

Universidad Nacional de Mar del Plata
Facultad de Ingeniería

Fenómenos de ovalización de cañerías de Polietileno utilizadas en la rehabilitación de oleoductos

Proyecto Final Presentado por:

Andrés Rodríguez

Para otorgar el Grado Académico de:

Ingeniero en Materiales

Directora:

Dra. Patricia Frontini

Co-Director:

Ing. Diego Santiago



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



Índice

Índice	2
Introducción	3
Generación de la idea.....	4
Objetivos.....	5
Objetivos particulares	5
Capítulo I	6
Tubos plásticos.....	6
1.1 Industria y Usos Actuales de Tubos Plásticos	7
1.1.2 Fabricación de Tubos Plásticos	8
1.2. Limitaciones Tecnológicas.....	9
1.3. Soldadura de Tubos Plásticos	9
Capítulo 2.....	12
“Liner” Poliméricos.....	12
2.1 Principal Uso de “liners” Poliméricos	13
2.2 Materiales Usados Para “liners”	14
2.3 Ventajas del uso de “liners” Poliméricos.....	15
2.4 Metodología de Puesta en Servicio y Selección de “liners”	17
2.4.1 “Slip Lining”	17
2.4.2 “Roll Down-Swage Lining”	19
2.4.3 “Formed Lining”.....	20
2.4.4 “Pipe Cracking” o “Bursting”.....	21
Capítulo 4.....	24
Limitaciones Tecnológicas.....	24
4.1 Ovalización	24
4.1.1 Ovalización por acción del peso propio	25
4.1.2 Ovalización por disposición de caños en voladizo.....	26
4.1.3 Ovalización debido a fuerzas de contacto	26
4.2 Colapso plástico en servicio	26
4.2.1 Absorción de gases (swelling)	27
4.2.2 Inestabilidad por pandeo	27
4.2.3 Deterioro del “liner”	28
Capítulo 5.....	29
Comportamiento mecánico del Polietileno	29
5.1 Fluencia en polímeros	29
5.2 Creep y relajación en Polímeros.....	31
Capítulo 6.....	33
Análisis tensional del fenómeno de ovalización	33
6.1 Tipos de solicitaciones.....	34
6.1.1 Tensiones Residuales.....	35
6.1.2 Tubos en voladizo.....	38
6.1.3 Tensiones Inducidas por Despresurización	42
6.1.4 Tensiones Inducidas por Peso Propio	46
Capítulo 7.....	48
Planteo del Problema	48
7.1 Modelo Pequeñas Deformaciones.....	48
7.2 Modelo Para Grandes Deformaciones.....	59
Análisis de Longitud Óptima de Corte	63
Cañería en disposición de Voladizo	64
Conclusiones	66
Apéndice 1.....	68
Referencias Bibliográficas	74

Fenómenos de ovalización de cañerías de Polietileno para la rehabilitación de oleoductos

Introducción

La industria del petróleo y gas hoy en día sigue en continuo crecimiento regido básicamente por el aumento de precio del producto obtenido. Dicho crecimiento hace que no sólo la empresa encargada de la extracción y transporte del hidrocarburo se vea beneficiada, sino también las empresas dedicadas a otras ramas de la ingeniería como lo son: logística, perforación, monitoreo, corrosión, planificación, “piping”, reservorios, etc. Dado que el precio del barril de petróleo esta aumentando, se desarrollan y solventan un sinnúmero de investigaciones para optimizar materiales y procesos, así como nuevas exploraciones y perforaciones.

Este trabajo esta enfocado a la evaluación de problemas presentados en la rehabilitación de ductos que fueron puestos fuera de servicio en el pasado.

En tiempos anteriores, un pozo petrolero sólo era rentable hasta un porcentaje del total del hidrocarburo presente en el reservorio, pues para la total extracción se hacían necesarias tecnologías que no estaban disponibles o que encarecían de tal manera el proceso que lo hacia no rentable para ese entonces, por lo que una vez extraído lo estipulado el pozo era cerrado teniendo todavía más de la mitad del hidrocarburo. Actualmente nuevas tecnologías desarrolladas como la extracción secundaria y terciaria hacen posible que viejos pozos sean reabiertos para continuar con la extracción. En consecuencia la rehabilitación de viejos ductos toma un papel principal.

Una de las maneras para rehabilitar ductos es por medio de “liners” poliméricos. Los “liners” son tubos plásticos inertes a la corrosión electroquímica que son introducidos dentro de los viejos caños metálicos, y de esta manera actúan como una barrera física para evitar el total deterioro de este. En la industria petrolera el fluido transportado rara vez se encuentra sometido a altas presiones, contrariamente a lo que ocurre en la industria del gas. Es por eso que este sistema es factible por el ahorro de dinero y el tiempo con que es posible llevarlo a cabo correctamente.

Generación de la idea

La idea de la realización de este proyecto surge a raíz del problema ocurrido en una empresa encargada de la extracción y transporte de petróleo crudo la cual opera en el sur de nuestro país, específicamente en Tierra del Fuego.

Esta empresa decidió rehabilitar sus “flowlines”. Para ahorrar tiempo de operación evitando desenterrar los ductos viejos y reemplazándolos por nuevos, se toma como una operación económicamente viable introducir dentro de las viejas cañerías “liners” poliméricos que actúen como barrera entre el hidrocarburo y el caño metálico ya deteriorado, impidiendo el agotamiento total de su funcionalidad.

En el transcurso de la operación surge un imprevisto ajeno al procedimiento de rehabilitación, por lo que deben suspenderse las tareas por un tiempo de aproximadamente 6 meses.

Durante ese tiempo los caños “liner” quedan día y noche a la intemperie, es decir expuestos a las variadas condiciones climáticas imperantes en el territorio fueguino. Muchos de estos caños “liner” quedan colocados sobre el suelo a la vera del lugar donde deberían haber sido soldados, mientras que otros permanecieron todo ese tiempo empaquetados por medio de zunchos.

Cuando la obra se retoma para la finalización, los técnicos encargados de llevar a cabo la soldadura a tope se encuentran con que los caños “liner” no son admitidos por la máquina de soldadura, pues está calibrada de manera tal de soldar solamente caños plásticos donde la redondez no varíe más de un pequeño porcentaje.

El fenómeno de ovalización se encontraba presente en los caños “liner” colocados sobre el suelo, mientras que no ocurría lo mismo en los caños que todo el tiempo de parada de obra estuvieron empaquetados.

Debido al problema los ingenieros de operación toman como solución válida cortar ambos extremos de los “liners” hasta cierta longitud donde la máquina de soldadura permita una correcta unión.

Dicha solución trae aparejado un excesivo desecho de material y por consiguiente, número de caños insuficientes para concluir la obra.

Objetivos

El objetivo del proyecto es poder determinar las causas que llevaron al proceso de ovalización y daño de los caños plásticos, analizando las posibles causas y tomando como inicio del análisis la fabricación y como punto final la puesta en servicio de éstos. Se tomará como crítico cualquier punto intermedio de dicha secuencia que pueda colaborar o contribuir a alguna situación comprometida con la integridad o la correcta funcionalidad en el futuro.

Objetivos particulares

- Predecir el grado de ovalización sufrido por “liners” de diferentes diámetros y espesores.
- Predecir la ovalización en función de la longitud del “liner” y del tiempo de almacenamiento.
- Determinar el tiempo máximo de estiba para una correcta soldadura a partir de los parámetros y especificaciones técnicos de la máquina soldadora.

Capítulo I

Tubos plásticos

Los tubos plásticos poseen una amplia variedad de aplicaciones y más aun en la actualidad donde áreas de servicio diferentes se vuelcan al uso de este tipo de materiales, lo que no ocurría en el pasado por la superioridad de propiedades presentadas por los metales.

Los usos de los tubos de plástico giran alrededor del transporte de gases, líquidos y compuestos químicos mientras operan bajo presión interna y externa en un amplio rango de terrenos y ambientes. Las ventajas principales de los tubos plásticos son la resistencia química a una gran variedad de compuestos, la fácil manipulación y transporte, su bajo peso, ductilidad, facilidad de conexión y soldadura, etc.

Los sistemas de cañerías plásticas para distribución de agua y gas, sistemas de drenaje, protección de cables de comunicación, e instalaciones industriales constituyen las líneas de vida de varias industrias y comunidades.

Cañerías existentes de varios miles de kilómetros de longitud alrededor del mundo hechas de materiales metálicos, poliméricos, compuestos y concreto llevan a cabo su función vital con varios grados de eficiencia, pero generalmente con alto grado de seguridad. En muchos casos estos sistemas ya han excedido su vida de diseño y son propensos a un daño potencial o a sufrir fallas, por lo que es necesario tomar medidas de reemplazo o de rehabilitación^{1,2}.

Reemplazar un caño metálico o de algún otro tipo de material por un caño plástico parece una decisión difícil por lo que el común de la gente piensa, pero actualmente cada vez son mas cantidad los casos donde la elección se vuelca a lo segundo por el buen desempeño presentado en diferentes áreas y por el ahorro de dinero y tiempo que representa su uso³.

1.1 Industria y Usos Actuales de Tubos Plásticos

La industria de los tubos plásticos va de la mano con el crecimiento de la industria de los polímeros, si bien la gran parte de la industria de los polímeros no esta dedicada a fabricar tubos, la demanda de tubos y perfiles plásticos se incrementó considerablemente en América Latina en el año 2006⁴.

El fenómeno se explica como resultado de los esfuerzos públicos y privados de la región latinoamericana por aumentar las redes de agua potable, saneamiento y gas fomentando de esta manera el desarrollo de la sociedad, y crear condiciones de vida favorables para los millones de latinoamericanos que carecen de estos recursos básicos. Igualmente, el repunte de los precios internacionales de petróleo y gas ha intensificado la exploración, explotación y transporte de dichos combustibles. Todos estos proyectos implican la utilización de tuberías y por lo tanto impulsan el crecimiento del sector.

En forma paralela al dinamismo del mercado en 2005, 61% de las empresas fabricantes de tubos plásticos consultadas⁵, reveló un aumento de la rentabilidad en ese año; el restante 39% informó sobre estabilidad en la rentabilidad de la empresa. No obstante, los mayores resultados en rentabilidad y ventas no se ven reflejados en incrementos de materia prima procesada. Lo anterior puede estar relacionado con una disminución en los inventarios de materia prima ya que la utilización de la capacidad instalada pasó de 63% en el año 2004 a 67,51% en el 2005⁶.

En el mismo sentido, otro dato que resulta alentador es el referente a las exportaciones. En 2004 las empresas del sector que venden a otros países reportaron exportaciones por 21.246 toneladas. En el 2005, 54% de las empresas exportadoras registraron aumentos significativos de las ventas en toneladas.

La empresa chilena Plastecnia, por ejemplo, reportó un aumento de las exportaciones de 300%. Igualmente, las colombianas Gerfor y Celta incrementaron las exportaciones en 260% y 290% respectivamente y la argentina Steel Plastic en 200%.

Sin lugar a dudas, los comportamientos favorables de 2005 permitieron la inversión. El 46% de las empresas consultadas⁵ invirtieron en maquinaria y equipo, mientras que el 54% incrementaron su planta de personal.

La dinámica del mercado ha llevado también a mejorar la gestión de calidad de las empresas, lo que garantiza el acceso a mercados diferentes al doméstico. Es por esto que casi en su totalidad las compañías productoras de tubos plásticos en la región cuentan ya con Certificados de Calidad o están en proceso de conseguirlo. El 58% están certificadas con ISO 9001, de la misma manera varias compañías cuentan con certificados ISO 9002 e ISO 14000.

Frente al creciente dinamismo actual y a las perspectivas positivas de comportamiento del mercado de tubos plásticos en la región para los próximos años, las empresas deberán profundizar en sus procesos de actualización tecnológica y mejoramiento continuo.

La gestión de procesos de calidad y la obtención de certificaciones ISO se convierten en una necesidad urgente para participar en mercados diferentes al doméstico y ampliar los horizontes frente a una demanda creciente en todo el continente.

De la misma manera, la capacitación y el entrenamiento, el énfasis en mercadeo y ventas y las alianzas estratégicas, especialmente para las pequeñas y medianas empresas del sector, tenderán a aumentar en la medida en que se haga cada vez más fuerte la competencia tanto en los mercados domésticos como en los de industrias de proyección internacional.

