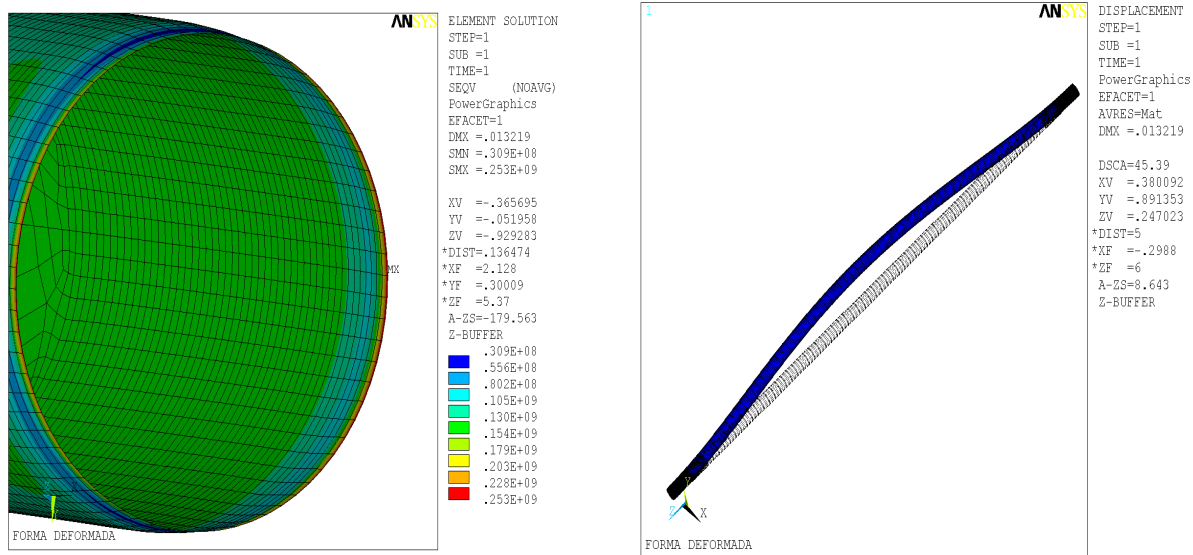


Figura 4.13. Ejemplo de resultados

4.5. Sumario.

Hasta aquí se han elaborado, el mallado del elemento de estudio y el método empleado para solución del problema, así como; la explicación del Método del Elemento Finito; estos elementos son fundamentales para la realización de los resultados que a continuación se obtendrá



4.5. Referencias.

4.1. catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/maldonado_j_r/capitulo2.pdf

Maldonado Jazzán, R. 2004. *Análisis y simulación del impacto frontal y lateral del auto del Proyecto Minibaja*. Tesis Licenciatura. Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica, Escuela de Ingeniería, Universidad de las Américas Puebla. Enero.

Derechos Reservados © 2004, Universidad de las Américas Puebla.

Maldonado Jazzán, Raymundo	Análisis y simulación del impacto frontal y lateral del auto del Proyecto Minibaja	Ingeniería Mecánica	2004 ene
-------------------------------	---	------------------------	-------------

4.2. Zahavi., *"The Finite Element Method in Machine Design"*. Prentice Hall, New Jersey, 1992.

4.3. Timoshenko., *"Resistencia de Materiales"*. Espasa-Calpe, 3ra. edición, Parte I, Pag. 221, Madrid, 1961.

4.4. ASME *"Code for Concrete Reactor Vessels and Containments"*, Sección III, División 2, Enero 1, 1975.



CAPÍTULO 5

CASO DE ESTUDIO.

Inicialmente se propone la metodología a utilizar en este capítulo y se valida con el análisis del Elemento Finito Tridimensional de un ducto sometido a fuerzas internas y externas de presión. El paquete computacional que se va a utilizar es el software ANSYS versión 11, todo esto sobre la base de un análisis estadístico.



5.1 Planteamiento de la Metodología.

El análisis realizado en este trabajo, se enfoca al estudio del comportamiento mecánico de un material compuesto con acero al carbono (barras de acero o placas).

Para realizar este análisis se usa el programa computacional de análisis de Elementos Finitos ANSYS versión 11, cuyo planteamiento metodológico que se propone seguir, se describe a continuación:

1. Se define la geometría de la estructura que se va a analizar, incluyendo las condiciones de cargas externas e internas, así como también las propiedades y las constantes reales de los elementos.
2. Se definen los tipos de elementos a utilizar incluyendo sus constantes reales.
3. Para el primer caso se selecciona arbitrariamente una longitud del ducto en la dirección X, para poder determinar los esfuerzos en el acero, debido a que es necesario para poder modelar el ducto.
4. Se aplican las condiciones de frontera, las cuales simularán los apoyos y condiciones de simetría a que están sujetos los componentes, así como sus respectivas cargas.
5. Se realizará un análisis estático, obteniendo los esfuerzos críticos en el acero al carbono en su parte interna y externa.
6. Se presentarán los resultados de forma entendible, donde quede clara su interpretación mediante gráficas y figuras.
7. El análisis hecho en el Programa de Elemento Finito ANSYS versión 11 de la resistencia del ducto en condiciones reales serán comparadas contra las cargas más críticas aceptables por el ducto.

5.4 Construcción de Modelo del Elemento Finito.

El programa de elementos finitos ANSYS ofrece una gran cantidad de opciones para construir el modelo, las cuales pueden dividirse inicialmente en dos procedimientos distintos; de generación directa y



modelado sólido^[5.1], pudiéndose combinar a lo largo del proceso según se requiera. En el siguiente cuadro sinóptico se muestra la clasificación de las distintas opciones, agrupada en el orden en que normalmente son empleadas.

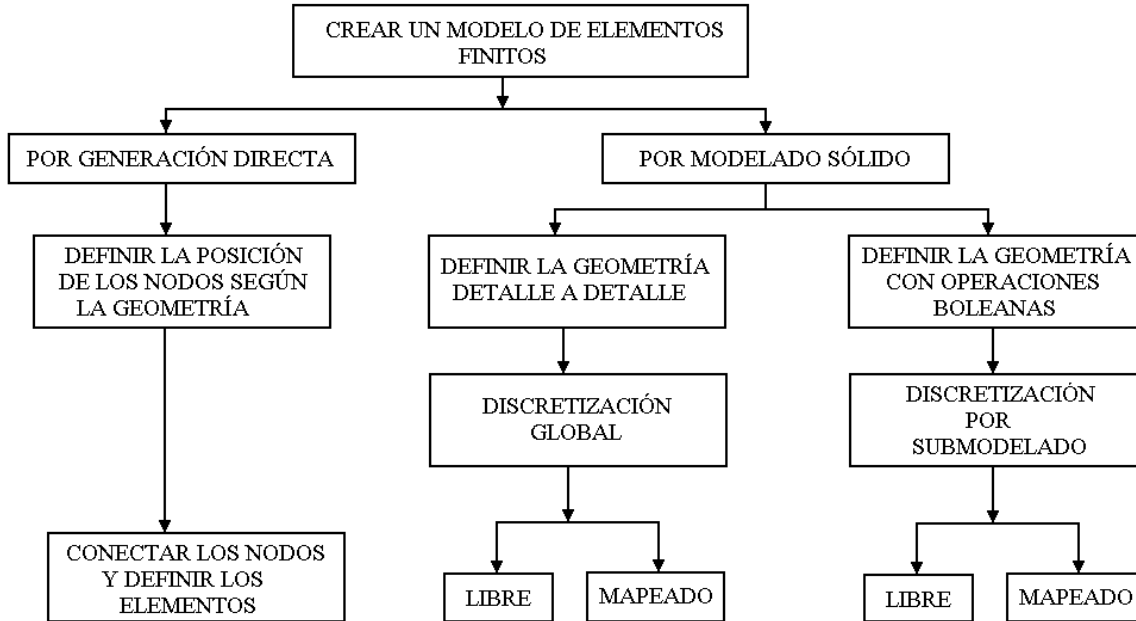


Figura 5.1. Cuadro Sinóptico. Opciones para crear el modelo de elementos finitos.

Los procedimientos que se emplearon en la elaboración y desarrollo de los modelos de elementos finitos fueron los siguientes:

1. Por generación directa, definiendo la posición de los nodos y elementos, según la geometría.
2. Por construcción de un modelo sólido, definiendo la geometría detalle a detalle mediante una discretización global, para obtener la malla de elementos finitos de forma libre o mapeada.

En un modelado de MEF es sumamente importante evaluar las condiciones de frontera, lo que nos permite obtener soluciones aproximadas. La exactitud de los resultados finales depende en parte de las propiedades de los materiales, y el método de discretización (número y tipo de elementos) usado durante el desarrollo del modelado geométrico. Cuando se está realizando un modelado, es importante tener en cuenta la capacidad del programa, así como el equipo de cómputo disponible, de aquí la importancia en ocasiones de simplificar e idealizar la geometría del modelado, aplicando así el criterio de ingeniería.



Asimismo, al modelar el concreto reforzado, el grado de dificultad aumenta, debido a que el material es homogéneo–isotrópico, por lo que el comportamiento en sus propiedades del material presenta una no-linealidad substancial. Para resolver este problema, se realizará un análisis de tipo no lineal en el programa de elementos finitos ANSYS. Éste software nos permite evaluar el comportamiento en estructuras de concreto reforzado mediante un procedimiento detallado, tal como se muestra en el punto 5.3.

En el caso del presente trabajo, este es el paso más delicado de toda la metodología, pues el modelo describe la geometría del cuerpo analizado y sus condiciones de carga y de frontera. De él dependerá, en forma importante, la exactitud de los resultados obtenidos^[5.1]. En este paso se especifica el nombre del trabajo, el tipo de análisis, así como el sistema de unidades a emplear, y se usa la subrutina PREP7 del programa, para definir los tipos de elementos, constantes reales del elemento, propiedades del material y la geometría del modelo.

Para fines de análisis del caso de estudio citado, el equipo de cómputo empleado es una máquina con las siguientes características:

- Pentium III con una velocidad del procesador de 933 MHz, a 512 MB en RAM.
- Disco duro de 40.0 GB.
- El paquete de elementos finitos es ANSYS versión 11 para Windows 95/98/2000/NT.

5.5 Tipos de Elementos Utilizados.

El programa ANSYS versión 11 nos permite modelar al ducto. El elemento de acero que se utiliza contiene 8 nodos llamado Shell93, que permite observar el comportamiento de los esfuerzos y el material. Lo anterior se complementa con el apoyo de otros tipos de elementos que nos permitan simular los refuerzos y las restricciones adecuadas de forma correcta, que hacen necesario la modelación a este problema, tales elementos son el LINK8, para el modelado de las barras de acero, el SHELL41 que simulará la placa de la contención que se encuentra en el interior de la estructura.



5.4. Objetivo.

Realizar el Análisis de Flexibilidad y Esfuerzos del tramo mencionado, con la configuración geométrica actual establecida en los planos y reportes de inspección, elaborados por el GAID – IPN, para determinar los niveles de esfuerzos y los desplazamientos que se presentan en el tramo indicado, bajo las cargas generadas por las condiciones de operación ($P = 135 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$, $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$), evaluando con esto el estructural del tramo.

5.5. Alcances.

Los alcances del presente estudio son:

1. Determinar el estado de esfuerzos y desplazamientos presentes en el tramo de tubería con la configuración geométrica actual, bajo las cargas generadas por las condiciones máximas de operación.
2. Realizar la evaluación de los esfuerzos máximos presentes en el tramo de tubería a través de las normas vigentes aplicables.

5.6. Requerimientos de Diseño.

Los requerimientos de diseño fueron determinados de acuerdo con las normas mencionadas en el punto 5.6. Del presente capítulo, donde se establecen los procedimientos para calcular los esfuerzos máximos presentes en un ducto, para diferentes condiciones de carga y valores límites para cada uno de ellos.