1.1.2 Fabricación de Tubos Plásticos

Los caños de PE, PP y PVC son fabricados por el método de extrusión, haciendo pasar material ablandado por efecto de la temperatura a través de un cabezal especialmente diseñado. Una vez obtenida la forma deseada esta es subsecuentemente enfriada en un baño de agua. Es razonable pensar que en el proceso de extrusión orienta las cadenas poliméricas a medida que el material sale de la máquina, de esta manera el material se vuelve anisotrópico. Es por esta razón que las propiedades a la tracción de un elemento del caño en la dirección del eje superarían al de un elemento obtenido circunferencialmente. Sin embargo esto no parece ser del todo cierto, por lo menos en el caso de caños de HDPE de gran diámetro de pequeño espesor, donde diferentes estudios han establecido que existe una diferencia insignificante en las propiedades a la tracción entre la dirección circunferencial y longitudinal. El proceso de fabricación

es continuo y la longitud del caño es limitada solo por consideraciones prácticas. Los caños extruidos pueden ser enrollados dependiendo principalmente de su diámetro obteniéndose un producto libre de juntas. Con una planta móvil es posible obtener el producto con una longitud que puede llegar hasta los 5 Km.⁷

1.2. Limitaciones Tecnológicas

Las limitaciones tecnológicas residen principalmente en el comportamiento viscoelástico propio de los materiales plásticos, y su directa dependencia de las propiedades mecánicas frente a la temperatura, envejecimiento y sollicitaciones. De esta manera se trata de restringir su uso solo a ambientes o condiciones que permitan una extensa durabilidad con una correcta funcionalidad, esto rara vez se cumple y variaciones propias de los procesos en los cuales tuberías plásticas están siendo utilizadas llevan a daños prematuros o fallas indeseables que no se tienen en cuenta en las etapas de diseño.

Es posible evitar este tipo de limitaciones eligiendo correctamente el material polimérico apropiado para cada uso.

La gran variedad de materiales poliméricos usados para fabricar tubos hace que existan tipos y grados de estos materiales con una amplia gama de resistencias mecánicas, a la temperatura y tipos de solventes. Por lo que debe conocerse a priori las condiciones de trabajo y las posibles fluctuaciones en ella, para que el desempeño del material plástico elegido sea satisfactorio

1.3. Soldadura de Tubos Plásticos

Durante años recientes varios métodos de soldadura de caños fabricados a partir de poliolefinas fueron desarrollados. Actualmente los dos métodos más usados son:

- Soldadura a tope (“butt weld”)
- Electrofundición.

En el caso de la utilización de caños de gran diámetro es usual el método de termo fusión (“butt weld”), en cambio la electrofundición es usualmente usada en instalaciones domésticas, por el tipo de equipamiento necesario.

El proceso de soldadura a tope involucra una máquina que toma y enfrenta los finales de los caños a ser soldados, siguiendo por un calentamiento

hasta el punto de fusión de cada una de las terminaciones por separado. El proceso concluye una vez que alcanzada la temperatura de fusión las terminaciones de los caños son juntados y se les aplica una presión exterior por medio de la misma máquina (**Figura 1**).

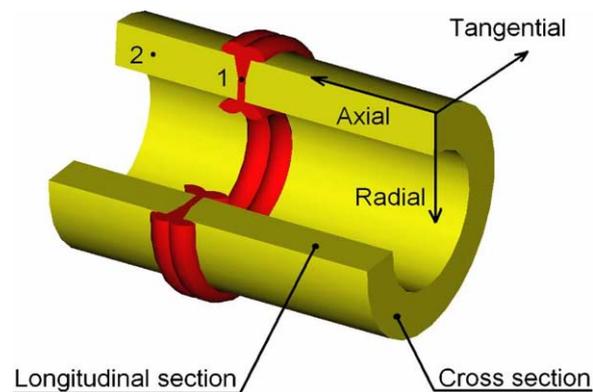


Figura 1: Esquema de una junta soldada a tope

Este método es el usado en soldaduras en campo para tramos de cañerías de medio a gran diámetro, que son transportados apilados hasta el lugar donde se pondrán en servicio.

La soldadura a tope realizada correctamente presenta una resistencia en la unión comparable con la del material del caño que no fue expuesto a ningún proceso térmico⁸. Cada uno de los parámetros involucrados en el proceso es crítico. Es por esta razón a continuación se detallara de forma simple pero detallada el proceso de soldadura a tope.

El tiempo de calentamiento, temperatura y presión son ajustadas de acuerdo a las propiedades físicas del material. Tanto la temperatura como la presión deben ser cuidadosamente chequeadas y adaptadas para el material actual, diámetro del caño y espesor de pared.

Los pasos principales del proceso de fusión son graficados en la **Figura 2**, donde la presión (expresada como tensión compresiva en la pared del caño), es dada como una función del tiempo.

El procedimiento comienza cuando el elemento de calentamiento (“el espejo”) ha alcanzado la temperatura de fusión del material a soldar. Con el espejo colocado entre los dos finales de los caños, primero una alta presión (p_1) es aplicada, la duración de esta t_1 , es elegida de manera que toda la superficie

FACULTAD DE INGENIERIA

de contacto sea alcanzada entre el espejo y los extremos finales de los caños. Luego una muy baja (casi cero) presión (p_2) es mantenida constante durante un tiempo t_2 .

Este tiempo es una función del espesor de pared del caño y un poco de la longitud. Un error común es que el tiempo t_2 sea elegido muy corto, de manera que la profundidad del material fundido es insuficiente cuando la presión de soldadura p_3 es aplicada. También es importante que la presión p_3 no sea tan alta como para que el material fundido quede aparte y una soldadura en frío pueda ocurrir.

El tiempo t_c es una parada del proceso, donde se produce una caída de la presión a cero, el espejo de calentamiento es removido y los finales del caño son colocados enfrentados. Este tiempo es crítico, como luego el material fundido es libremente expuesto al aire se corre el riesgo de oxidación térmica y enfriamiento de los finales del caño. Por estas cuestiones es de vital importancia que este tiempo sea lo mas breve posible así de esta manera podremos asegurar en gran medida una correcta soldadura.

El tiempo t_u es el tiempo durante el cual se aumenta la presión hasta que llega a la presión de soldadura p_3 . El salto de presión deberá ocurrir levemente y no tan abrupto. La presión de soldadura p_3 es la misma magnitud que p_1 y deberá mantenerse constante durante un tiempo de enfriamiento t_3 . Se verifica que la duración del tiempo de enfriamiento tiene una influencia significativa en la calidad de la soldadura. Una inquietud común es la elección de este tiempo lo mas corto posible en un esfuerzo para aumentar la capacidad de junta del caño.

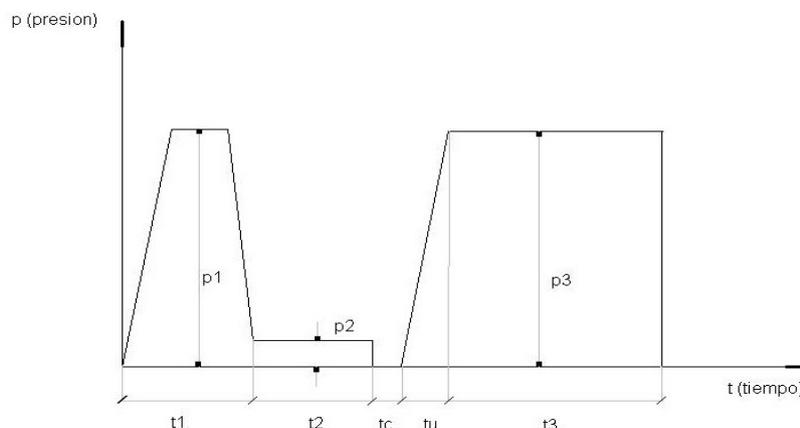


Figura 2: Grafico del procedimiento de soldadura a tope.

Capítulo 2

“Liners” Poliméricos

Los “liners” son tubos que se colocan en el interior de las tuberías metálicas para protegerlas del desgaste y la degradación electroquímica. Si bien es un proceso simple y de muy fácil comprensión la manera en que el tubo plástico actúa como una barrera física para evitar la degradación metalúrgica, muchas veces este tipo de sistemas no es económicamente factible para tuberías que nunca estuvieron en servicio. Por lo cual con un correcto diseño de planes de mitigación y monitoreo de la corrosión, se ve subsanado el alto costo inicial de utilizar este tipo de tecnologías.

Este punto de vista cambia drásticamente cuando sistemas de cañerías en servicio empiezan a reportar fallas o por medio de ensayos no destructivos (END), se detectan defectos o daños y considerables que ponen en juego la continuidad del servicio de esta. En este momento de la vida en servicio del ducto se toma la decisión de si es posible la rehabilitación, o por el contrario, el reemplazo⁹.

La respuesta a esta pregunta de compromiso es, no solo económica, sino, lo es también del tiempo requerido para el reemplazo. No debemos olvidarnos que generalmente los ductos de transporte de diferentes fluidos se encuentran enterrados por los que su reemplazo implica desenterrar el viejo ducto con maquinaria pesada, traer los tramos del nuevo ducto para ser soldado y luego enterrarlo nuevamente, este proceso puede durar de días a semanas con el costo de lucro cesante que esto implica.

La respuesta correcta por el lado económico y de tiempo, es la rehabilitación donde solamente deben de ser desenterrados lugares estratégicos en la traza, evitándose por ejemplo cortes de tránsito en lugares poblados. En este caso si el ducto a ser rehabilitado es de gran diámetro el “liner” polimérico se transportan en tramos que pueden llegar a los 20 metros de longitud, los cuales son soldados a tope previo a introducirlos en el ducto a ser rehabilitado (**Figura 4**), mientras que si son de pequeño diámetro, lo pueden hacer enrollados en carretes o carreteles de gran diámetro evitándose gran parte del tiempo requerido en la soldadura¹⁰(ver **Figura 3**). Existen en la actualidad una gran variedad de

metodologías para la puesta en servicio, estas van a ser detalladas en profundidad en el transcurso de este capítulo.



Figura 3: “: Rehabilitación con caño de pequeño diámetro



Figura 4: Rehabilitación con caño de gran diámetro

2.1 Principal Uso de “liners” Poliméricos

La función del “liner” es la de actuar como una barrera física a agentes que degradan la aptitud para el servicio de ductos. Es por eso que industrias como la minera, petroquímica, y petrolera entre otras, hacen un uso corriente de estos “liners”, pues los fluidos transportados por estas son altamente perjudiciales y afectan directamente al metal base del ducto.

En la industria minera es muy importante su uso para evitar el daño tribológico presente cuando son transportados minerales en corrientes de líquidos a altas velocidades, mientras que en el caso del petróleo y el gas, con este método se evitan incrustaciones de sales, minerales y parafinas provenientes de aguas de inyección de pozo¹¹, se mejora el transporte del fluido, dado que al tener mejores propiedades superficiales que el acero comúnmente usado en la construcción de ductos, se genera una menor pérdida de carga¹² optimizando así el consumo de las bombas. Por otro lado en las partes donde la topografía de la traza del ducto permite puntos bajos, la acumulación de líquidos y sedimentos que genera ambientes propicios para los procesos corrosivos dejaría de ser un problema¹³.

2.2 Materiales Usados Para “liners”

La elección de un material para realizar “lining” con un grado alto de eficiencia depende en primer lugar de hacer un estudio de las condiciones del proceso para el cual se destinará. Una limitación principal para el uso de “liners” es la temperatura y la presión de operación. La temperatura provoca una disminución en las propiedades resistentes, mientras que un material plástico sometido a una presión interna o externa constante, protagoniza un proceso de deformación continua denominado Creep, del que hablaremos en mayor detalle en el *Capítulo 3*. La siguiente figura indica los factores que es necesario tener en cuenta en la elección del material¹⁴.

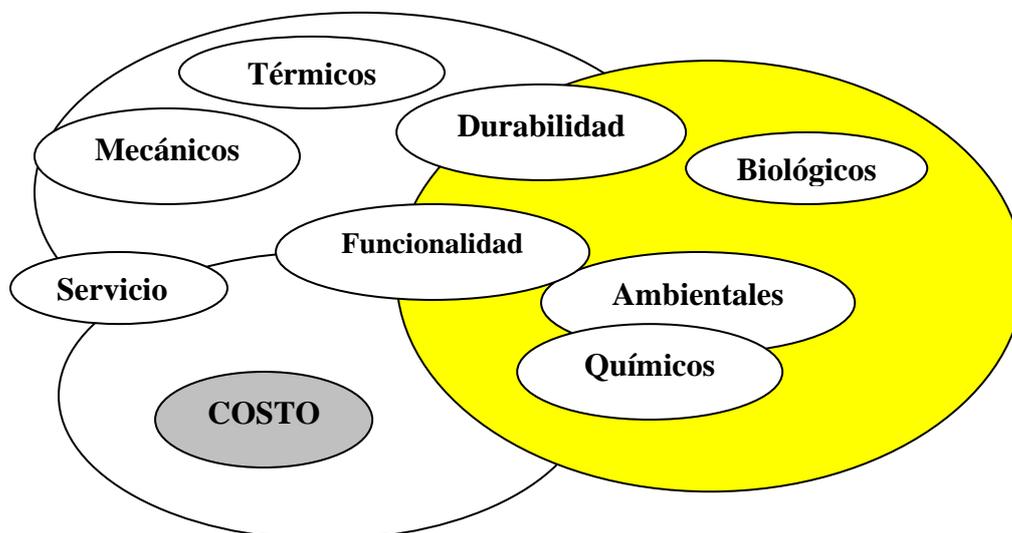


Figura 5: Requerimientos de diseño.

En el mejor de los casos es posible satisfacer en gran medida un gran porcentaje de los requerimientos, pero en el caso de esto no ser posible, se debe hacer una evaluación de los riesgos involucrados en caso presentarse una falla, y ponderar el grado de requerimiento para hacer una correcta elección

Los materiales que nombraremos como los principales en uso actual son los compuestos reforzados y el polietileno de alta densidad, las diferencias entre el primero y el segundo radica principalmente en las condiciones para las que se los elige y en segundo lugar en el precio.

Los “liners” manufacturados de materiales compuestos son los que presentan el mayor costo, esto se debe al valor de las materias primas, y al

FACULTAD DE INGENIERIA

proceso de fabricación que consta de varias etapas. La fabricación se hace por el método de “*filament winding*” y las fibras son las encargadas de soportar la presión interna a la que se encuentra sometida el caño. Este tipo de “liners” se usan cuando el grado de deterioro del caño a ser rehabilitado es muy grande y lo son también las presiones de operación. Muchas veces actúa en conjunto con un “liner” interno de material termoplástico, pues existen condiciones en donde es posible la degradación del material compuesto pues puede ser atacado por el fluido transportado. Condiciones extremas de presión y temperatura del proceso requieren el uso de compuestos. La **Figura 6** muestra un esquema de este tipo de “liners”.

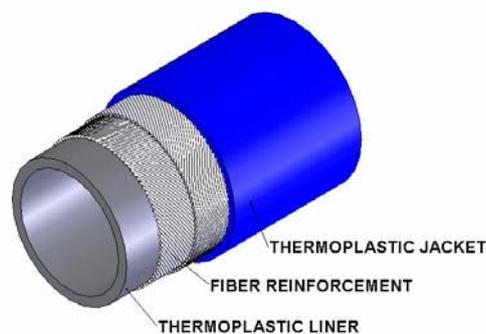


Figura 6: “Liner” de material compuesto.

Los “liners” fabricados de polietileno de alta densidad son los de mas bajo costo, fáciles de procesar, pero están limitados con respecto a su temperatura máxima de operación (60°C). Las presiones de operación están muy por debajo a las que son usadas comúnmente con “liners” de materiales compuestos. Este tipo de “liners”, combinan la resistencia química del polietileno con la resistencia mecánica del acero una vez instalado.

2.3 Ventajas del uso de “liners” Poliméricos

Las ventajas del uso de “liners” para la rehabilitación de ductos, no solo radica en evitar el total deterioro del caño por efectos corrosivos aumentando la vida en servicio muy por encima de su vida de diseño, sino también es posible atribuirle ventajas a estos en lo que respecta a eficiencias de flujo.

Los “liners” poliméricos poseen una superficie mucho mas lisa que el caño metálico que va a ser rehabilitado, por lo que es menos probable que se formen

FACULTAD DE INGENIERIA

depósitos y si estos son formados es mucho más fácil removerlos. La superficie lisa reduce considerablemente las caídas de presión comparadas con el caño corroído, esto beneficia luego la eficiencia en el proceso de bombeo de los diferentes fluidos transportados. La **Tabla 1** compara las rugosidades superficiales de varios materiales con los que se fabrican caños.

Material	Rugosidad de Superficie Interna Típica.(mm)
Caño de Acero, nuevo	0.04
Caño de Acero, Rugoso	0.4
Caño de acero, muy rugoso o corroído	3.35
Caño de acero, pintado internamente	0.004
Caño de Polietileno	0.001

Tabla 1¹⁵: Rugosidad interna de ductos.

La **Tabla 2** compara las pérdidas de carga para caños de 36" de diámetro interno, obtenidos a partir de ensayos de campo para caños de diferentes materiales.

Material	Coefficiente de flujo Hazen -Williams	Caudal (m ³ /seg)	Velocidad (m/seg)	Perdida de carga (KPa/7000 m)
Polietileno	150	2.0	3.22	431
Acero nuevo ligeramente rugoso	125	2.0	3.22	608
Acero usado, rugosidad promedio	100	2.0	3.22	921
Acero usado, altamente corroído	75	2.0	3.22	1568

Tabla 2¹⁴: Perdida de carga.

Comparando los valores tanto de rugosidad como de pérdida de carga de las tablas mostradas arriba se puede concluir lo ventajoso de su uso en lo que respecta a los procesos de bombeo.

Otra de las ventajas reside en lo ambiental ya que actualmente es una prioridad hacer planes de integridad y monitoreo para evitar cualquier fuga que pueda ser perjudicial con el medio ambiente. Es por esto que para realizar

eficazmente una rehabilitación, esta se debe llevar a cabo antes de que se detecten pérdidas de fluido, asegurando de esta manera un correcto cumplimiento de las reglamentaciones ambientales¹⁶.

2.4 Metodología de Puesta en Servicio y Selección de “liners”

“Relining” como comúnmente se denomina al procedimiento de rehabilitar o poner en servicio cañerías ya existentes mediante caños de material plástico, puede llevarse a cabo de varias formas: “Slip Lining”, “Roll Down” o “Swage Lining”, “Pipe Cracking”, “Folded” y “Formed”, son algunas de las opciones más populares. Dicho rango de opciones permite que se seleccione la adecuada para una aplicación específica. En algunos casos los “liners” utilizan cierto tipo de contención desde el caño a ser rehabilitado, mientras que en otros casos el caño resiste las solicitaciones del servicio solo.

A continuación se describirán brevemente los métodos nombrados, que son los mas usualmente usados para rehabilitación, esta claro que no solo estamos hablando de oleoductos, sino también de los caños plásticos que presentan otro tipo de usos.

2.4.1 “Slip Lining”

“Slip Lining” es probablemente la opción mas simple cuando se realiza una rehabilitación utilizando “liners”, esto involucra generalmente introducir un caño nuevo dentro de otro de pobre prestación. Los caños de polietileno son los elegidos para esta técnica, por su bajo modulo de elasticidad. Estos pueden encontrarse enrollados en carretes o simplemente como caños rectos. Los caños enrollados generalmente son de diámetros pequeños y se encuentran disponibles en varios diámetros (<180mm de diámetro nominal). En tamaños mas grandes la habilidad del PE a ser soldado presenta sobre otros polímeros una ventaja que lo diferencia. La flexibilidad de la junta soldada y la resistencia a la abrasión del PE conforman un sistema que permite que el “liner” sea colocado dentro del viejo caño fácilmente y sin presentar daño¹⁷, incluso en sistemas de cañerías que presentan curvas. Para la utilización de esta técnica es necesario limpiar la superficie interna del caño viejo y eliminar cualquier tipo de obstáculo que pueda impedir el deslizamiento del “liner” dentro del caño. Esta limpieza es llevada a

cabo mediante un scrapper (**Figura 7**) u otro dispositivo diseñado a tal fin. Una vez limpia la superficie y libre de obstáculos se coloca en el extremo del “liner” un dispositivo metálico que posee una oreja (**Figura 8 y 9**) donde se sujeta firmemente un cable metálico que fue previamente pasado por el interior del viejo caño. La función del cable metálico es la de ejercer tensión y de esta manera hacer que el “liner” se introduzca dentro del viejo caño.

La principal ventaja de esta técnica es que solamente se debe tener contacto con el caño enterrado en el punto donde se introduce el “liner” y al final de la línea (**Figura 10**), esto implica lógicamente un ahorro considerable de trabajo y tiempo.

Una limitación del método en comparación de otros que veremos mas adelante es el espacio anular que queda entre el “liner” y el viejo caño que con el paso del tiempo y el fluido transportado puede causar problemas que se analizaran en el transcurso de este trabajo.



Figura 7: Scrapper de limpieza

Figura 8 y 9: dispositivos de sujeción

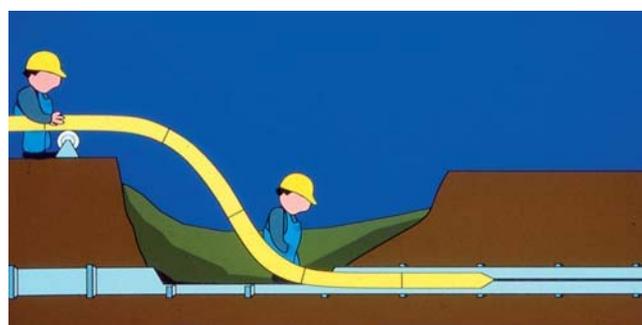


Figura 10: Sliplining

FACULTAD DE INGENIERIA

Este método presenta la desventaja de permitir un espacio anular entre el caño a ser rehabilitado y el caño termoplástico. Esto genera que moléculas de pequeño peso molecular difundan a través del caño plástico, provocando aumentos de presión en el espacio libre. La solución es rellenar el espacio anular con otro material, como pueden ser: cemento puzolánico, resinas y espumas. Por lo general este tipo de caños sin espacio anular son entregados así fabricados y no son hechos in-situ. Su costo es elevado y se usan solo para ambientes altamente corrosivos. La **Figura 11** a continuación muestra un caño con relleno de cemento puzolánico en el espacio anular.



Figura 11: Cemento puzolánico en espacio anular

2.4.2 “Roll Down-Swage Lining”

Este proceso reduce temporariamente el diámetro del “liner” al pasar a través de un cabezal o rodillos justo antes de ser introducido dentro del viejo caño (**Figura 12**). Típicamente, esta reducción es del orden del 10 al 15 % del diámetro. Una vez que el “liner” es colocado este vuelve a sus dimensiones originales debido a las propiedades elásticas del material, en algunos casos este proceso es asistido por aplicación de presión interna al “liner” (**Figura 13**). Este método presenta la ventaja de maximizar el diámetro interno al disminuir al máximo el espacio anular entre el “liner” y el viejo caño.

Este método es extensamente usado en Europa en aplicaciones de presión y suministro de agua en diámetros que exceden 1100mm.

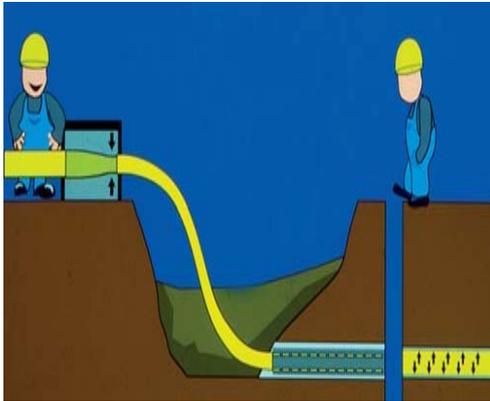


Figura 12: Reducción de diámetro

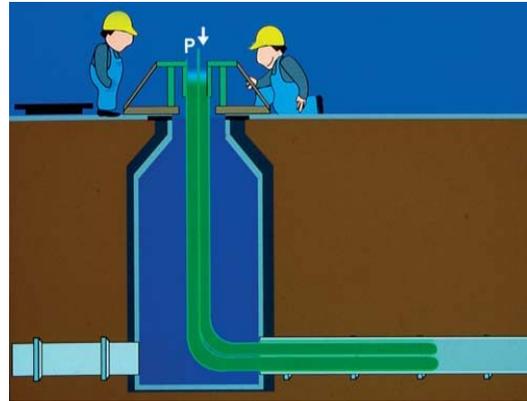


Figura 13: Aplicación de presión

2.4.3 “Formed Lining”

En este proceso el “liner” es primero doblado en forma de “U” o “C” antes de ser insertado dentro del viejo caño (**Figura 14**). En algunos casos el “liner” es doblado en la fábrica y luego es enrollado, mientras que en otros casos (normalmente en caños de gran diámetro) el “liner” puede ser doblado in-situ, inmediatamente antes de ser insertado dentro del viejo caño. Esta técnica reduce considerablemente la fuerza de tirado dentro del viejo caño. La forma del “liner” es recuperada, por calentamiento, presión o la inserción de algún dispositivo (**Figura 15**).

La principal desventaja presentada, es el poco espesor de pared que es requerido para poder doblar el “liner” sin que se deforme plásticamente con la consiguiente disminución posterior en las propiedades.