5.6.1. Esfuerzo Circunferencial.

La norma NRF-030-PEMEX-2006, establecen que el esfuerzo circunferencial debido a la presión interna debe ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$P = \frac{2t\sigma_H}{D} \rightarrow \sigma_H = \frac{PD}{2t} > \sigma_{Perm} \quad (5.1)$$



Donde:

σ_H = Esfuerzo circunferencial debido a la presión interna

D = Diámetro exterior de la tubería.

t = Espesor de pared del tubo

P = Presión interna a que esta sujeto el tubo

σ_{Perm} = Esfuerzo máximo permisible

Así mismo establece que el esfuerzo máximo permisible debe de calcularse de la siguiente manera:

$$\sigma_{Perm} = f_{CP} (SMYS) \quad (5.2)$$

$$f_{CP} = f_{DIS} f_{TEMP} \quad (5.3)$$

Donde:

σ_{Perm} = Esfuerzo máximo permisible.

SMYS = Resistencia mínima especificada a la cedencia del material

f_{CP} = Factor de capacidad permisible por presión interna

f_{DIS} = Factor de diseño por presión interna que depende del tipo de fluido transportado

f_{TEMP} = Factor de diseño por temperatura.

El esfuerzo máximo permisible para este tipo de carga de acuerdo con la norma NRF-030-PEMEX-2006. No debe exceder del 72% de la resistencia mínima especificada a la cedencia del material (SMYS).

5.6.2. Esfuerzo Longitudinal por Combinación de Cargas de Presión.

La norma NRF-030-PEMEX-2006, párrafo 8.1.7.1.1, establece que la suma de los esfuerzos longitudinales debidos a presión, peso y otras cargas externas sostenidas no deben exceder del 75% S_A de, donde:

$$S_A = 0.72(SMYS) \quad (5.4)$$

5.6.3. Esfuerzo Combinado por Expansión.

Las normas NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4, establecen que el esfuerzo combinado por expansión debe ser calculado mediante la siguiente ecuación:

$$S_E = \sqrt{S_b^2 + 4S_t^2} \quad (5.5)$$



Donde:

$S_E (\sigma_{Exp})$ = Esfuerzo combinado por expansión

S_b = Esfuerzo flexionante resultante = iM_b/Z

S_t = Esfuerzo torsional = $M_t/2z$

M_b = Momento flexionante resultante

M_t = Momento torsional.

Z = Módulo de sección de la tubería

I = Factor de intensificación de esfuerzos

El límite máximo permisible para este tipo de esfuerzo no debe de exceder del 72% de la resistencia mínima especificada a la cedencia del material (SMYS), de acuerdo con lo establecido en la norma NRF-030-PEMEX-2006, párrafo 8.1.7.1.1 inciso (b).

5.6.4. Esfuerzo Longitudinal Máximo.

La norma NRF-030-PEMEX-2006, párrafo 8.1.7.1.1., establece que la suma de los esfuerzos longitudinales producidos por la presión, cargas vivas y muertas, y aquellas producidas por cargas ocasionales, tales como viento o sismo, no deben exceder del 80% de la resistencia mínima especificada a la cedencia del material (SMYS).

5.6.5. Esfuerzo de Von Mises.

Las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4, establecen que el esfuerzo equivalente resultante de la aplicación de todas las fuerzas que actúan en un sistema de tuberías, debe ser calculado a través del criterio de von Mises mediante la siguiente ecuación:

$$S_{eq} = \sqrt{S_h^2 + S_L^2 + S_L S_h + 3S_t^2} \quad (5.6)$$



Donde:

S_{eq} (σ V.M) = Esfuerzo equivalente o de von Mises

S_h (σ H) = Esfuerzo circunferencial

S_L (σ Tot) = Esfuerzo longitudinal máximo (positivo tensión, negativo compresión)

S_t = Esfuerzo cortante.

La norma NRF-030-PEMEX-2006, párrafo 8.1.7.1.1 establece que el esfuerzo máximo de Von Mises, no debe exceder del 90% de la resistencia mínima especificada a la cedencia del material (SMYS).

5.7. Desarrollo del Modelo.

Para el análisis de flexibilidad se construyó un modelo de elementos finitos a través de la unión de elementos lineales tridimensionales, los cuales tienen seis grados de libertad por nodo, considerando el plano x z para la vista de planta del modelo, mientras que el eje y corresponde a la coordenada vertical. Así mismo, durante el análisis de flexibilidad se hicieron las siguientes consideraciones:

1. El material de los componentes es homogéneo, isotrópico y tiene un comportamiento lineal elástico.
2. No existen variaciones en la temperatura de los componentes del ducto que propicien alteraciones en los esfuerzos generados por esta variable, es decir, la temperatura se mantiene constante.
3. No existen variaciones en la presión interna que se ejerce en el ducto, la cual es aplicada exclusivamente sobre la superficie interna de la tubería.
4. No existen esfuerzos secundarios en los componentes, tales como esfuerzos residuales por trabajo en el proceso de conformado en frío y zona afectada por el calor en soldaduras.
5. Se considera que los componentes y soldaduras se encuentran sanas. Así mismo el espesor se considera constante en cada componente.
6. El rozamiento que se presenta entre los soportes y la tubería, en la zona de contacto, es manejado con su valor estático, para considerar el efecto máximo presentado.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



El modelo de elementos finitos se realizó con base en la información técnica proporcionada por el Departamento de Mantenimiento a Ductos y Vías de Acceso del Activo Integral Poza Rica – Altamira , Área Poza Rica, en los cuales se muestra la configuración geométrica actual de la tubería y elementos adyacentes; considerando para su construcción la longitud, dirección y elevación de cada tramo, colocando en los cambios de dirección curvas con radios de curvatura de acuerdo con la geometría del ducto y factores de intensificación y de flexibilidad de acuerdo con lo establecido en norma ASME B31.4 1998. En las Tablas 5.1. Y 5.2. Se muestra la información utilizada.

Tabla 5.1. Características geométricas y propiedades del material del ducto

DIÁMETRO NOMINAL	10 in
Espesor Nominal	0.500 in
Material de la Tubería.	
Especificación Nominal	API 5L X52
Resistencia Mínima Especificada a la Cedencia	52 Ksi
Módulo de Elasticidad	29.50 Msi
Relación de Poisson	0.30 (a dimensional)
Coefficiente de Expansión Térmica Lineal	6.5×10^{-6} in/in/° F (11.7×10^{-6} mm/mm/°C).

* Datos tomados de la verificación técnica

Tabla 5.2. Condiciones actuales de operación

Presión de Operación	$135 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ (13.2353 MPa)
Temperatura Máxima de Operación	35 °C (91.4 °F)
Tipo de Producto	Líquido (Agua)



Una vez construido el modelo geométrico se aplican las condiciones frontera (cargas y restricciones) que gobiernan el comportamiento mecánico del sistema.

Para las condiciones de carga se introdujeron a los modelos las condiciones actuales de operación del ducto (presión, temperatura), así como el peso de los carretes y producto transportado.

Para modelar las restricciones que impone el suelo sobre los extremos de la línea debido a que se encuentra enterrada se considero soportes tipo Ancia, los cuales restringen el movimiento en toda dirección del ducto, es decir, en los seis grados de libertad para un modelo 3D.

5.8 Análisis de Resultados.

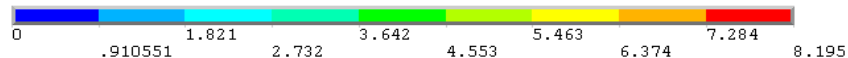
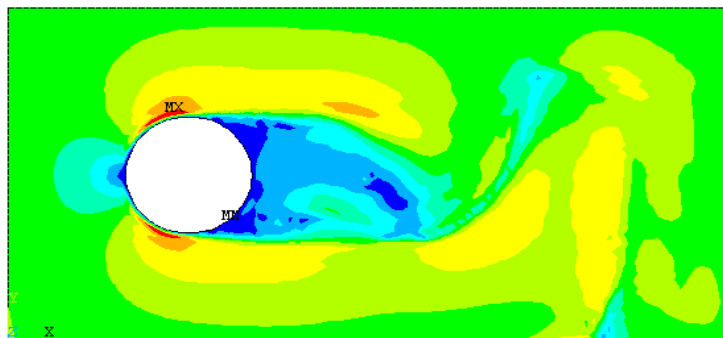
5.8.1. Análisis de flujo sobre el ducto.

A continuación se presentan los resultados de la simulación de flujo sobre un ducto para las tres distintas velocidades planteadas en el trabajo.

Aproximación a una velocidad de 3.94 m/s obteniendo un perfil de velocidades y de presiones correspondiente.

```
1 NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
VSUM (AVG)
RSYS=0
SMX =8.195
```

ANSYS
APR 17 2008
00:20:23





Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Figura 5.2. Perfil de velocidades a 3.94 m/s.

```
1 NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
PRES (AVG)
RSYS=0
SMN =-18392
SMX =14275
```

ANSYS
APR 17 2008
00:22:38

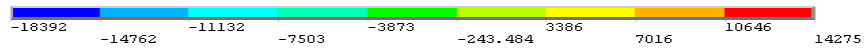
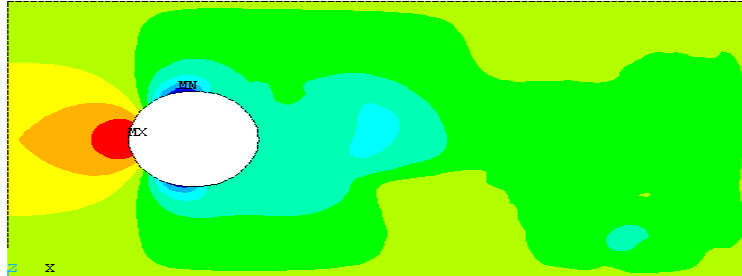


Figura 5.3. Perfil d presión.

Aproximación para una velocidad de 2.51 m/s. se obtienen los siguientes perfiles de velocidades y presiones correspondientemente.

```
1 NODAL SOLUTION
SUB =1
VSUM (AVG)
RSYS=0
SMX =5.054
```

ANSYS
APR 17 2008
00:54:33

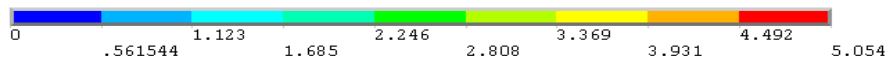
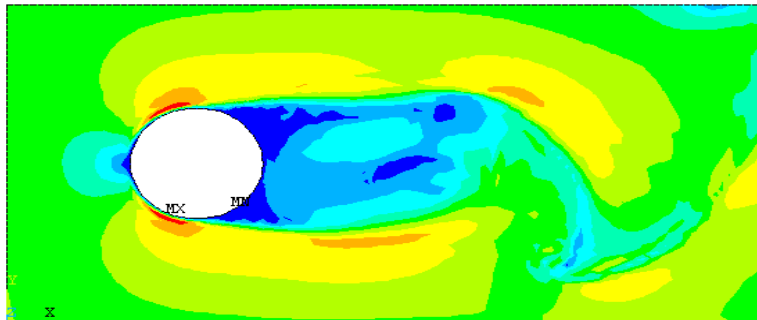


Figura 5.4. Perfil de velocidades a 2.51 m/s.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



1
NODAL SOLUTION
SUB =1
PRES (AVG)
RSYS=0
SMN =-6614
SMX =5866

ANSYS
APR 17 2008
00:55:47

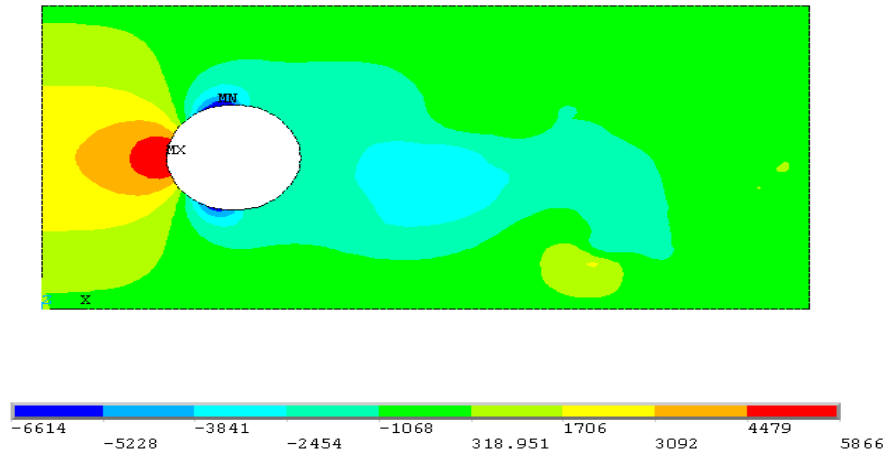


Figura 5.5 Perfil de presión

Aproximación de una velocidad de 1.09 m/s se obtienen los siguientes perfiles de velocidades y presiones correspondientemente.