Figura 14: Inserción en "Formed Lining"

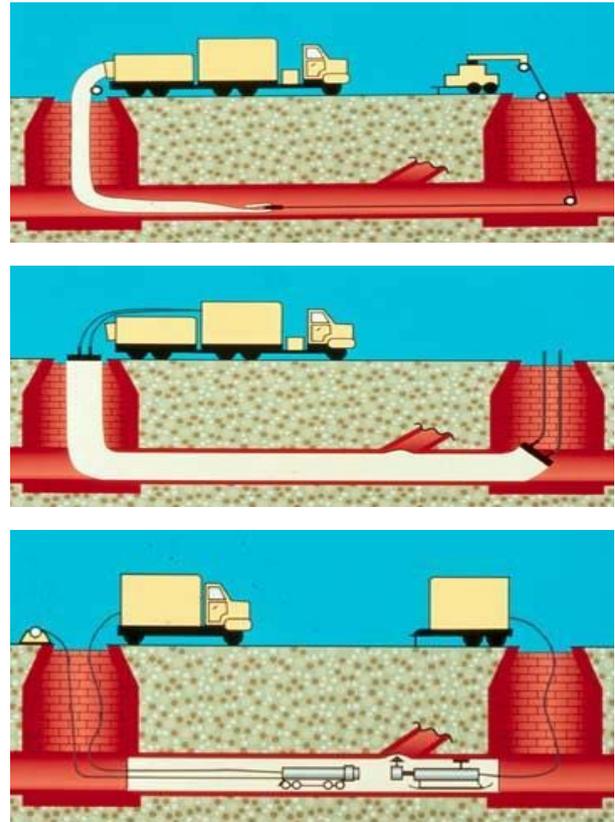


Figura 15: Procedimiento de "Formed Lining"

2.4.4 "Pipe Cracking" o "Bursting"

De los métodos nombrados, este es el único que no es utilizado en la rehabilitación de un viejo caño, por el contrario, utiliza una línea ya existente y se coloca en su reemplazo un nuevo caño plástico de igual o mayor espesor.

Este método es muy ventajoso, pues para reemplazar un caño no es necesario hacer nuevas excavaciones, sino que utiliza el lugar físico utilizado por la vieja línea, evitándose los problemas que causaría en lugares poblados, o con muchos caños enterrados. La introducción del caño plástico se hace luego de que un cilindro hidráulico o neumático que rompe el viejo caño inmediatamente el nuevo caño es colocado. En las **Figuras 15 a 19** se esquematiza el procedimiento.



Figura 15: Funcionamiento del proceso de “Crack Bursting”.



Figura 16: Colocación del cabezal de tirado



Figura 17: Sujeción del caño.



Figura 17 y 18: Procedimiento de "Crack Bursting".



Figura 19: Introducción del caño plástico dentro de la vieja línea.

Capítulo 4

Limitaciones Tecnológicas

Las limitaciones de estos revestimientos responden a tres causas principales: el primero es relativo a la naturaleza viscoelástica con el que se fabrican estos y a partir de esta primera limitación surge la segunda que es la permeabilidad que muchas veces presentan estos materiales a los gases, ya que generalmente el fluido transportado por el conjunto caño “liner” es multifásico. El tercer grupo en el conjunto de limitaciones surge a partir de la reducción de sección del ducto lo que se ve reflejado directamente en el caudal transportado.

4.1 Ovalización

La ovalización es el proceso por el cual una pieza de forma redonda pierde esta geometría, como resultado de la disminución del diámetro en sentido vertical y un aumento en el diámetro horizontal. La **Figura 20** esquematiza el fenómeno real de ovalización:

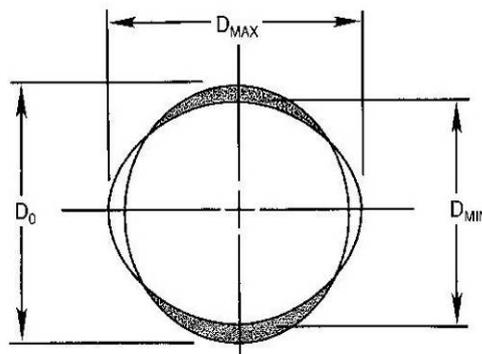


Figura 20: Diagrama del fenómeno de ovalización

Debido a la naturaleza viscoelástica los “liners” pueden presentar problemas de ovalización por acción de su propio peso, lo que es función de sus dimensiones (diámetro, espesor de pared), así como de la forma en que estos son almacenados hasta entrar en servicio. A continuación se enunciarán brevemente algunas de las causas principales del proceso de ovalización que luego serán desarrollados en profundidad en la resolución del problema (**Capítulo 6 y 7**).

4.1.1 Ovalización por acción del peso propio

El proceso de ovalización cuando la única sollicitación es la de las fuerzas gravitacionales se ve influenciado directamente por el diámetro el espesor de pared y las propiedades del suelo donde el “liner” se encuentre apoyado. La peor de las situaciones se da cuando se apoyan sobre un suelo duro esto es decir de alto módulo caños plásticos de gran diámetro y de pequeño espesor. La explicación del fenómeno es que al ser el suelo muy duro este no es deformado cuando el caño es apoyado, lo que genera un área de contacto muy pequeña, entonces el peso del caño no se distribuye y genera grandes tensiones que se ven reflejadas en altos momentos flectores en los ejes del caño, generando el fenómeno. Es común cuando se trabaja con este tipo de caños de grandes dimensiones colocar soportes internos que mantengan el caño circular para evitar el colapso y que el caño o parte de este quede inutilizado (**Figura 21**). Otra forma para mitigar el fenómeno que es usado comúnmente es humedecer el suelo donde el “liner” va a ser apoyado, o la colocación de camas de arena, estos métodos son usados para aumentar el área de contacto y disminuir las tensiones generadas.

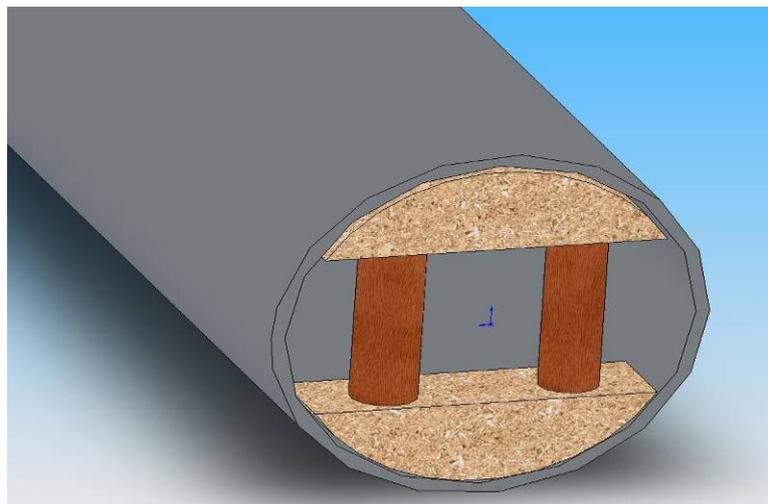


Figura 21: Esquema de los soportes internos

4.1.2 Ovalización por disposición de caños en voladizo

El proceso de ovalización que se presenta cuando por alguna razón el caño “liner” queda en voladizo así sea en el transporte o durante su almacenamiento, es algo lento al principio y luego ocurre abruptamente. Este proceso es una función directa de la longitud que queda efectivamente en voladizo, de las dimensiones del “liner”, lo que tiene directa influencia sobre el momento de inercia, y finalmente de las solicitaciones. El tipo de solicitaciones presentes en este caso pueden ser puntuales, llamémosle una fuerza o un momento, cargas distribuidas uniformemente que puede ser su propio peso o momentos puntuales aplicados en el largo del voladizo.

4.1.3 Ovalización debido a fuerzas de contacto

El tipo de empaquetamiento en el que se disponen los caños durante el almacenamiento o durante la etapa de transporte es un punto muy importante en lo que respecta a la estabilidad dimensional del caño. Un correcto empaquetamiento es aquel en el que cada caño está rodeado y en contacto con la máxima cantidad posible de caños. De esta manera se disminuyen las distancias que provocan momentos flectores y por consiguiente la deformación.

Además del tipo de empaquetamiento es importante el tiempo en el que los caños estarán almacenados, debido a los fenómenos de Creep que se presentan cuando las cargas aplicadas son constantes en el tiempo. De esta manera es posible pensar que cuando los caños son estibados en grupos unos sobre otros, los que se encuentren colocados en la parte inferior de la columna formada presentarán una deformación por Creep de mayor magnitud que aquellos colocados en la parte superior.

4.2 Colapso plástico en servicio

Las causas que inducen el colapso plástico de los “liners” están relacionadas con la falta de adhesión del “liner” con el acero cuando el fluido que circula por el interior del “liner” es multifásico debido a la permeabilidad del “liner” a los gases con peso molecular pequeño como el CH₄ (metano) o el CO₂ (dióxido

de carbono). La permeabilidad del PE a pequeñas moléculas gaseosas resulta en dos tipos de problemas que enunciaremos brevemente a continuación.

4.2.1 Absorción de gases (swelling)

Varias investigaciones^{18,19} han puesto de manifiesto los problemas que aparecen cuando el medio transportado contiene moléculas de tamaño relativamente pequeño, como son el metano, dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno, presentes muchas veces en los hidrocarburos transportados. La absorción y permeación de estas fracciones de bajo peso molecular produce dos tipos de problemas:

- Por un lado un comportamiento estructural inestable del “liner” por colapso debido a pandeo y su consiguiente pérdida de capacidad de transporte de fluido por parte de la tubería.
- Por otro lado, el deterioro de las propiedades del material del “liner” por los gases que se disuelven en el mismo.

4.2.2 Inestabilidad por pandeo

Se demostró²⁰ que la permeación y el hinchado (“swell”) del “liner” debido a la absorción de gases, son la fuente de tensiones de compresión de Hoop (periféricas) y axiales que llevan al pandeo (“buckling”) del “liner”.

El hinchado del PE es de un 10% en volumen bajo condiciones de presión, temperatura y presencia de ciertos gases comúnmente encontrados en los yacimientos de extracción de hidrocarburo. Bajo estas condiciones operacionales (presión interna positiva), el “liner” esta sometido a un sistema de tres tensiones de compresión, cada una de ellas por encima de la tensión de fluencia del material. Dado que la condición de fluencia plástica, y rotura están dadas en realidad por un valor crítico de la tensión de Von Mises, no se darán condiciones estructurales de importancia que lleven al colapso o la rotura bajo las condiciones de servicio. Sin embargo, cuando la presión interna es reducida, la tensión de compresión debida al hinchamiento (“swell”) por absorción de moléculas chicas produce un estado biaxial de compresión con la compresión de Hoop (radial o periférica) y la axial, ambas del orden de la tensión critica de Von Mises en compresión que lleva a la condición critica del “liner”. Bajo estas condiciones el

“liner” podrá deformarse elasto-plásticamente en forma estable, radialmente hacia adentro en compresión pandeando hacia adentro de la tubería lo que lleva a un bloqueo o rotura del “liner”. Investigadores

Identificaron dos modos fundamentales de cargas sobre el “liner”, los cuales ocurren como resultados de una despresurización del fluido en el centro del tubo:

- a) Altas presiones en la región anular causada por la permeación del condensado.
- b) Tensiones de compresión de Hoop y longitudinales generadas por el hinchamiento del “liner” debido a temperatura y absorción del condensado

Si bien por medio del estirado durante la instalación ayuda a superar algo las tensiones de compresión en b), no logran superar la compresión generada en a).

4.2.3 Deterioro del “liner”

En el trabajo de Mason y Alkire²¹ se realizaron experimentos estudiando el efecto de someter al PE utilizado en tuberías a altas presiones de CO₂ juntamente con CH₄ en mayor proporción que el primero en autoclave, y sumergidos en petróleo a temperaturas de operación comunes en un yacimiento (60°C).

Los resultados de los experimentos muestran que el PE absorbe gases y compuestos de bajo peso molecular que, al realizar descompresiones rápidas, generan burbujas y también fisuras degradando en forma importante e irreversible las propiedades mecánicas del material.

Mediciones de permeabilidad muestran que el polietileno tiene una mucha mayor permeabilidad para el CO₂, que para el CH₄. Si el CO₂ que fue permeado a través del “liner” lo hace junto con humedad, las condiciones de presión en el espacio anular llevarían a un acelerado proceso corrosivo en la pared del caño metálico.