1
NODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
VSUM (AVG)
RSYS=0
SMX =2.195

ANSYS
APR 17 2008
01:06:20

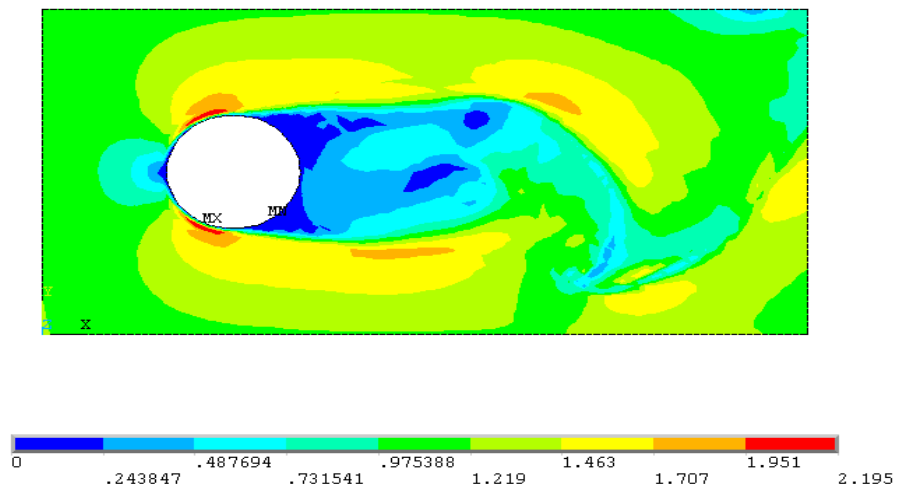


Figura 5.6. Perfil de velocidades a 1.09 m/s.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



```

1
MODAL SOLUTION
STEP=1
SUB =1
PRES (AVG)
RSYS=0
SMN =-1252
SMX =1106
    
```

ANSYS
APR 17 2008
01:07:25

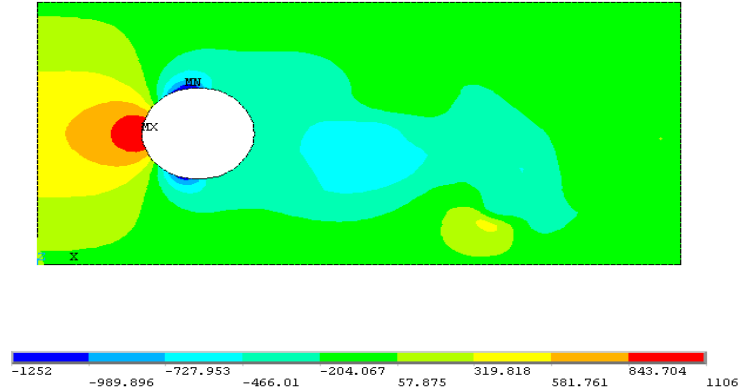


Figura 5.7. Perfil de presiones.

Una forma de validar los resultados anteriores es a partir de la ecuación de Bernoulli. De la cual obtenemos los siguientes valores de presión considerando las 3 velocidades diferentes (mínima, promedio y máxima) correspondientemente.

Tabla 5.3 Comparación de los valores obtenidos mediante un método numérico vs. Un analítico

CASOS DE ESTUDIO.	PRESIÓN INTERNA. MPa	PRESIÓN EXTERNA BERNOULLI. $P_{EXT} = P_{\alpha} + \left(\frac{\rho V^2}{2}\right)$ PA	PRESIÓN EXTERNA NUMÉRICA (ANSYS). Pa
CASO 1 ESPESOR INICIAL (0.0127 m)	13.2353	MINIMA =1188	MINIMA =1106
	13.2353	PROMEDIO =6300.1	PROMEDIA =5866
	13.2353	MAXIMA =15523.6	MAXIMA =14275
CASO 2 ESPESOR ACTUAL (0.0089m)	13.2353	MINIMA =1188	MINIMA =1106
	13.2353	PROMEDIO =6300.1	PROMEDIO =5866
	13.2353	MAXIMA =15523.6	MAXIMA =14275
CASO 3 ESPESOR RETIRO (0.005 m)	13.2353	MINIMA =1188	MINIMA =1106
	13.2353	PROMEDIO =6300.1	PROMEDIO =5866
	13.2353	MAXIMA =15523.6	MAXIMA =14275



5.8.2. Esfuerzos sobre el ducto.

A continuación se presentan los resultados de los análisis realizados, se presentan los esfuerzos de Von Mises y la deformación máxima que se presenta. Cabe aclarar que la imagen de deformación máxima mostrada corresponde a la denominada como auto calculado por el programa (no es representativo), esto dado a que a escala real solo se puede apreciar en la imagen de los esfuerzos de Von Mises.

5.9. Resultados.

En la tabla 5.4 se muestran los resultados de los esfuerzos y desplazamientos máximos presentes en el tramo, bajo las diferentes condiciones de carga evaluadas.

Tabla 5.4. Esfuerzos y desplazamientos máximos actuantes

ESPEJOR INICIAL 0.0127m SMYS DEL MATERIAL (359E ⁶ Pa)	(σ_H) ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL $\sigma_H > \sigma_{perm} < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL.	ESFUERZO LONGITUDINAL POR COMBINACION $\sigma_{Lmax} < 75\% S_A$ $S_A = 0.72(SMYS)$ DEL MATERIAL	ESFUERZO COMBINADO POR EXPANSION $S_E (\sigma_{EXP}) < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL	ESFUERZO LONGITUDINAL MAXIMO $\sigma_{LMAX} < 80\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL	ESFUERZO DE VON MISES $\sigma_{Eq} < 90\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL
PRESION MINIMA	244MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	83.4MPa =32.5%	567091Pa =0.15%	83.4MPa = 23.23%	229MPa =63.78%
PRESION PROMEDIO	254MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	106MPa =41%	566145Pa =0.15%	106MPa =29.52%	238MPa = 66.29%
PRESION MAXIMA	271MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	134MPa =51.93%	564425Pa =0.15%	134MPa =37.32%	253MPa =70.47%
ESPEJOR ACTUAL MINIMO 0.0089m SMYS DEL MATERIAL (359E ⁶ Pa)	(σ_H) ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL $\sigma_H > \sigma_{perm} < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL.	ESFUERZO LONGITUDINAL POR COMBINACION $\sigma_{Lmax} < 75\% S_A$ $S_A = 0.72(SMYS)$ DEL MATERIAL	ESFUERZO COMBINADO POR EXPANSION $S_E (\sigma_{EXP}) < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIA	ESFUERZO LONGITUDINAL MAXIMO $\sigma_{LMAX} < 80\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL	ESFUERZO DE VON MISES $\sigma_{Eq} < 90\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL
PRESION MINIMA	351MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	124MPa =47.98%	7.253Pa =2%	124MPa =34.54%	325MPa =90%
PRESION PROMEDIO	366MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	155MPa =59.96%	7.012Pa =1.953%	155MPa =43.17%	337MPa =93.8%
PRESION MAXIMA	390MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	190MPa =73.64%	4.579Pa =1.275%	190MPa =52.9%	360MPa =100.2%



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



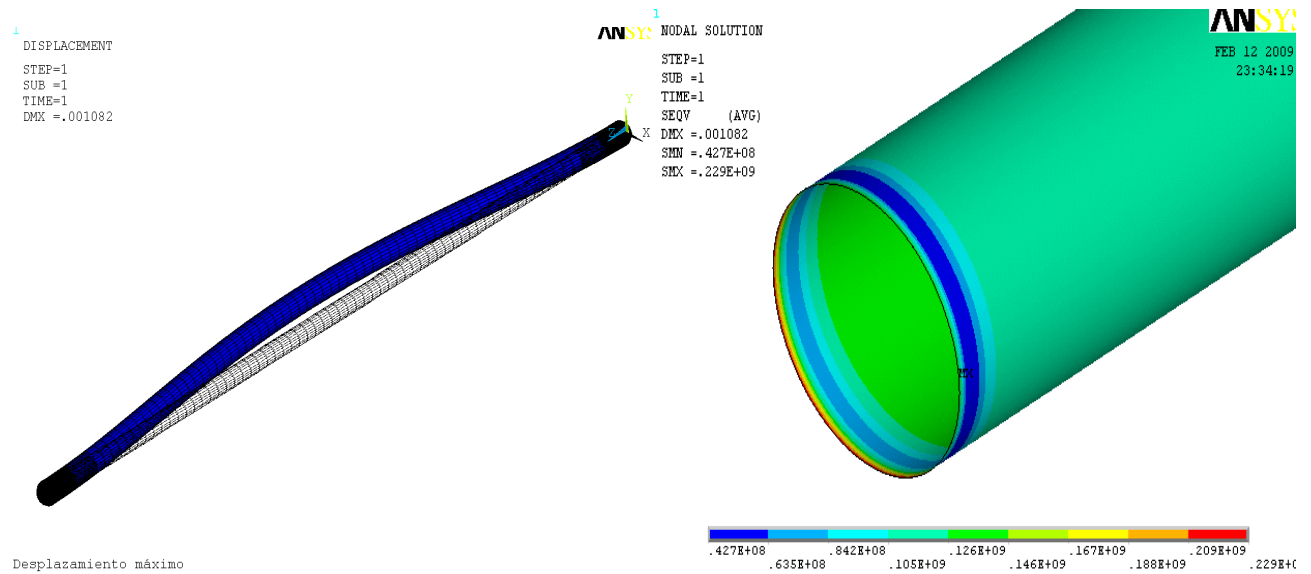
ESPEJOR ACTUAL PROMEDIO 0.0099m SMYS DEL MATERIAL (359E ⁶ Pa)	(σ_H) ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL $\sigma_H > \sigma_{perm} < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL.	ESFUERZO LONGITUDINAL POR COMBINACION $\sigma_{Lmax} < 75\% S_A$ $S_A = 0.72(SMYS)$ DEL MATERIAL	ESFUERZO COMBINADO POR EXPANSION $S_E (\sigma_{EXP}) < 72\% DE (SMYS)$ DEL MATERIA	ESFUERZO LONGITUDINAL MAXIMO $\sigma_{LMAX} < 80\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL	ESFUERZO DE VON MISES $\sigma_{Eq} < 90\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL
PRESION MINIMA	315MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	110MPa=42.55%	7.19Pa=2%	110MPa=30.6%	293MPa=81.61%
PRESION PROMEDIO	328MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	139MPa=53.77%	5.70Pa=1.58%	139MPa=38.71%	304MPa=84.67%
PRESION MAXIMA	351MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	173MPa=66.92%	3.079Pa=0.857%	173MPa=48.18%	320MPa=89%
ESPEJOR DE RETIRO 0.005m SMYS DEL MATERIAL (359E ⁶ Pa)	(σ_H) ESFUERZO CIRCUNFERENCIAL $\sigma_H > \sigma_{perm} < 72\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL.	ESFUERZO LONGITUDINAL POR COMBINACION $\sigma_{Lmax} < 75\% S_A$ $S_A = 0.72(SMYS)$ DEL MATERIAL	ESFUERZO COMBINADO POR EXPANSION $S_E (\sigma_{EXP}) < 72\% DE (SMYS)$ DEL MATERIA	ESFUERZO LONGITUDINAL MAXIMO $\sigma_{LMAX} < 80\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL	ESFUERZO DE VON MISES $\sigma_{Eq} < 90\%$ DE (SMYS) DEL MATERIAL
PRESION MINIMA	625MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	229MPa =88.75%	14.323MPa =3.98%	229MPa =63.78%	570MPa =158.7%
PRESION PROMEDIO	652MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	248MPa =96%	214.364Pa =4%	248MPa =69%	593MPa =165%
PRESION MAXIMA	701MPa > 179.5MPa =49.86% del (SMYS) del Material.	347MPa =134%	9.118Pa =2.53%	347MPa =96.65%	636MPa =177%