Capítulo 5

Comportamiento mecánico del Polietileno

A menudo cuando se piensa en los polímeros se tiene la impresión de que son mecánicamente débiles. Este pensamiento era común en el pasado y generó el desconocimiento de sus múltiples posibilidades. Hoy son utilizados incluso en aplicaciones estructurales, bajo condiciones de carga. Este incremento en su empleo se debe a varios factores, uno de los más importantes es el bajo peso de los materiales plásticos, lo que brinda una performance resistencia/peso o rigidez/peso comparable y muchas veces superior a los materiales metálicos comúnmente usados. Otra de sus ventajas es que su costo de fabricación y procesamiento es generalmente inferior al de los materiales tradicionales.

Para entender mejor el comportamiento mecánico de los polímeros se debe conocer alguno de los fenómenos que intervienen en el comportamiento de sus propiedades. Por tal motivo, a continuación se explican en forma resumida cuales son las variables involucradas mas importantes.

5.1 Fluencia en polímeros

La determinación del comportamiento tensión-deformación de un material es particularmente útil para obtener información concerniente a propiedades mecánicas tales como: modulo de Young (E), tensión de fluencia (σ_y), resistencia a la ruptura (σ_r) y porcentaje de elongación (ϵ), los que constituyen los parámetros fundamentales en el diseño de una pieza o dispositivo.

Las curvas tensión-deformación son obtenidas en los polímeros cuando el espécimen de prueba es sometido a una fuerza de tracción o compresión a velocidad constante. Estas curvas no son diferentes a la de los materiales convencionales, pero a diferencia de estos, los polímeros poseen una marcada dependencia con la velocidad de ensayo, producto de las características viscoelásticas de los plásticos.

En la **Figura 22**, se puede apreciar la curva idealizada de tensión deformación, de una muestra polimérica dúctil (PE) y otra en el mismo grafico pero un comportamiento frágil (PS). En el primer caso, la tensión nominal (σ_n) es graficada junto a la deformación (ϵ). El cambio de sección transversal es también

esquemático para diferentes estados de deformación. Inicialmente la tensión es proporcional a la deformación, obteniéndose el módulo de Young (E) de la pendiente de esta curva. Al incrementarse la deformación, la pendiente decrece paulatinamente hasta alcanzar el máximo de la curva, luego del cual comienza a descender; dicho punto es por convención el punto de fluencia.

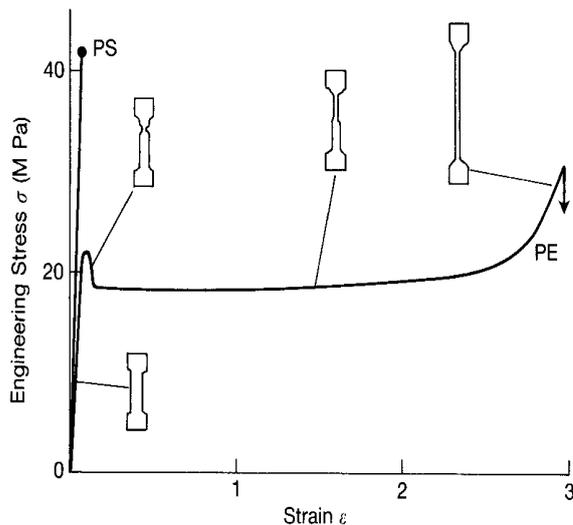


Figura 22: Curva Tensión-Deformación.

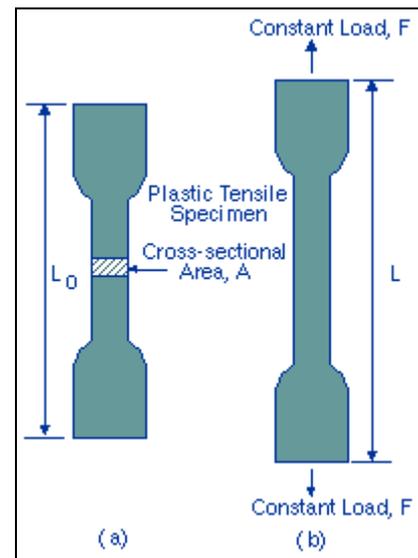


Figura 23: Probeta tipo "hueso"

El punto de fluencia en los polímeros es difícil de determinar debido a que los estados de deformación permanente tienen lugar mucho antes de alcanzar el punto de máxima tensión σ_y . Por esta razón es muy difícil precisar a qué niveles de tensión ocurre deformación plástica permanente.

Durante la deformación plástica, el área de la sección transversal de la probeta (probeta tipo hueso) (**Figura 23**) decrece uniformemente al incrementarse la longitud. Luego del punto de fluencia la sección transversal empieza a decrecer más rápidamente, y ha de formarse un cuello, generándose procesos de endurecimiento por deformación al tiempo que se incrementa la tensión hasta que se alcanza la ruptura. Algunos polímeros en determinadas circunstancias, poseen la habilidad de formar un cuello estable, mientras que otros no. Esta capacidad depende de las condiciones de prueba a las que este expuesto el material.

La forma exacta de la curva tensión-deformación para un polímero particular varía con la temperatura y la velocidad de ensayo. El módulo de

elasticidad se incrementa al reducirse la temperatura, mientras que la ductilidad del material se reduce; observándose a bajos valores un comportamiento predominantemente frágil. La temperatura exacta a la que tiene lugar la transición dúctil-frágil depende de la velocidad de ensayo. Esta temperatura decrece al incrementarse la velocidad, como consecuencia de las características viscoelásticas del material. En general, el efecto de aumentar la velocidad de prueba es similar al observado cuando se disminuye la temperatura.

5.2 Creep y relajación en Polímeros

Creep se denomina al proceso de deformación a tensiones inferiores a las tensiones de fluencia del material. Este comportamiento tiene lugar cuando el material es sometido a una carga constante. El fenómeno de Creep puede ser graficado para entender los parámetros que intervienen en el proceso.

La **Figura 24** es un diagrama tensión deformación para un material elástico ideal, y un material elástico ideal.

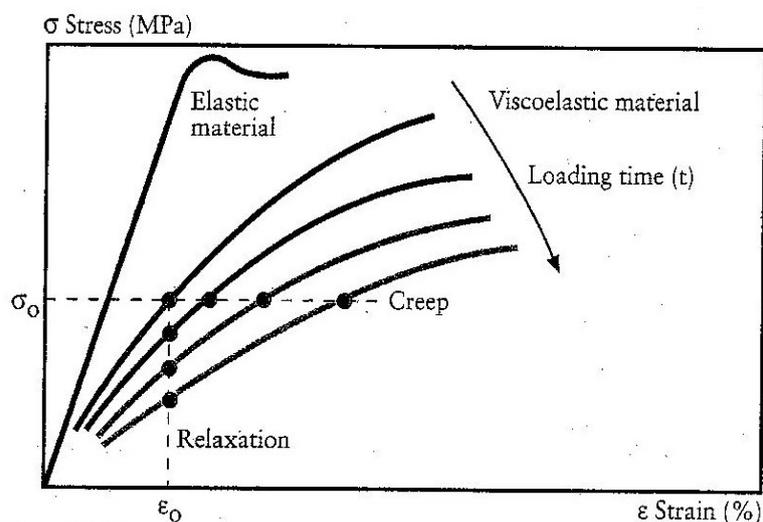


Figura 24: Curva tensión deformación.

Un material que no presenta comportamiento viscoelástico, al aplicar la carga el nivel de deformación es invariante con el tiempo. En cambio para un material viscoelástico la deformación se incrementa con el tiempo de carga. En el gráfico también es posible visualizar el fenómeno de relajación de tensiones, cuando el material es cargado, y se mantiene cierto tiempo a deformación constante.



Es necesario en el diseño ingenieril conocer la relación entre tensión deformación, y como depende del nivel de carga, tiempo de carga y la temperatura. Para un material elástico, la relación tensión deformación puede ser fácilmente descrita por el modulo de Young (E) usando la ley de Hooke. Para el material viscoelástico también el posible hallar el modulo, como la tangente o la secante a las respectivas curvas isocronas. Por supuesto este módulo no es constante y dependerá del tiempo de carga y el nivel de tensión.

Cada punto hallado de esta manera no es el modulo elástico, se denomina normalmente modulo de Creep cuando describe libre deformación de un material sometido a un estado de carga constante. Alternativamente es posible obtener el módulo de relajación cuando el material esta sometido a un estado tensión y la tensión se mantiene constante.

Capítulo 6

Análisis tensional del fenómeno de ovalización

En este capítulo se desarrollarán en detalle los diferentes tipos de solicitaciones que se presentan en la vida de una cañería plástica y que contribuyen en mayor o menor medida al fenómeno de ovalización. La contribución de tensiones se genera en primer momento durante el proceso de manufactura y a estas se le suman otros estados de carga que actúan sobre el “liner” creando complejos estados de tensión que en muchos casos concluyen en el colapso de este. La complejidad del análisis reside en la naturaleza viscoelástica de los materiales plásticos, y en particular en el polietileno que es el material con que se fabrican los “liners” que se presentan en este estudio.

Haciendo un breve resumen de la vida de una tubería plástica, podemos decir que el tiempo mínimo de servicio para el que estas se diseñan es de 50 años, un tiempo bastante extenso y muchas veces poco feliz ya que estas se pueden deteriorar antes de cumplir un pequeño porcentaje de su vida de diseño. Para poder asegurar una vida de servicio tan extensa es lógico pensar que el caño plástico debe llegar íntegro al lugar donde será colocado. Esto último parece muy fácil y en teoría puede ser que lo sea pero veremos que pequeños factores que no son tenidos en cuenta provocan en el material tensiones de magnitud capaces de provocar daños irreversibles e incluso innecesarios desechos en el material que podrían ser evitados. Este capítulo brindará una idea de la mayoría de los factores que están involucrados en el fenómeno de ovalización o de posible daño en orden cronológico en la vida de una tubería plástica. La **Figura 25** muestra a partir de un gráfico denominado gráfico de la “bañera” los posibles estadíos en la vida de una cañería con las probabilidades de falla y riesgo asociado en las diferentes etapas en su vida útil.

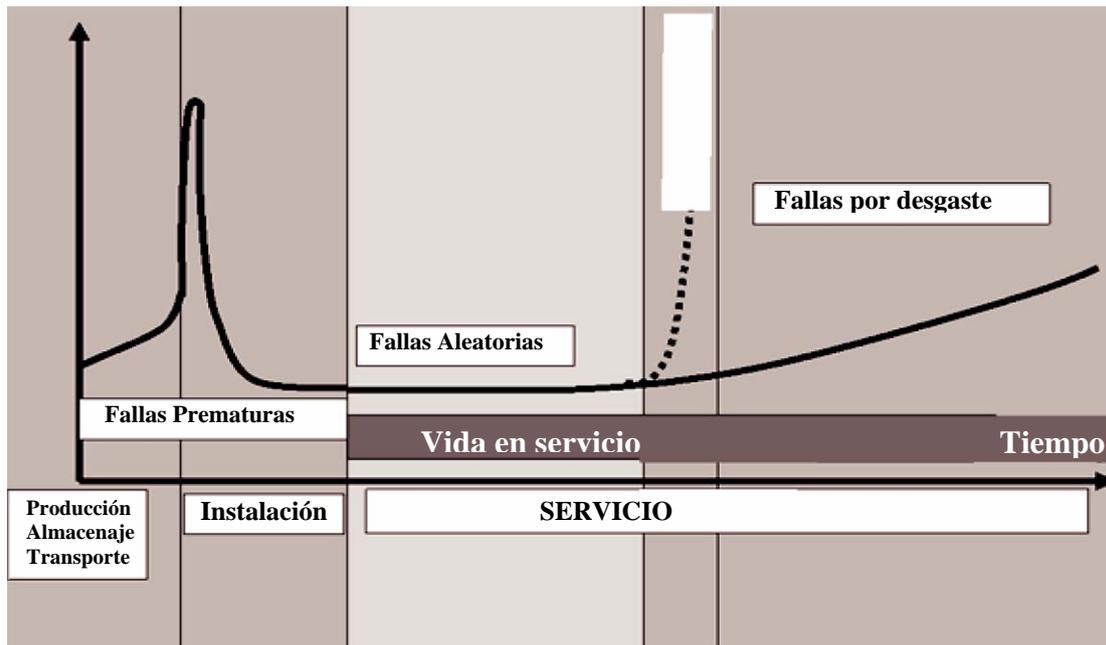


Figura 25: Grafico de la bañera

6.1 Tipos de solicitaciones

Las solicitaciones mecánicas que se presentan pueden ser tanto intrínsecas del material como lo son las tensiones residuales que se generan en el proceso de enfriamiento del caño durante su manufactura, como también solicitaciones extrínsecas que son aquellas que se presentan por el modo de transporte, almacenamiento y forma en que el caño plástico es puesto en servicio y se superponen a las intrínsecas.