Caso 1a. Espesor Inicial – Presión Externa Mínima

Deformación máxima = 0.001082 m

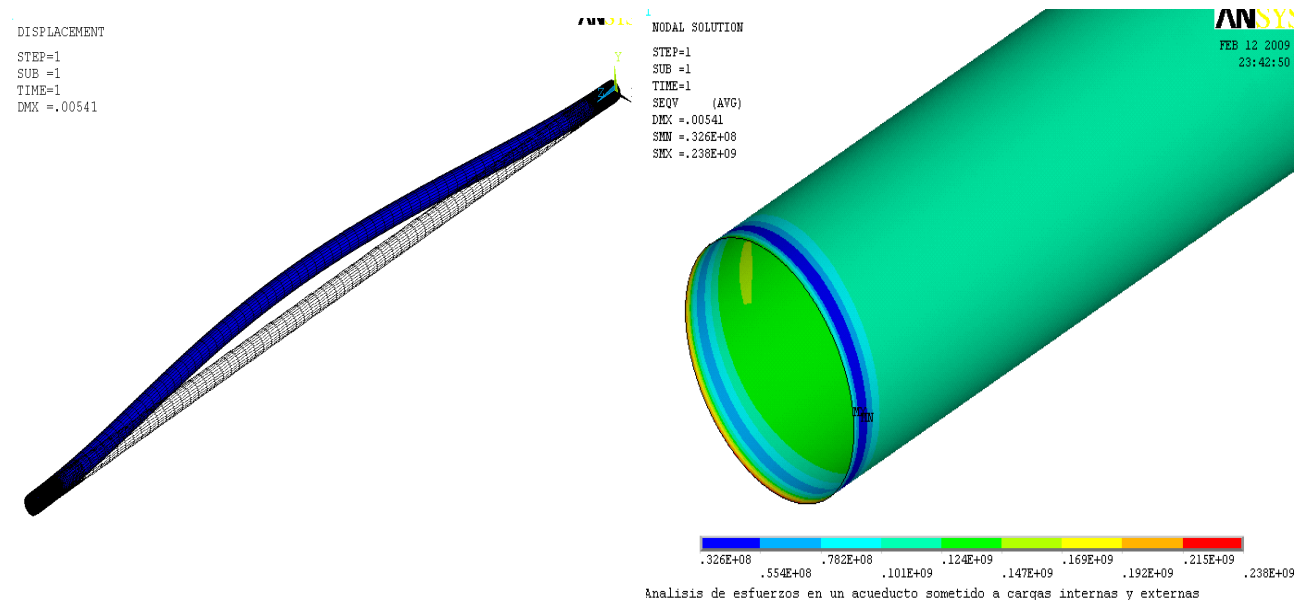
Esfuerzo equivalente de Von Mises = 229E⁶Pa



Caso 1b. Espesor Inicial – Presión Externa Promedio

Deformación máxima = 0.00541 m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = 238E⁶Pa

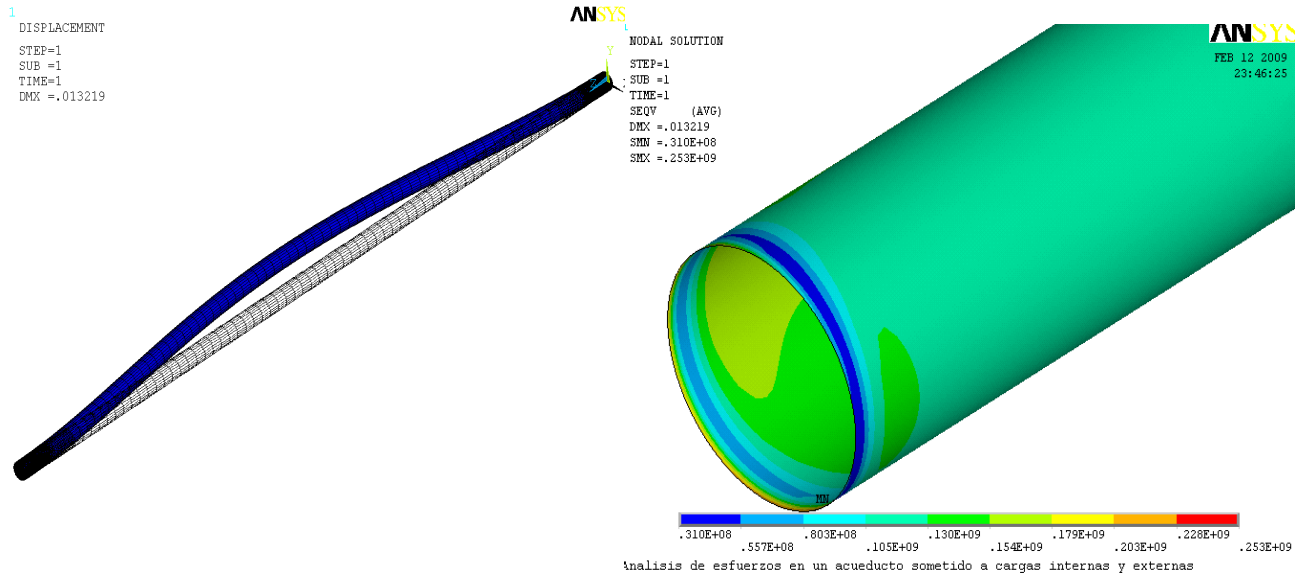




Caso 1c. Espesor Inicial – Presión Externa Máxima

Deformación máxima = 0.013219 m

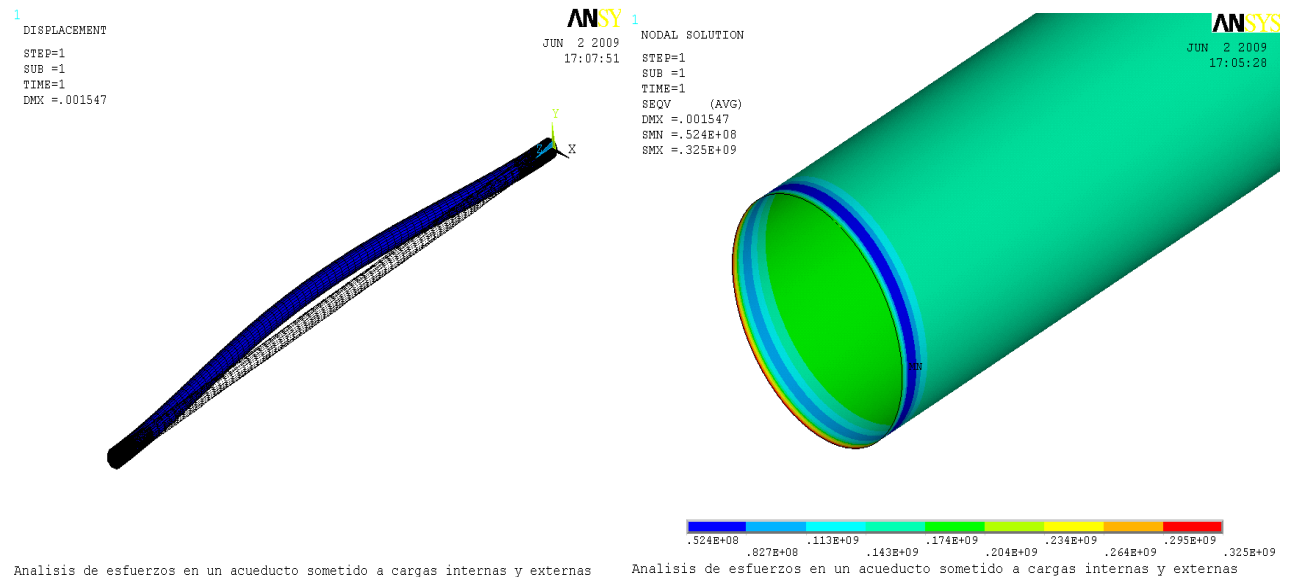
Esfuerzo equivalente de Von Mises = 253E⁶Pa



Caso 2a. Espesor Actual Mínimo– Presión Externa Mínima.

Deformación máxima = 0.001547 m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = 325E⁶Pa





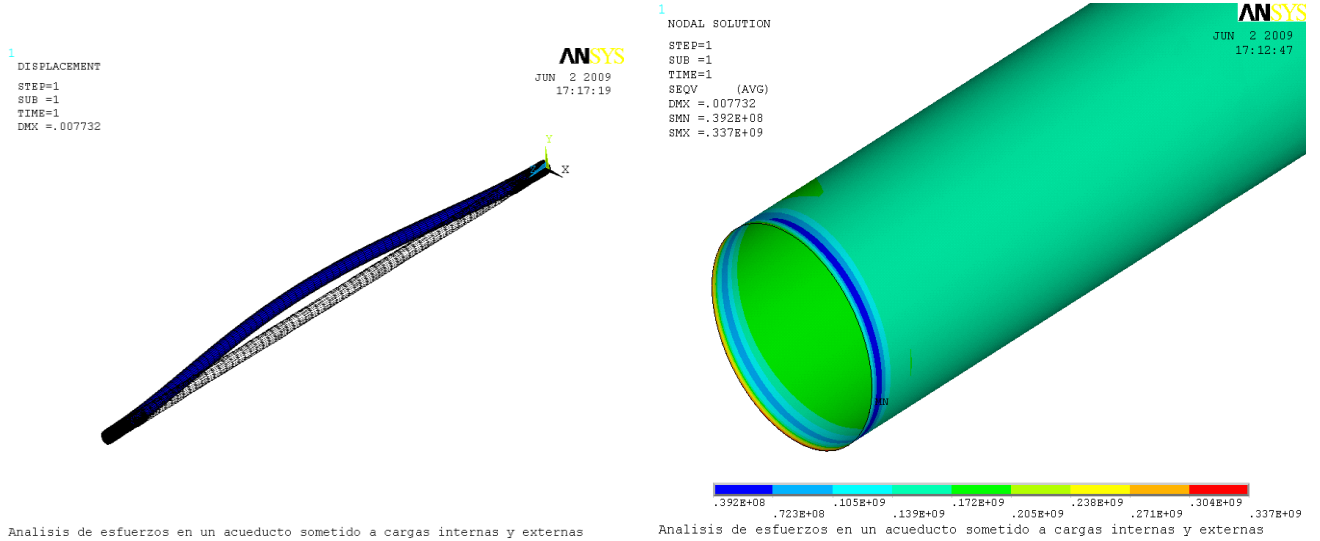
Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



Caso 2b. Espesor Actual Mínimo – Presión Externa Promedio.