Los estados de carga más comprometidos o que ponen en juego la integridad y la funcionalidad del “liner” se presentan cuando este deja la fábrica y es conducido a los lugares de venta o directamente a los lugares donde brindará su servicio. Como ya habíamos comentado en capítulos anteriores muchas veces los caños plásticos dependiendo de su diámetro son transportados enrollados. Este modo de transporte presentara problemas si no es bien calculado el diámetro en el que se van a enrollar los caños ya que a mayor diámetro es necesario enrollarlos en un diámetro mas grande, para no deformar plásticamente el caño.

Los caños de gran diámetro que son transportados apilados unos sobre otros en camiones o que son almacenados de la misma manera, si no son colocados en un empaquetamiento eficiente o con los respectivos soportes se

deformarán de manera permanente en función del tiempo que se mantengan apilados.

Y por último una vez que el caño está listo para entrar en servicio esperando para ser soldado, dependiendo de las propiedades del suelo en el que este se encuentra apoyado y del clima reinante, se pueden generar tensiones que provocarán serias deformaciones en el caño plástico.

A continuación se desarrollarán los posibles estados tensionales que se presentan a lo largo de la vida de un caño plástico.

6.1.1 Tensiones Residuales

Las tensiones iniciales son tensiones internas que pueden existir en un cuerpo antes de su exposición a un ambiente externo. Estas tensiones pueden ser generadas durante la producción de la pieza; por lo tanto nos referimos a estas como tensiones residuales o "*frozen in stresses*". Las tensiones iniciales juegan un rol significativo en el comportamiento de las piezas en ambientes mecánicos, térmicos y químicos. En ambientes químicos o sea en contacto con algunos fluidos transportados por el interior del ducto la interacción de las tensiones iniciales con los agentes químicos pueden permitir el fenómeno conocido como "*environmental stress cracking*". Este fenómeno es de importancia en el diagnóstico de falla de algunos sistemas materiales.

Durante la etapa de fabricación de los caños plásticos se pueden generar tensiones iniciales. Los caños termoplásticos son conformados en una extrusora, el resultado de este proceso es un objeto tubular caliente y relativamente blando. El caño luego es enfriado con agua desde su superficie exterior y durante la pérdida de temperatura la forma rígida del caño es alcanzada. Durante el proceso de enfriamiento se genera un gradiente térmico en el espesor del caño; esta diferencia de temperatura puede generar tensiones iniciales en la dirección circunferencial como así también en la dirección longitudinal.

Normalmente por medio de un enfriamiento externo se forma un arco de compresión sobre la superficie exterior y un arco de tracción se genera en la parte interior. Por lo general esta distribución de tensiones generadas es no lineal.

La explicación de estas tensiones resultantes es que durante el enfriamiento la capa superficial externa contrae térmicamente mientras que simultáneamente la todavía cálida capa superficial interior del caño es comprimida plásticamente. Cuando el interior del caño se enfría esta capa superficial se esfuerza para contraerse como consecuencia de un cambio térmico en el espesor, pero es impedido por la capa superficial externa la cual se ha enfriado más rápidamente y ya ha asumido su forma.

Como resultado, el interior estará sometido a tensiones de tracción y el exterior a tensiones compresivas. Cuanto más rápido es el enfriamiento y más grande el espesor del material, más severas serán las tensiones de flexión generadas.

Las tensiones residuales son estimadas, asumiendo una distribución triangular de tensiones en la pared del caño como se observa en la **Figura 26**. El caño en este caso es considerado a causa de simplificación como un anillo plástico delgado y también se asume que la deformación es pequeña en relación al diámetro del caño. La siguiente ecuación nos indica la magnitud de las tensiones generadas en el espesor del caño.

$$\sigma = \frac{a}{(\pi D_m - a)} \left(\frac{S}{D_m} \right) E$$

Donde:

E= Modulo de Creep

S= Espesor de Pared

D_m=D-S.

D = Diámetro Externo.

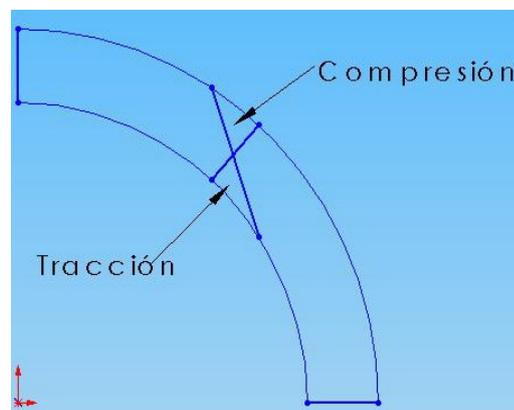


Figura 26: Distribución de tensión en el espesor.

Dado que el caño no es cortado, sino que está confinado a esta forma, la deformación que causaran estas tensiones residuales son constantes. Esto hace que las tensiones disminuyan con el tiempo debido a la relajación. De esta manera las tensiones son grandes inmediatamente luego de la extrusión y luego disminuyen exponencialmente. Una medida experimental es que las tensiones

medidas luego de 24 hs que se produjo la extrusión disminuyen a la mitad al cabo de 10 años.

La **Figura 28** muestra de que manera disminuyen las tensiones a lo largo del tiempo a deformación constante. Este tipo de comportamiento se denomina relajación de tensiones.

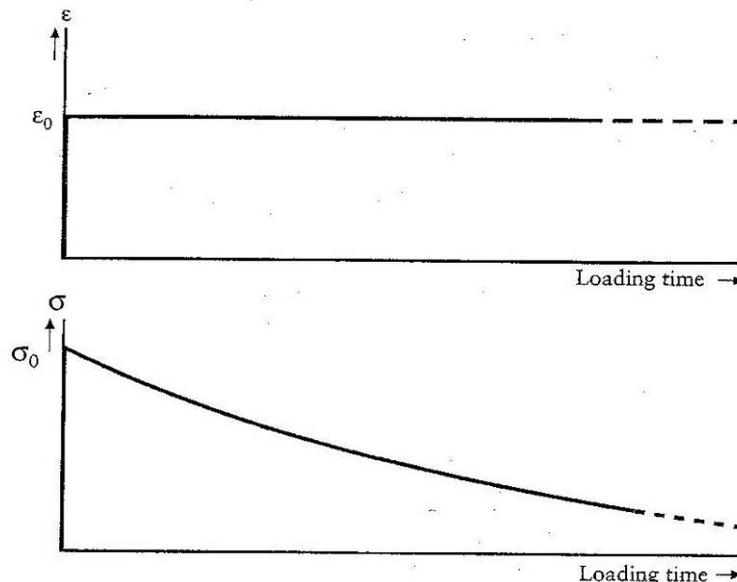


Figura 28: Relajación de tensiones

La distribución de tensiones no siempre es triangular debido al hecho de que circula aire por el interior del caño y un cierto grado de enfriamiento tiene lugar, como resultado de esto la distribución de tensiones ya no es triangular.

Consecuentemente no hay razón para formular que el límite de diseño sea la magnitud de las tensiones residuales. Sin embargo la combinación de grandes tensiones residuales con tensiones de tracción bajo creep causadas por presiones hidrostáticas dará un aumento del caso de carga.

Hay también otra razón práctica para limitar las tensiones residuales en caños que deben ser unidos por soldadura en sus extremos. Si las tensiones son muy grandes, el extremo del caño estará flexionado hacia adentro. Esto causa problemas cuando se colocan los accesorios de soldadura, y se enfrentan los finales del caño, también causa tensiones multiaxiales impredecibles en la finalización de la junta soldada. O sea que es recomendable que las tensiones

residuales se mantengan tan bajas como sea posible. En la **Figura 29** a continuación se muestra cualitativamente lo nombrado.



Figura 29: Evidencia de las tensiones residuales.

6.1.2 Tubos en voladizo

Un factor de diseño para el alcance de la flexión es la deformación por tracción permisible sobre el material en la dirección del eje del caño.

Otro criterio de diseño es la estabilidad de pandeo del caño, estas consideraciones son dadas para la flexión a temperaturas normales solamente.

Si el caño ha de ser flexionado debe ser sujeto a cargas entre dos a más puntos de soporte. La curvatura es inmediatamente obtenida con la asistencia de las ecuaciones lineales elásticas. Para ciertas tensiones en la dirección del eje del caño, el cambio máximo posible de dirección en el caño es obtenido si el radio de curvatura es constante. Este es el caso si un caño es asegurado en un extremo, y es cargado con un momento flector en el extremo opuesto. Las siguientes formulas son las que describen el radio de curvatura de una viga en voladizo las cuales es posible adaptarlas al caso de un caño cambiándoles el momento de inercia.

$$R = \frac{EI}{M}; M = \sigma W_c \quad \text{Entonces} \quad R = \frac{ED}{2\sigma} = \frac{D}{2\varepsilon}$$

Siendo: R: Radio de Curvatura.

E: Modulo de Young.

I: Momento de Inercia.

FACULTAD DE INGENIERIA

M: Momento Aplicado.

σ : Tensión.

D: Diámetro Externo.

ε : Deformación.

W_C : Momento resistente.

Si el caño sujeto en un extremo es flexionado en cambio por una carga puntual en su extremo opuesto este adopta la forma de una parábola, ahora si un caño de longitud a es sometido a una carga puntual P en el extremo libre, se muestra una relación si el momento flector es moderado(esto es M_f tal que no provoque inestabilidad), esto es, que existe una relación entre el radio de curvatura que describe el caño cuando la carga P es aplicada y el desplazamiento vertical del final del caño.

$$h_p = \frac{a^2}{3R} \quad \text{Ecuación (1)}$$

La fuerza P requerida para realizar este desplazamiento se calcula de acuerdo a la formula:

$$P = \frac{EI}{aR} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Si el caño es flexionado en cambio por un momento flector en el extremo libre el desplazamiento en sentido vertical de dicho extremo será:

$$h_M = \frac{a^2}{2R} \quad \text{Ecuación (3)}$$

En última instancia se analizo la flexión causada por una carga distribuida como por ejemplo, el peso del caño:

$$h_q = \frac{a^2}{4R} \quad \text{Ecuación (4)}$$

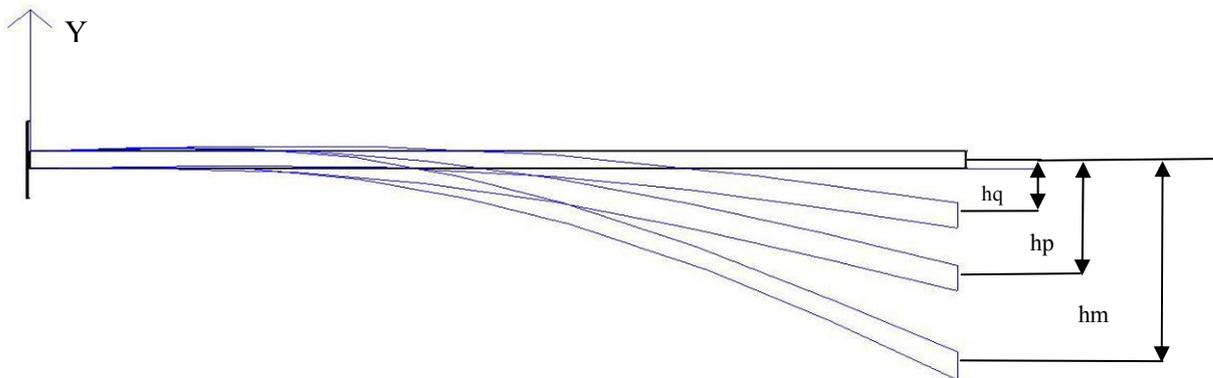


Figura 30: Desplazamientos dependientes del tipo de carga

Se puede ver claramente en la **Figura 30** que la aplicación de un momento en el extremo libre es el que mayor desplazamiento provoca desde la línea horizontal. Sin embargo las relaciones nombradas para los tres casos de carga estudiados son solo aproximadas y son validas para pequeñas curvaturas, dado que la flexión de un caño es siempre seguido por la ovalización de la sección transversal. Esta ovalización causa deformaciones por flexión en la dirección radial y es necesario que siempre sean mantenidas bajo control.

La fuerza requerida para flexionar un caño puede ser calculada suponiendo que la forma de la sección transversal es conocida. Cuando ocurre flexión, la fuerza permanece como una función del momento de inercia I_C de la sección transversal, la cual sin embargo, tan pronto cuando esta es afectada por la deformación llega a adoptar la forma de ovalo, reduciendo el momento de inercia I_C , y así disminuye la fuerza de flexión. El instante en que un caño falla como resultado de pandeo de la sección transversal hay una repentina reducción de la fuerza de flexión.