Deformación máxima = 0.007732 m

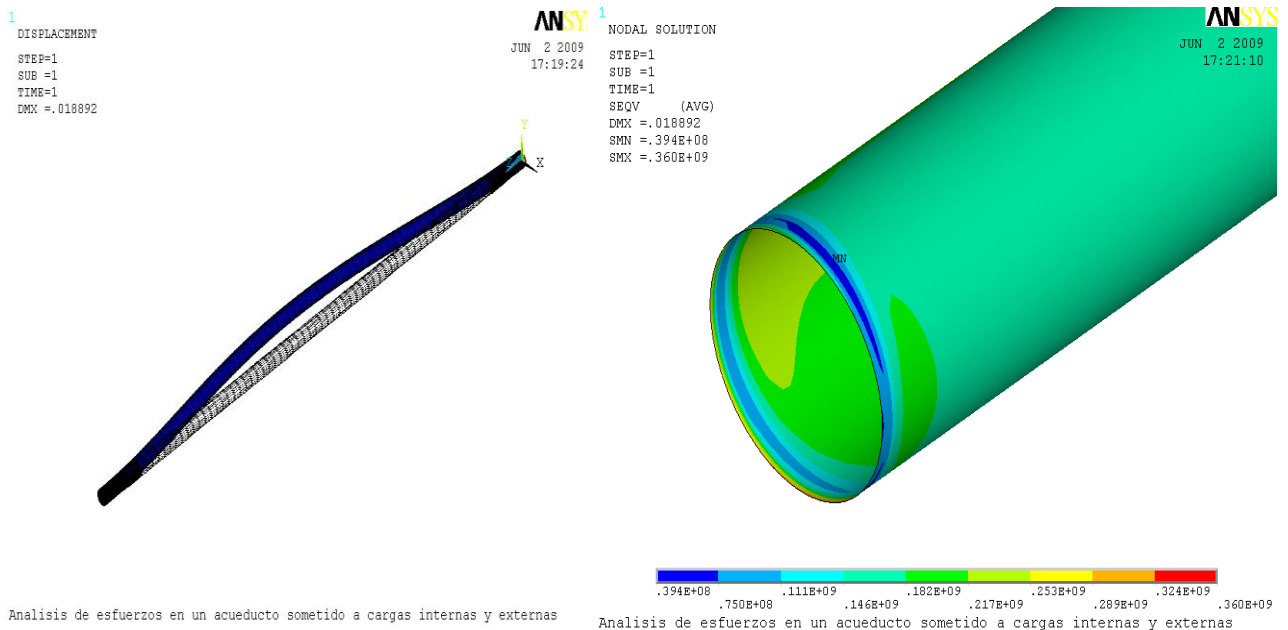
Esfuerzo equivalente de Von Mises = $337E^6$ Pa



Caso 2c. Espesor Actual Mínimo – Presión Externa Máxima.

Deformación máxima = 0.018892 m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = $360E^6$ Pa

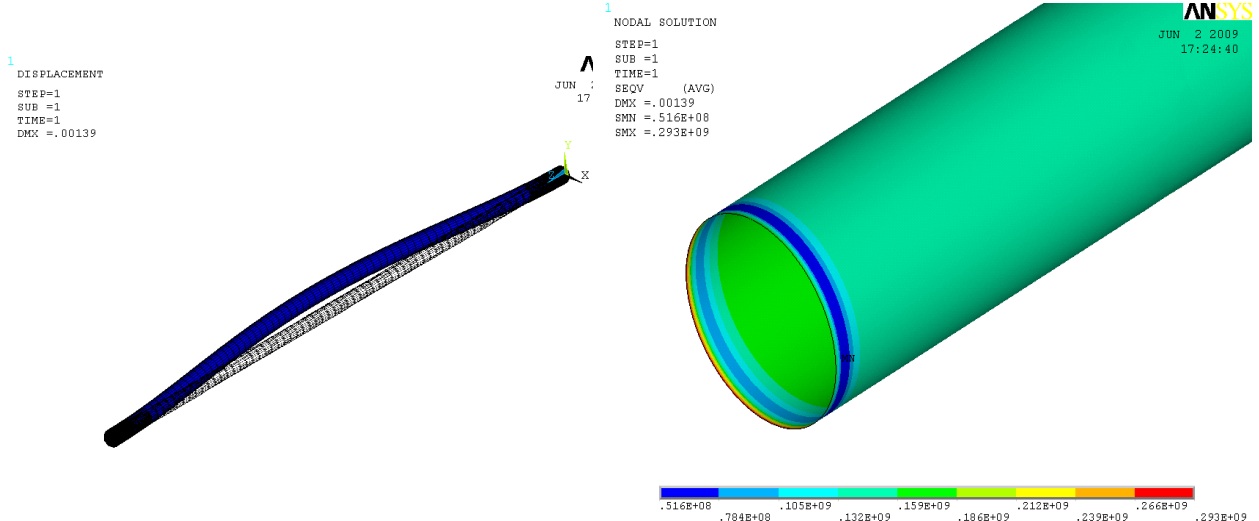




Caso 3a. Espesor Actual Promedio– Presión Externa Mínima.

Deformación máxima = 0.00139 m

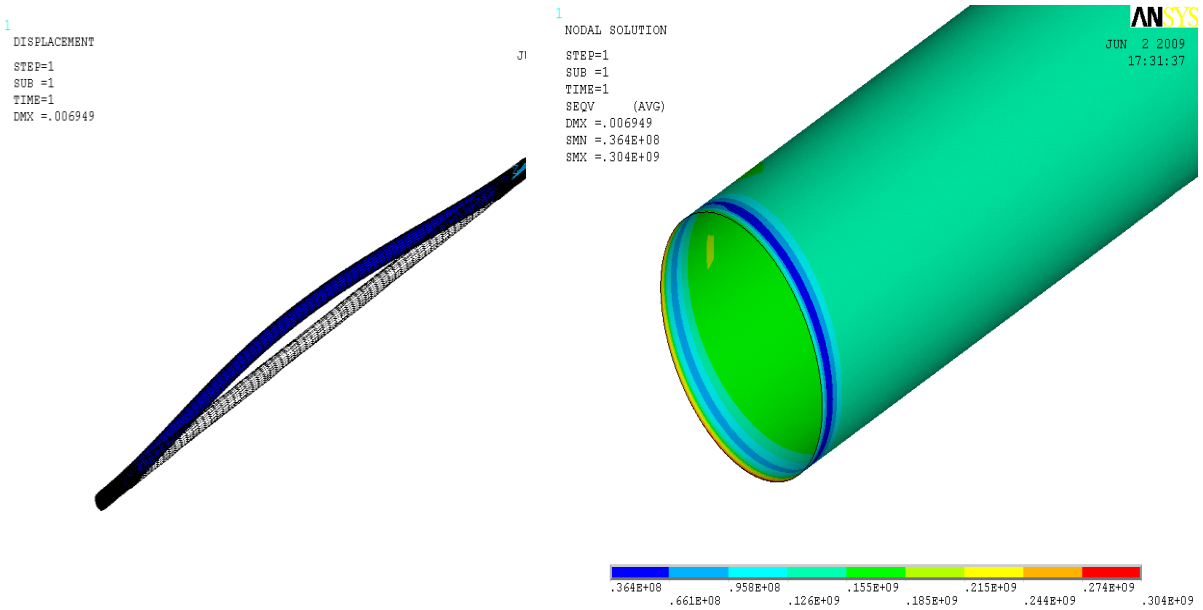
Esfuerzo equivalente de Von Mises = 293E⁶Pa



Caso 3b. Espesor Actual Promedio – Presión Externa Promedio.

Deformación máxima = 0.006949 m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = 304E⁶Pa

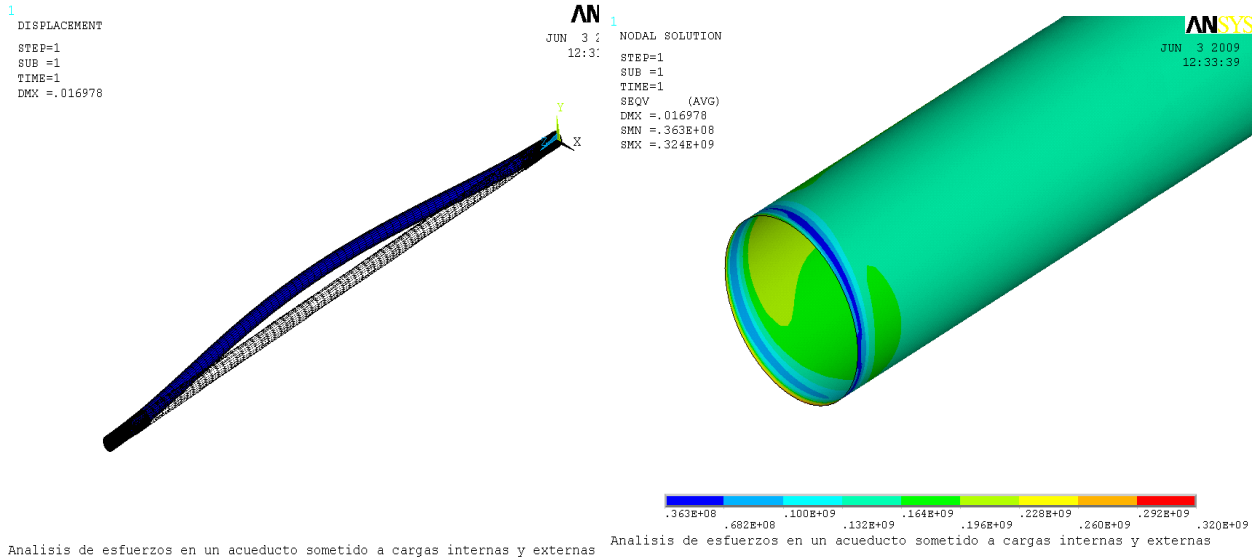




Caso 3c. Espesor Actual Promedio – Presión Externa Máxima.

Deformación máxima = 0.016978 m

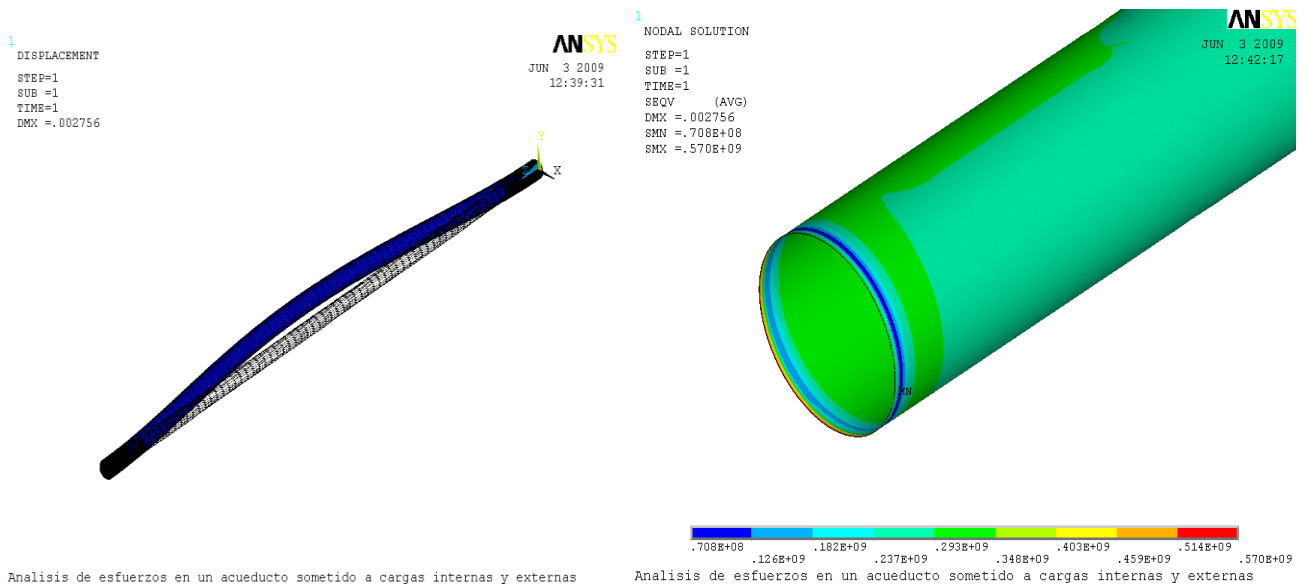
Esfuerzo equivalente de Von Mises = 320E⁶Pa



Caso 4a. Espesor de Retiro – Presión Externa Mínima.

Deformación máxima = 0.002756m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = 570E⁶Pa

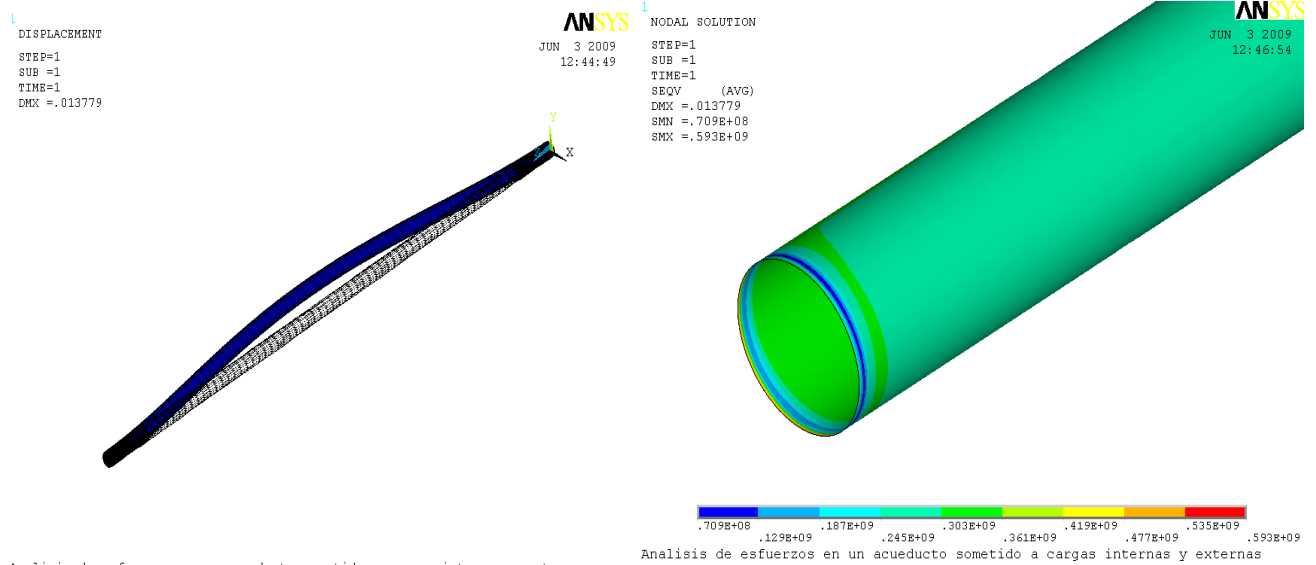




Caso 4b. Espesor de Retiro – Presión Externa Promedio.

Deformación máxima = 0.013779 m

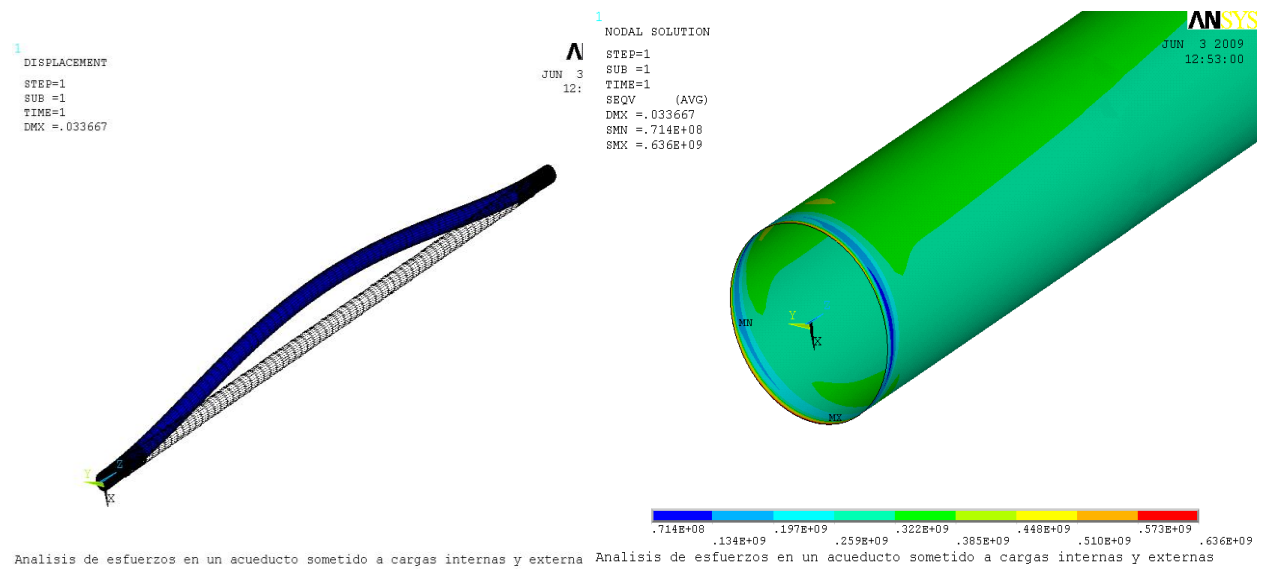
Esfuerzo equivalente de Von Mises = 593E⁶Pa



Caso 4c. Espesor de Retiro – Presión Externa Máxima.

Deformación máxima = 0.033667 m

Esfuerzo equivalente de Von Mises = 636E⁶Pa





Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



En la tabla 5.5 se representan los resultados obtenidos anteriormente mediante la simulación en ANSYS en donde se obtuvieron los desplazamientos y los esfuerzos de von mises para los diferentes casos (espesores).

Tabla.5.5 Desplazamientos y Esfuerzos de Von Mises

	ESPESOR, Metros	PRESIÓN INTERNA, MPA	PRESIÓN EXTERNA, PA	DESPLAZAMIENTO, M.	ESFUERZO DE VON MISES, MPA
CASO 1	0.0127	13.2353	1188	0.001082	229
			6300	0.005415	238
			15524	0.013219	253
CASO 2	0.0089	13.2353	1188	0.001547	325
			6300	0.007732	337
			15524	0.018898	360
CASO 3	0.0099	13.5253	1188	0.001397	293
			6300	0.006949	304
			15524	0.016978	320
CASO 4	0.005	13.2353	1188	0.002756	570
			6300	0.013779	593
			15524	0.033672	636

En el presente trabajo se obtuvieron resultados para los diferentes casos de estudio que se analizaron (espesores) en los cuales se obtuvieron deformaciones y diferentes tipos de esfuerzos considerando una presión interna uniforme y una presión externa (máxima, mínima, promedio) que representa el flujo del agua del río sobre el ducto los valores que se obtuvieron son aplicados a las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4

En las normas mencionadas anteriormente NRF-030-PEMEX-2006 nos indica que el esfuerzo circunferencial debe de ser mayor que el esfuerzo permisible y este a la vez ser menor al 72% de la resistencia del material lo cual se cumple y se verifica en la tabla 5.4 que están por debajo de los parámetros ya mencionados.

De igual manera se obtuvieron los esfuerzos longitudinales por combinación de cargas de presión y sustentación que satisfacen a la norma NRF-030-PEMEX-2006 la cual nos indica que el valor de este esfuerzo no debe exceder el 75% del valor de S_A descrito en la tabla 5.4 de los cuales solo 3 espesores



cumplen con la norma ya que se encuentran por debajo de la restricción con excepción de espesor de retiro el cual para este caso se encuentra fuera de norma como lo indica la tabla 5.4.

Los esfuerzos combinados por expansión que se obtuvieron satisfacen a las normas NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4 las cuales indican que el valor de este tipo de esfuerzos no debe exceder el 72% de la resistencia a la cedencia del material que se describen en la tabla 5.4 lo cual nos indica que estos valores obtenidos para los diferentes casos de estudio (espesores) cumplen con las restricciones de las normas ya que se encuentran por debajo de estos parámetros.

Para los esfuerzos longitudinales máximos las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4 nos indican que el valor de este no debe exceder el valor del 80% de la resistencia mínima a la cedencia del material, los diferentes casos de estudio (espesores) que se analizaron se determinó que solo 3 espesores cumplen con estas normas ya que en el espesor de retiro con una presión máxima externa no cumple con estas restricciones como se puede verificar en la tabla 5.4.

Por último se obtuvieron los esfuerzos de Von Mises considerando las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4 nos dice que no deben de exceder el 90% de la resistencia mínima a la cedencia del material, para este análisis se pudo determinar que solo 2 casos (espesores) cumplen con las restricciones ya que para un espesor actual mínimo y uno de retiro se encuentran fuera de norma como lo indica la tabla 5.4.

5.10. Sumario.

Con la realización de los resultados en la simulación por medio del programa ANSYS y los obtenidos de forma analítica, se desarrollan las conclusiones y comentarios para Trabajos Futuros que se verán a continuación.



5.11. Referencias.

5.1. Swanson Analysis Co. *ANSYS Modeling and Meshing Guide*, 1994.

5.2. ISO 13623:2000, “Petroleum and natural gas industries – Pipeline transportation systems”.

5.3. NRF-030-PEMEX-2006, “Diseño, construcción, inspección y mantenimiento de ductos terrestres para transporte y recolección de hidrocarburos”.

5.4. ASME B31.4 1998, “Pipeline transportation systems for liquid hydrocarbons and other Liquids”.



Conclusiones

Se realizó un análisis numérico para poder determinar el campo de esfuerzos a los cuales está sometido el acueducto mediante el Método de Elemento Finito en donde se obtuvo el valor para el desplazamiento máximo que sufre cuando está sometido a cargas internas y externas (Máxima, Promedio, Mínima) así como los diferentes tipos de esfuerzos que se presentan Von Mises, Circunferencial, Longitudinal, Longitudinal Máximo y de Expansión como se muestra en la tabla 5.4.

Se determinó la seguridad inherente del acueducto considerando los resultados del análisis numérico que se realizó a los diferentes casos de estudio (espesores) donde se obtuvieron los diferentes tipos de esfuerzos a los que está sometido con esto se concluye que solo el espesor de retiro y el espesor mínimo actual se encuentran fuera de los parámetros de las normas ISO 13623:2000, NRF-030-PEMEX-2006 y ASME B31.4 como se esperaba.

Se aplicó el Método del Elemento Finito en el análisis del acueducto sometido a cargas internas y externas (mínima, promedio, máxima) y considerando los diferentes espesores que se obtuvieron mediante una inspección de ultrasonido.

Se obtuvieron 3 desplazamientos diferentes que corresponden a cada caso de estudio (espesores inicial, actual mínimo, actual promedio y de retiro) lo cual nos da un valor de 12 desplazamientos totales correspondientemente 0.001082, 0.005415, 0.013219, 0.001547, 0.007732, 0.018898, 0.001397, 0.006949, 0.016978, 0.002756, 0.013779, 0.033672 en metros. Y como consiguiente se encontraron los esfuerzos circunferenciales los cuales satisfacen a la norma citada en el capítulo 5 de igual manera para los esfuerzos longitudinales, expansión, longitudinal máximo y de von mises los cuales están tabulados en la tabla 5.4 lo cual nos indica que se encuentra trabajando bajo los parámetros que

marca la Norma NRF-030-PEMEX-2006; "Diseño, Construcción, Inspección y mantenimiento de Ductos Terrestres para transportar y recolección de Hidrocarburo"; con la seguridad aún con precipitaciones anuales superiores a 52 m³/s.