La ovalización o deflexión del caño puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta}{D_m} = \frac{1}{16} \frac{1}{\left(\frac{s}{D_m}\right)^2} \frac{1}{\left(\frac{R}{D}\right)^2} (1 - \nu^2) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Siendo: δ : deflexión de la sección transversal

$D_m = (D_{\max} - D_{\min})/2$: Diámetro medio de la Sección.

ν : Coeficiente de Poisson.

Como se puede ver analizando la ecuación, la deflexión aumenta cuando el radio de curvatura disminuye. Como resultado de la ovalización el momento de Inercia de la sección transversal del caño disminuye. Debido a las propiedades de los materiales plásticos, el modulo de Young (E) también disminuye en las partes mas esforzadas de la sección transversal. Finalmente ocurre pandeo como un efecto combinado de la disminución del momento de inercia y modulo de Young.

Antes de que pandeo real ocurra el caño esta en un estado muy inestable pues se pierde gran parte de la rigidez a la flexión. La siguiente formula indica la rigidez de un caño, y se puede ver claramente que en este proceso de inestabilidad donde disminuye el momento de Inercia y el modulo efectivamente lo hace la rigidez.

$$S_R = \frac{EI}{D_m} ; \text{ Donde } S_R = \text{Rigidez} \quad \text{Ecuación (6)}$$

La siguiente formula indica el radio de curvatura crítico donde se produce pandeo lateral:

$$R_b = \frac{D}{1.125/D_m} : \text{ Donde } R_b = \text{radio de curvatura critico de "buckling"}. \quad \text{Ecuación (7)}$$

Siempre que la flexión sea chica, el radio de curvatura para la flexión es dependiente solo del diámetro externo del caño y la deformación en tracción del material del caño es regida por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} ; \text{ Donde } E = \text{Modulo de Young}; \sigma = \text{Tensión de tracción}; \varepsilon = \text{Deformación}$$

Consecuentemente a bajos valores de la deformación de diseño el radio de curvatura R permisible es solo una función del diámetro externo.

Esto permite que caños de idénticos diámetros puedan ser flexionados a iguales radios de curvatura independientemente de su espesor de pared.

Sin embargo como en el caso de la flexión permanente de caños termoplásticos (sujetos solo a una fuerza axial adicional pequeña), aunque valores de deformación un poco altas pueden ser aceptadas, la ovalización y el criterio de pandeo deben ser siempre considerados cuando un radio de curvatura permisible es recomendado. En este contexto si la deformación permanece constante se produce una relajación de tensiones, o la deformación aumentara en el curso del tiempo por el fenómeno de Creep.

6.1.3 Tensiones Inducidas por Despresurización

A medida que el tiempo pasa tubos “liner” ya instalados y funcionando correctamente bajo una presión hidrostática externa pueden colapsar. Esta presión hidrostática inducirá deflexiones entre el caño de acero y el “liner”. Pequeñas imperfecciones del “liner” o del caño de acero que lo hospeda causará deflexiones y tensiones variables alrededor de la circunferencia del “liner”, permitiendo la formación de lóbulos opuestos donde las deflexiones radiales internas son relativamente grandes. Deflexiones internas a aproximadamente 90° de los lóbulos también ocurrirán resultando en un área de contacto aumentando con el tiempo. Aunque es bien conocido que el contacto entre el “liner” y el caño de acero mejora grandemente la resistencia al colapso del “liner”, los detalles de las áreas de contacto y fuerzas asociados con este proceso no son bien entendidos.

Existen distintos desarrollos que modelan el “buckling” (pandeo) para anillos delgados y celdas cilíndricas bajo cargas a corto y largo plazo en la bibliografía específica^{22,23,24,25}. La naturaleza y las magnitudes de fuerza de contacto, desplazamiento y tensiones tienen implicaciones importantes para el desarrollo de materiales para “liner” y ayudar a identificar las propiedades del material mas apropiadas para este tipo de usos.

ASTM diseño un método para rehabilitación de tuberías usando “liners”, basadas sobre la modificación de Timoshenko²⁶ para “buckling” de un anillo libre, la expresión es la siguiente:

FACULTAD DE INGENIERIA

$$P = \frac{2KE_L}{(1-\nu^2)} \frac{1}{(DR-1)^3} \frac{C}{N};$$

Ecuación (8)

Donde

P: presión de “buckling”;

K: aumento de la presión de “buckling” debido al soporte del caño de acero.

ν : Coeficiente de Poisson.

C: factor de reducción de ovalización

N: factor de seguridad (0.7 es recomendado²⁷).

DR: relación del diámetro exterior del “liner” sobre el espesor del “liner”.

E_L : es una función de la duración de la carga (se toma comúnmente como la mitad del modulo de flexión a corto tiempo para una vida de diseño de 50 años).

Timoshenko y Gere²⁸ calcularon la máxima tensión en un anillo elíptico bajo carga uniforme con una imperfección inicial de dos lóbulos como:

$$\sigma = \frac{PR}{t} + \frac{PRW}{\frac{t^2}{6} \frac{P_{Cr}}{P} - 1}$$

Ecuación (9)

R: radio del “liner”.

t: espesor del “liner”.

P_{Cr} : es la presión crítica para un caño libre estable circular.

P: presión aplicada.

W: diferencia entre el radio máximo y el radio promedio del caño ovalizado.

Esta expresión para la tensión es la combinación de tensión circunferencial (1º término) y tensión de flexión (2º término).

La relación entre la máxima tensión de flexión y la compresión circunferencial inducida es la siguiente:

$$\frac{\sigma_F}{\sigma_C} = \frac{3(DR-1)W}{R \left(\frac{P_{Cr}}{P} - 1 \right)}$$

Ecuación (10)

Esta expresión indica que la tensión de flexión del material se vuelve dominante sobre la tensión compresiva como en una aproximación de “buckling” a corto paso para caños apoyados libremente.

Ello también implica que las propiedades de flexión del material son apropiados cuando se diseñan caños para resistir colapso a corto término. Zhao²⁹ descompuso la tensión pico en un “liner” en componentes de tensión compresiva y tensión de flexión y observo que la tensión compresiva permanece algo constante durante el proceso mientras que la tensión de flexión aumenta drásticamente a medida que el “buckling” se aproxima.

Utilizando el principio de mínima energía potencial y asumiendo una relación tensión-deformación lineal elástica en el proceso completo de “buckling” Glock³⁰ tomo una solución concisa para la presión de “buckling” de un “liner” forzado a una carga a corto plazo como:

$$P_{Cr} = \frac{E}{1-\nu^2} \left(\frac{t}{D} \right)^{2.2} \quad \text{Ecuación (11)}$$

Basada en la solución de Glock, el factor de mejora utilizado en ASTM F1216³¹ puede ser determinado como:

$$K = \frac{1}{2} (DR - 1)^{0.8} \quad \text{Ecuación (12)}$$

La cual es solo una función de la relación entre el diámetro exterior y el espesor. Se puede apreciar que el factor K aumenta casi linealmente con DR. Sin embargo la presencia de imperfecciones en el “liner” disminuiría el valor de K y reduciría la estabilidad del “liner”. Ensayos de “buckling” de “liners” a corto plazo en la Universidad tecnológica de Louisiana indican que el “liner” tensionado desarrolla cuando la presión aumenta dos lóbulos de deformación aproximadamente simétricos como se indica en la **Figura 31** y **Figura 32**.

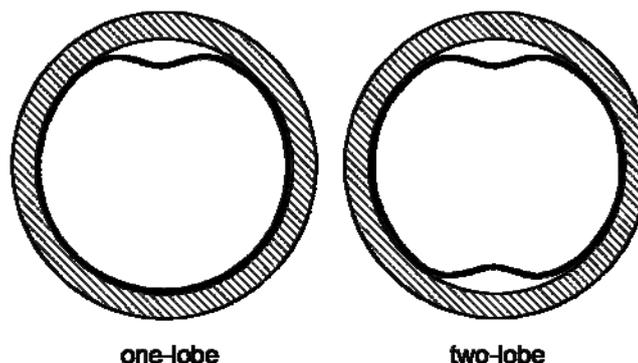


Figura 31: Formación de lóbulos por despresurización

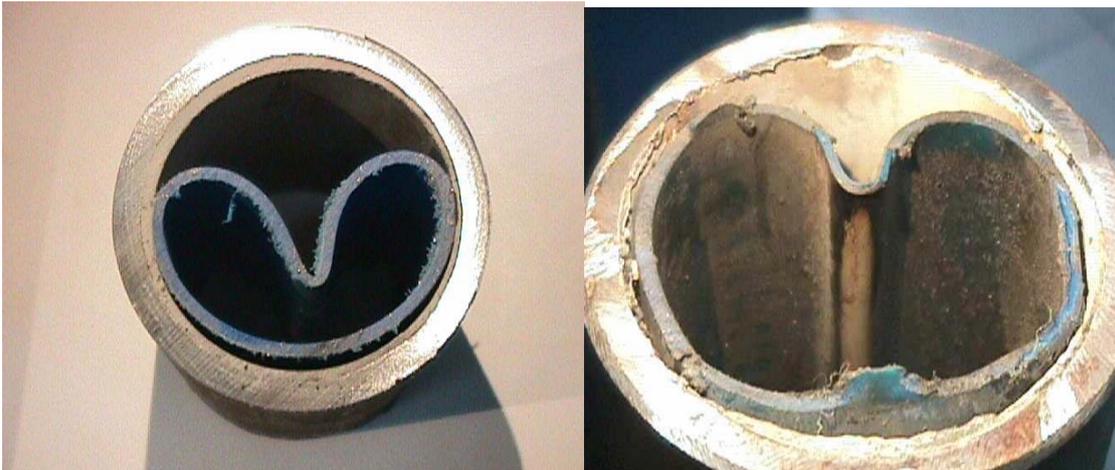


Figura 32: Formación de uno y dos lóbulos en “liner” colapsado

Los materiales poliméricos usados para la rehabilitación de tuberías muestran algún nivel de deformación por Creep incluso a temperatura ambiente. El comportamiento de Creep puede ser modelado usando el modelo de Norton-Bailey, dicho modelo es el siguiente:

$$\varepsilon^{cr*} = A\sigma^n t^m \quad \text{Ecuación (13)}$$

Donde:

σ : Tensión.

t: tiempo.

ε^{cr*} : es la deformación por Creep acumulado y el asterisco (*) denota la velocidad de deformación

A, n y m son determinados a partir de los resultados de los ensayos de deformación por Creep.

Una forma de endurecimiento por deformación de esta expresión puede también ser escrito como:

$$\varepsilon^{cr*} = \left\{ A\sigma^n \left[(m+1)\varepsilon^{cr} \right]^m \right\}^{\frac{1}{m+1}} \quad \text{Ecuación (14)}$$

Tal forma de endurecimiento por deformación es empleado a menudo en análisis computacional pues es considerado que da mejores resultados que el endurecimiento con el tiempo. Relaciones de endurecimiento por deformación serán usadas para el análisis a largo plazo.

6.1.4 Tensiones Inducidas por Peso Propio

Cuando un caño “liner” previo a entrar en servicio se encuentra colocado en el piso o sobre alguna otra superficie sufre tensiones de contacto que son función del área en el que este se encuentra apoyado. Estudios previos³² han demostrado que un caño de cualquier material simplemente apoyado en el suelo presenta un pequeño ángulo de contacto. La relación que surge del análisis se denomina factor de proyección, y se define de la siguiente manera:

$$\rho = h/D \quad \text{Ecuación (15)}$$

Donde:

ρ : factor de proyección.

h : altura del caño que se observa si lo vemos lateralmente.

D : diámetro externo de la tubería.

En términos prácticos el factor de proyección es “la parte del diámetro que podría observarse lateralmente y que **sobresale** del nivel de la cama de asiento de la tubería”.