El tiempo de Vida Remanente del Acueducto es mayor a 23 años por tanto se recomienda inspeccionarlo en un periodo de 10 años para evaluar y revisar la evolución de las fallas no severas encontradas que no requieren reparación.



Trabajos a Futuro

Como recomendación para trabajos futuros de mantenimiento y/o construcción de líneas, se tendrá que realizar un estudio de Análisis del Estudio Hidráulico para poder resolver la presión que ejerce el caudal o arrastre, dentro de cada río o arroyo en particular, y determinar así la deformación que puede sufrir el ducto, ya que actualmente no se les realiza ningún estudio a las líneas principales de inyección de agua y son estas las que llevan una presión interna mayor a los 100 kg/s^2 ; verificando el estado de las fallas que se encuentren en sus empotes, verificando sus dimensiones y ubicación, para poder evaluar el estado de la integridad del ducto, poder determinar las reparaciones requeridas y/o recomendaciones de operabilidad, y así mantenerlo siempre en óptimas condiciones de una manera segura y confiable, dentro de los parámetros de las normas y códigos existentes con vigencia que rigen el transporte de hidrocarburos y sus derivados por ductos.

Así mismo se recomienda la utilización de herramientas computacionales, tales como los paquetes comerciales ANSYS y CAD para la comprobación de la durabilidad de la vida remanente del ducto, así como su aplicación dentro del Análisis de Riesgo, para ubicar en un mapeo utilizando coordenadas satelitales, todas las indicaciones, características, fallas y condicionantes que afectan directamente la integridad del ducto en estudio, realizarle periódicamente calibraciones para obtener el desgaste de estos.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



ANEXOS

FORMA PEM OF-3

OFICIO



Lic. Leonel González Díaz
Representante de Industrias Máximo, S.A. de C.V.
Poza Rica, Ver.

NUMERO: 221-27000-27500-11-580/99.

EXPEDIENTE:

FECHA: Mayo 14, 1999.

Asunto: Atención a solicitud de localización de ducto.

En atención a su oficio s/n dirigido a la Superintendencia General del Distrito Poza Rica, donde solicita se le indique y especifique el derecho de vía del ducto que corre a lo largo de la calle Iridacea del fraccionamiento Bella Vista, ubicado en el lote 3, fracción 24; una vez realizados los sondeos y el dictamen por parte de nuestro personal técnico operativo, informamos a usted que en dicho predio se detectó un acueducto en operación de 12"Ø, que va del pozo P.R. 120 al pozo P.R.153 el cual ocupa un derecho de vía de 13 m. de ancho tal y como se señala en el plano anexo al presente, por lo que de acuerdo a nuestras Normas de Seguridad vigentes se deberá respetar el derecho de vía mencionado, no permitiéndose ningún tipo de obra o construcción sobre el mismo.

Sin más por el momento aprovecho la ocasión para saludarle.

Atentamente,

C.P. Luis M. Galván Arcos
Superintendente Interino

C.c.p.- Asesor Asuntos Externos, Subdirección Región Norte.
Suptcia. Gral. Dto. Poza Rica.
Suptcia. S.I.P.A. Dto. Poza Rica
Suptcia. de Producción, Dto. P.R.
Suptcia. de Servicios Técnicos, Dto. P.R.
Expediente caso P.R. No. 0113/99

Superintendencia de Administración y Finanzas-Distrito Poza Rica
Edificio Juan Hefferan Vera Planta Alta Int. del Campo Pemex, Poza Rica, Ver., C.P. 93370
Commutador 6-10-00 Extensión: 3-30-84, Telfax 2-78-27

A. Oficio de solicitud del derecho de vía.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto
Sometido a Cargas Externas e Internas.



INDUSTRIAS MAXIME, S.A. de C.V.

Ing. Ricardo Rodríguez
SUPT. INT. SERVS. TICS.
EXT. 3266P
618 00

Poza Rica, Ver. A 3 de Noviembre de 1997.

ING. ABELARDO CORDOVA HERNANDEZ
SUPERINTENDENTE GENERAL INTERINO
DEL DISTRITO POZA RICA DE
PETROLEOS MEXICANOS.

PRESENTE.

Nos dirigimos a Usted muy respetuosamente con el propósito de solicitar la reubicación del acueducto de 10" que está ubicado en el Lote 3 de la parcela 24 de este Municipio.

Esta solicitud obedece a que dicha línea nos afecta en la construcción de por lo menos 40 casas; y el diseño de nuestro proyecto no nos es posible cambiarlo porque se deriva de una subasta de derechos de crédito que obtuvimos, y el hecho de cambiar el proyecto implica perder dicha subasta.

Así mismo le informamos que de ninguna manera edificaremos, sino que dejaremos vialidades sobre estos derechos de vía, los cuales no nos han sido debidamente acreditados.

Para tal efecto agregamos a la presente el plano de lotificación en donde se observa el trazo del acueducto de 10" y el trazo por donde solicitamos la reubicación.

Reiterando nuestros respetos y consideraciones quedamos a sus apreciables ordenes en nuestras oficinas en Plaza Crystal Local 10-B Teléfonos 4-33-38 y 3-10-59.

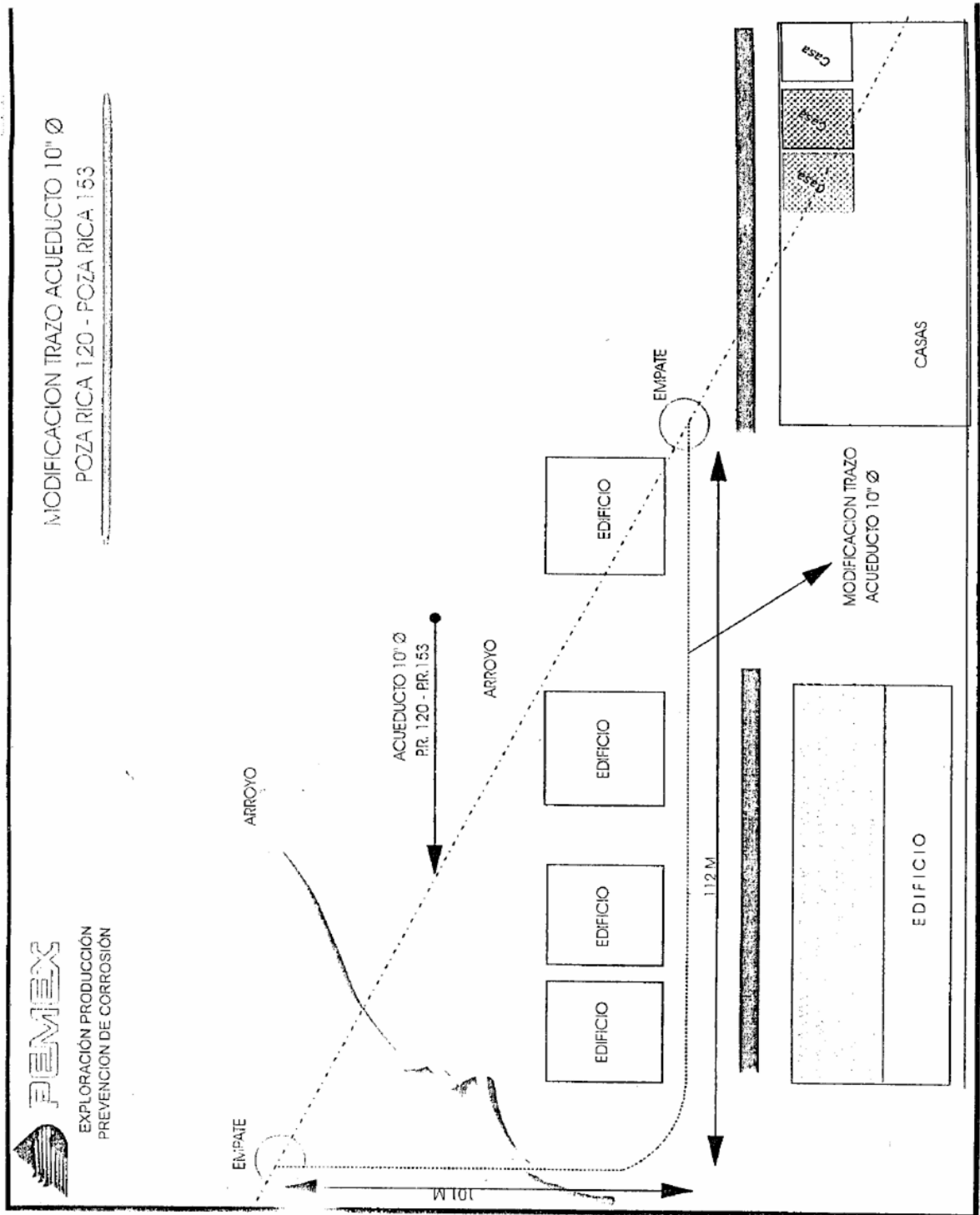
ATENTAMENTE

LIC. LEONEL GONZALEZ DIAZ
INDUSTRIAS MAXIME S.A. DE C.V.

PEMEX
EXPLORACION Y PRODUCCION
3 - NOV 1997
RECEBIDO
SUPERINTENDENCIA GENERAL
DISTRITO POZA RICA

CORREO: Av. Universidad 10624 Poza Rica, Ver. Cód. Postal 20000
Teléfono: Tel. 519 2002, 519 6462, 530 4450. Fax: (525) 519 6201

B. Oficio de solicitud de reubicación de la línea



C. Croquis del derecho de vía inicial en línea punteada y como línea gruesa el arroyo "El Mollejón".



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



CENSO ACTUALIZADO DE LOS ACUEDUCTOS PRINCIPALES DEL ACTIVO INTEGRAL POZARICA -



	Cve. Ubic. Tec. SAP (14)	Origen (1)	Destino (2)	Día m (3)	Servicio (4)	Insp. del D.D.V. (5)	Long. Km. (5)	Especificación (6)	Fecha de Const. (7)	Prestión (8)	Protec. Cat. (11)	Protec. Int. Inhibidores (12)	Inmovilizados
1	NTE-POZ-TZE-LTO-A-LTOB	PLANIA TZ	TB P.R. II	18	ACUEDUCTO	MARZO	8.20	API 5LX-52	77	135 KG/CM ²	80% RECL. 20% ANODOS	NO	909100009
2	NIE-POZ-SIP-Z1B-HRZ-A-153B	I.B. P.K. II	ESCOLIN 153	18	ACUEDUCTO	MARZO	5.20	API 5LX-52	77	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600002589
3	NIE-POZ-SIP-Z70-194-A-153A	ESCULIN 154	PR 153	16	ACUEDUCTO	MARZO	2.50	API 5LX-52	77	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600003933
4	PEP-NIE-POZ-SIP-Z1B-HRZ-A-0154	I.B. P.K. II	ESCOLIN 154	16	ACUEDUCTO	MARZO	2.50	API 5LX-52	77	181 KG/CM ²	ANODOS	NO	600002591
5	NIE-POZ-1ZE-Z70-1ZE-A-0105	PLANIA TZ	PR 105 Y 134 (LT1)	14	ACUEDUCTO	MARZO	2.50	API 5LX-52	63	135 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001604
6	NIE-POZ-1ZE-Z70-LIO-A-LTOA	PLANIA TZ	TB P.R. II	14	ACUEDUCTO	MARZO	8.20	API 5LX-52	64	135 KG/CM ²	80% RECL. 20% ANODOS	NO	600001605
7	NIE-POZ-SIP-Z70-105-A-334A	PK 105 Y 134	PR 334	12	ACUEDUCTO	MARZO	6.00	API 5LX-52	82	135 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001609
8	NIE-POZ-SIP-Z70-153-A-120A	PR 153	PR 120	12	ACUEDUCTO	MARZO	4.50	API 5LX-52	82	135 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001616
9	PEP-NIE-POZ-SIP-Z1B-102-A-0091	ESCULIN 102	ESCOLIN 91	8	ACUEDUCTO	MARZO	5.30	API 5LX-52	77	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600003920
10	NIE-POZ-SIP-Z70-154-A-0019	ESCULIN 154	PR 19	10	ACUEDUCTO	MARZO	2.40	API 5LX-52	82	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600003934
11	PEP-NIE-POZ-SIP-Z71-005-A-0063	ALEMAN 5	P. ALEMAN 63	10	ACUEDUCTO	MARZO	1.90	API 5LX-52	77	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600002017
12	NIE-POZ-SIP-241-105-A-0050	PK 105 Y 134	MECA TEPEC 50	8	ACUEDUCTO	MARZO	3.50	API 5LX-52	66	135 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001608
13	NIE-POZ-SIP-283-153-A-0040	PR 153	TALAXCA 40	8	ACUEDUCTO	MARZO	3.30	API 5LX-52	82	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001618
14	PEP-NIE-POZ-SIP-Z70-ZZZ-A-0153	PR 222	PR 153	8	ACUEDUCTO	MARZO	6.10	API 5LX-52	74	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600001641
15	NIE-POZ-SIP-263-005-A-0040	ALEMAN 5	TALAXCA 40	8	ACUEDUCTO	MARZO	5.40	API 5LX-52	77	180 KG/CM ²	ANODOS	NO	600002019
ZSS 1	PEP-NIE-POZ-CAB-171-BAL-A-0001	ALAMO - I	BAT. ALAMO	4	ACUEDUCTO F.V.	SEPTIEMBRE	0.40	API 15 LR	98	180 KG/CM ²	NO	NO	

D. Características oficiales del acueducto.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



PROGRAMA, S.A. DE C.V.		INSTRUMENTO		LÍMITE ELÁSTICO		COLUMNA		SOMA		Nº PRUEBAS DEL TIPO		LÍMITE ELÁSTICO		ULTIMA PRUEBA		SALIDA		L.C./U.T.		TIPO DE LA PRUEBA	
PROYECTO		CANTIDAD		MATERIA		SECCION		MATERIA		MATERIA		MATERIA		MATERIA		MATERIA		MATERIA		MATERIA	
LOTIF	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO	PROYECTO
1-200	647	21-4	142646	403	58 439	485	70 325	56	0.83	TIPO RECTANGULAR PLANA TYPE STRIP SPECIMEN											
1-200	928	9-3	142647	435	63 047	469	68 014	37	0.93	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	487	10-10	142648	435	63 079	482	69 978	28	0.90	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	411	32-13	142649	456	66 140	523	72 948	26	0.91	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	533	26-16	142650	423	61 607	466	67 642	35	0.91	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	988	36-3	142651	440	63 862	482	69 873	37	0.93	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	937	15-9	142652	442	64 896	476	69 826	37	0.93	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	775	30-8	142653	458	66 399	492	71 425	34	0.93	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	1066	13-9	151415	453	65 636	492	71 344	31	0.92	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	1004	14-6	151417	444	64 338	485	70 391	35	0.91	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	301	22-5	236692	458	65 281	501	72 637	35	0.90	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	30	20-4	256693	455	65 944	498	72 268	33	0.91	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	798	14-3	242829	452	65 591	492	71 378	34	0.92	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	1017	4-17	251218	425	61 576	479	69 534	33	0.89	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	1112	12-9	251212	442	64 127	497	72 143	32	0.89	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											
1-200	1102	1-5	251215	429	62 270	488	70 762	31	0.88	TAMAÑO FIG. 4 SUBCATEGORÍA C (2.5 x 5 SF) FIG. 4 SUBCATEGORÍA E (2.5 x 5 SF)											



CERTIFICAMOS QUE LA TUBERIA AQUÍ DESCRITA CUMPLE Y HA SIDO FABRICADA, MOSTRANDO, PROBABILMENTE INSPECCIONADA DE ACUERDO CON LOS REQUISITOS APLICABLES DE LA ESPECIFICACION ESPECIFICACION API 5L.

47 - EMISSION, MARZO 2004

FECHA EFECTIVA: DICIEMBRE, 2004

API SPECIFICATION: 5L

ING. JESUS RAMIREZ
GERENTE DE CALIDAD Y CONTROL DE CALIDAD

E. Prueba de flexibilidad del acueducto.



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



PROTECCION CATODICA MEXICANA S.A. DE C.V.
 REPORTE DE MEDICION DE ESPESORES POR ULTRASONIDO (UT)

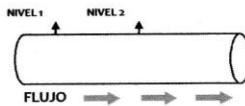
OBRA: "MANTENIMIENTO PARA LA CONSERVACION DE LA CERTIFICACION DEL CORREDOR DE DUCTOS SAN ANDRES Y/U OTROS DEL ACTIVO INTEGRAL POZA RICA - ALTAMIRA".

CONTRATO: 424106848

INSTALACION: POZA RICA 153 - POZA RICA 120 LINEA: ACUEDUCTO DE 12"Ø KM: 2+476
 EQUIPO: NDT SYSTEMS MODELO: TG110 - DL NUMERO DE SERIE: 03082525P FECHA DE CALIBRACION: JUNIO 24 ,2008
 TIPO DE PALPADOR: DUAL MODELO: TG-506P (NDT SYSTEMS) FRECUENCIA: 5 MHz TIPO DE INSPECCION: HAZ RECTO / PULSO - ECO
 PROCEDIMIENTO DE INSPECCION: PGGP 20 FECHA: 6 DE MAYO DE 2009 REPORTE NUM.: 05 HOJA: 1 DE 2

NIVEL	ESPESORES MEDIDOS EN MILESIMAS DE PULGADA								ESPESOR MINIMO	ESPESOR PROMEDIO	ESPESOR DE RETIRO*
	1	2	3	4	5	6	7	8			
SECCION 1											
1	0.432	0.399	0.393	0.357	0.356	0.351	0.421	0.386	0.351	0.387	0.200*
2	0.428	0.405	0.359	0.413	0.367	0.408	0.386	0.398	0.359	0.396	0.200*
3	0.407	0.384	0.401	0.372	0.381	0.380	0.379	0.393	0.372	0.387	0.200*
4	0.399	0.356	0.398	0.41	0.377	0.373	0.373	0.368	0.356	0.382	0.200*
SECCION 2											
1	0.396	0.359	0.373	0.387	0.428	0.453	0.415	0.371	0.359	0.398	0.200*
2	0.387	0.354	0.406	0.396	0.371	0.432	0.400	0.389	0.354	0.392	0.200*
3	0.413	0.371	0.372	0.407	0.401	0.413	0.425	0.399	0.371	0.400	0.200*
4	0.398	0.380	0.394	0.408	0.398	0.422	0.412	0.394	0.380	0.401	0.200*

*ESPESOR LIMITE DE RETIRO POR TABLA, DE ACUERDO A LA NORMA ANSI B.31.3



PUNTOS: 64
 PUNTOS TOTALES: 64

OBSERVACIONES:

[Signature]
 REALIZO
 MARCIAL VIVEROS TEJEDA
 TECNICO NIVEL I UT PROCAMEX

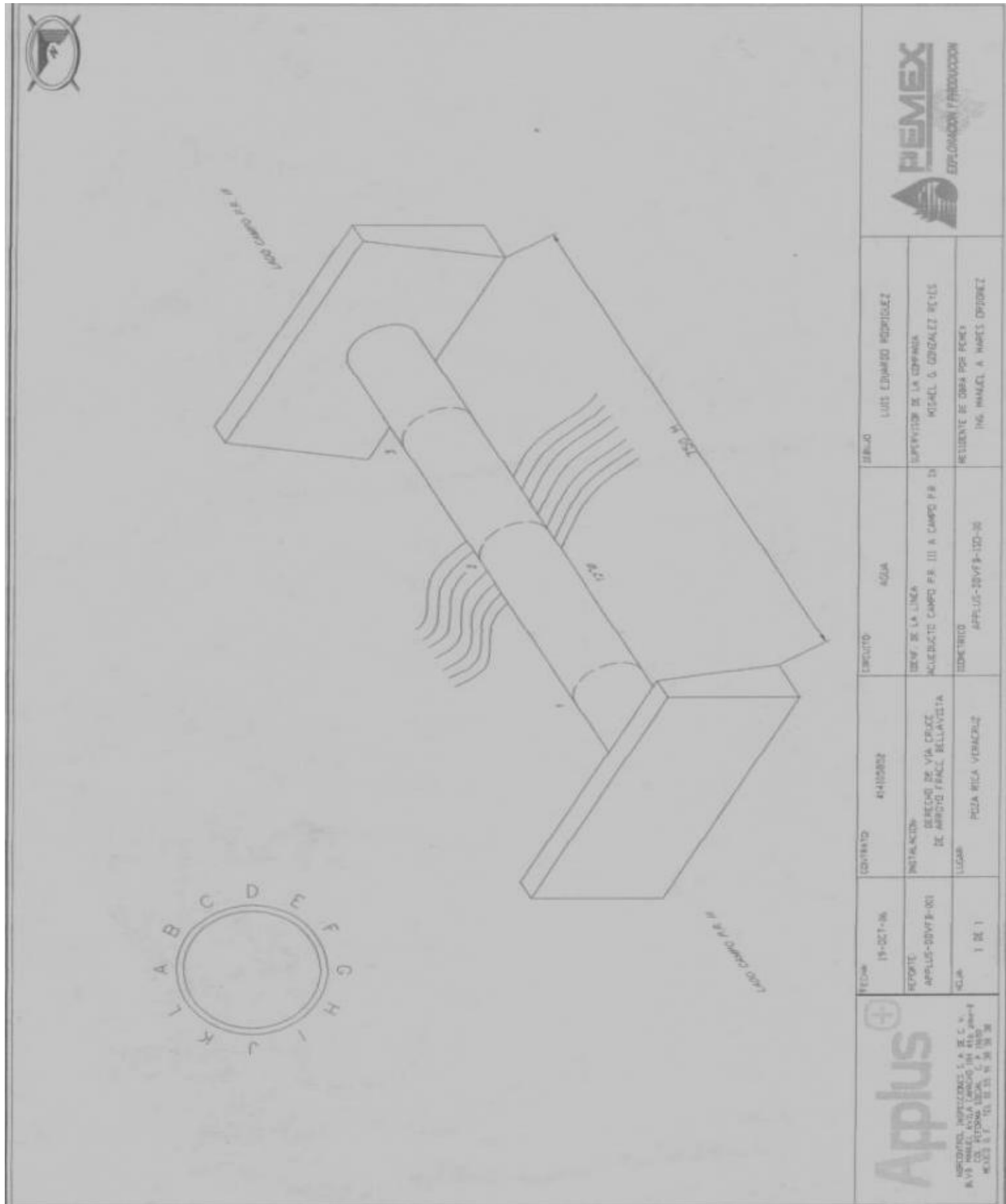
REVISO
 ING. ARMANDO VIVEROS
 SUPTTE.CONST.PROCAMEX

[Signature]
 APROBO
 ING. ROBERTO ENRIQUEZ ESPINDOLA
 RESIDENTE DE OBRA PEP

F. Reporte de Calibración del acueducto tomad en campo (Prueba No Destructiva).



Análisis de los Esfuerzos en un Acueducto Sometido a Cargas Externas e Internas.



G. Croquis de la Calibración del acueducto tomad en campo (Prueba No Destructiva).