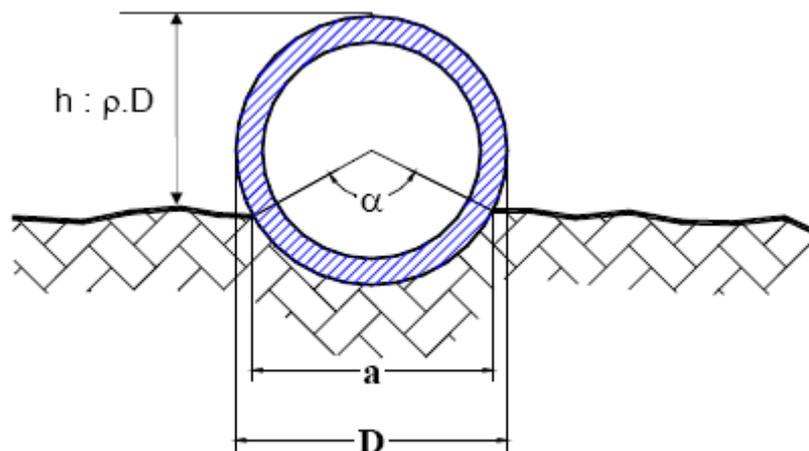


Figura 33: Diagrama para la determinación del factor de proyección. Evidentemente el factor de proyección resulta función del ángulo de apoyo α y su expresión, de aplicar trigonometría, resulta:

$$\rho = 1 - 0,5 (1 - \cos (\alpha/2)) \quad \text{Ecuación (16)}$$

Es de destacar que cuando α es mínimo, por ejemplo 20° (fácilmente alcanzable con solo apoyar la tubería sin más trámite) $\rho = 0,99 \cong 1$ y, si $\alpha = 180^\circ$ (condición extrema de apoyo, pues implica que el mismo llega hasta la mitad del diámetro), obviamente ρ resulta 0,5.

Las tensiones generadas por acción del peso propio del caño, no son de una intensidad constante en toda la circunferencia dada la geometría del caño. Durante el análisis veremos que en ciertos lugares son mucho más intensas generando fenómenos de Creep. Estos fenómenos presentes a temperatura ambiente en materiales con características viscoelásticas son función del diámetro del caño y del espesor de este.

Es intuitivo ver que a mayor diámetro y menor espesor el fenómeno de colapso va a ser mucho más evidente, así mismo caños "liners" que no presentan estas características geométricas pueden presentar fenómenos de inestabilidad al cabo de cierto tiempo. El fenómeno de ovalización que se presenta cuando un caño es alojado sobre una superficie es también directamente proporcional a las condiciones del suelo, ya que si este es muy duro todo el peso estará soportado en un área muy pequeña creando grandes tensiones. Por el contrario si el caño es soportado por una superficie blanda, esta copiará el contorno del caño y las tensiones que se generaran serán de menor magnitud. La intensidad de las tensiones en los ecuadores del caño serán mayores que en otras partes del caño y el fenómeno de Creep potenciará la ovalización del caño.

Capítulo 7

Planteo del Problema

En la última sección del capítulo anterior se enunció una ecuación en la cual se describe el desplazamiento del extremo superior del caño plástico por acción del peso propio de este. En el transcurso del presente capítulo se tratará de explicar las condiciones y suposiciones que llevaron a la obtención de dicha fórmula, para solucionar parte del problema propuesto en este trabajo.

Recordemos que la finalidad del presente proyecto es determinar el grado de ovalización que presentará un caño termoplástico por acción de su propio peso, y poder predecir el tiempo en el cual tendrá un grado de deformación tal que la máquina de soldadura a tope evite soldarlo a otro caño

Una vez determinado el grado y el tiempo de ovalización para que el “liner” o parte de este tenga que ser desechado, se determinará como una conclusión final, hasta que distancia del extremo del caño tiene alcance el fenómeno.

7.1 Modelo Pequeñas Deformaciones

Se desarrolló un modelo para poder predecir el fenómeno de ovalización por peso propio presente en “liners” antes de entrar en servicio.

Para poder desarrollar el modelo se debe tener en cuenta el tipo de sollicitación o sollicitaciones a las que se va a someter el sólido, es necesario conocer también de forma precisa la geometría de la pieza previa a la aplicación de la fuerza.

Las condiciones iniciales del sólido son solamente un apoyo rígido en el cual está apoyado el tubo plástico y el campo gravitatorio terrestre. En el desarrollo del modelo del tubo plástico se hacen cierto tipo de suposiciones que se enumeran a continuación.

Suposiciones realizadas:

- La geometría es circular.
- No existen tensiones residuales debidas al procesamiento o éstas son despreciables
- Se considera un sólido homogéneo e isótropo.

En la **Figura 34** se detalla el tubo plástico bajo un campo gravitacional constante de acuerdo a lo enunciado.

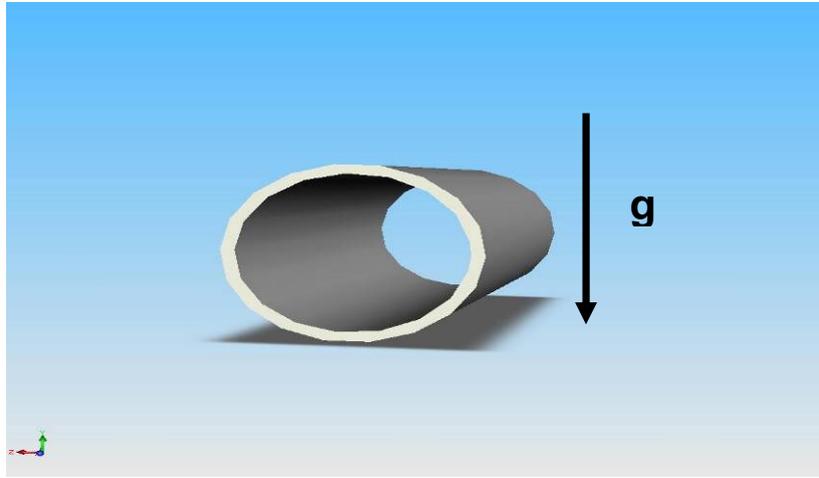


Figura 34: Modelo de tubo plástico sometido a un campo gravitacional constante.

Analizando la pieza en estudio es posible apreciar la simetría que presenta, por lo cual para el análisis es posible utilizar solo una mitad planteando las condiciones de contorno necesarias para que el modelo final tenga las características de un sólido completo, y al aplicarle la carga se comporte como tal. Las condiciones de contorno para una geometría como la descrita son:

1. El sólido tendrá en la parte inferior un empotramiento, para evitar su movimiento en cualquier dirección.
2. En la parte superior un vínculo doble permitiendo su desplazamiento en la dirección vertical. En la **Figura 35** se detalla el modelo obtenido.

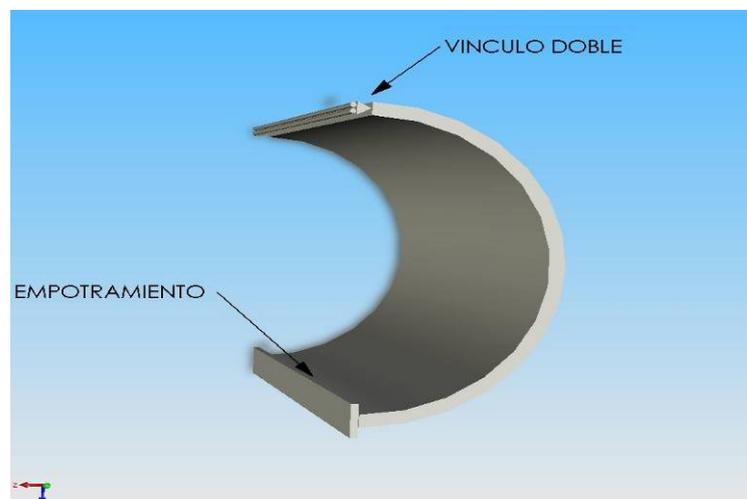


Figura 35: Condiciones de contorno en el modelo.

La pieza se modela en dos dimensiones reemplazando la media caña faltante por sus respectivas solicitaciones.

El sólido se encuentra solicitado a un campo gravitacional constante y es soportado en su parte inferior por una estructura rígida e indeformable.

La finalidad del modelo es predecir el desplazamiento en el eje Y al cabo del tiempo y de esta manera determinar el porcentaje de ovalización a medida que se presenta la caída del modulo elástico al cabo del tiempo.

Las dimensiones y geometría del presente modelo se detallan a continuación en la **Figura 36**, con sus respectivas condiciones de contorno para empezar de esta manera con el análisis racional.

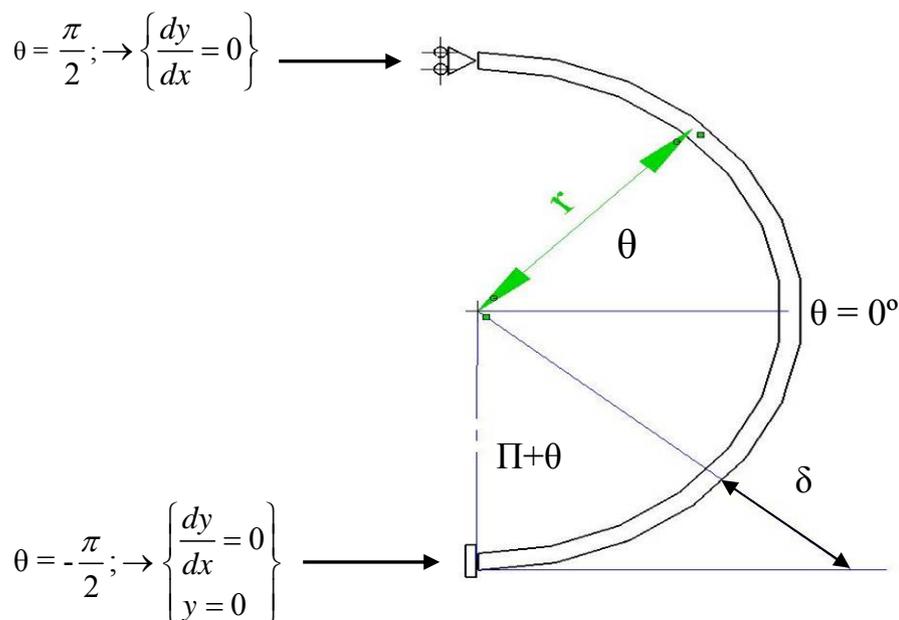


Figura 36: Condiciones de contorno en el modelo

Donde:

$r = (R+r')/2$: Radio medio.

δ : Zona de deflexión permitida.

θ : Angulo $[-\pi/2; \pi/2]$

δ : zona de deflexión permitida

La explicación de que exista esta zona de deflexión permitida es que al no existir en el modelo un tope debajo del empotramiento, una vez que por acción del peso propio se empiece a deformar el modelo se restringirá la deformación para que no sobrepase el límite físico que le impone el piso.

La forma de calcularla es la siguiente:

$$\cos(\pi + \theta) = \frac{r}{H} = \frac{r}{r + \delta} \quad \text{Ecuación (17)}$$

Entonces:

$$\delta = r \left(\frac{1}{\cos(\pi + \theta)} - 1 \right) \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$x = r(\pi + \theta) \Rightarrow \theta = \frac{x}{r} - \pi \quad \text{Ecuación (19)}$$

Por lo que queda la siguiente expresión:

$$\delta = r \left[\frac{1}{\cos\left(\frac{x}{r}\right)} - 1 \right] \quad \text{Ecuación (20)}$$

Se considera el modelo como una viga empotrada en un extremo, y con rotación nula en el otro como vemos en la **Figura 37**, de esta manera podemos plantear la ecuación de la línea elástica.

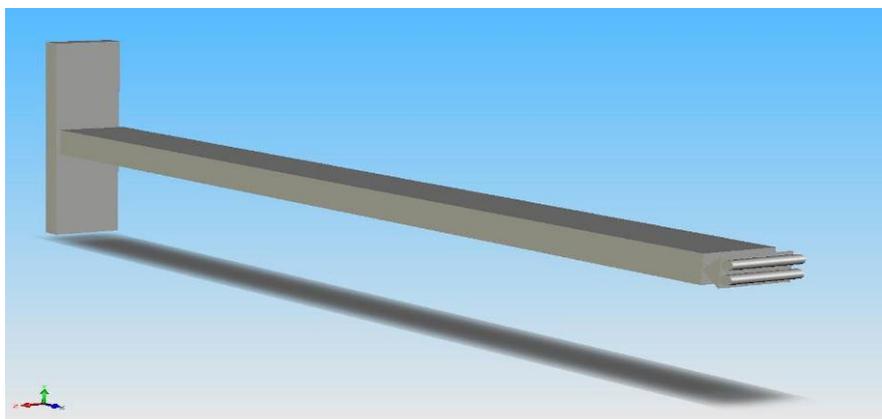


Figura 37: Modelo teórico para analizar la ovalización.

Las condiciones de borde son las siguientes:

- $\theta = \frac{\pi}{2}$; (vinculo doble) $\rightarrow \left\{ \frac{dy}{dx} = 0 \right\}$
- $\theta = -\frac{\pi}{2}$; (empotramiento) $\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{dy}{dx} = 0 \\ y = 0 \end{array} \right\}$

El modelo final para desarrollar los cálculos queda de la siguiente forma y se esquematiza en la **Figura 38**:

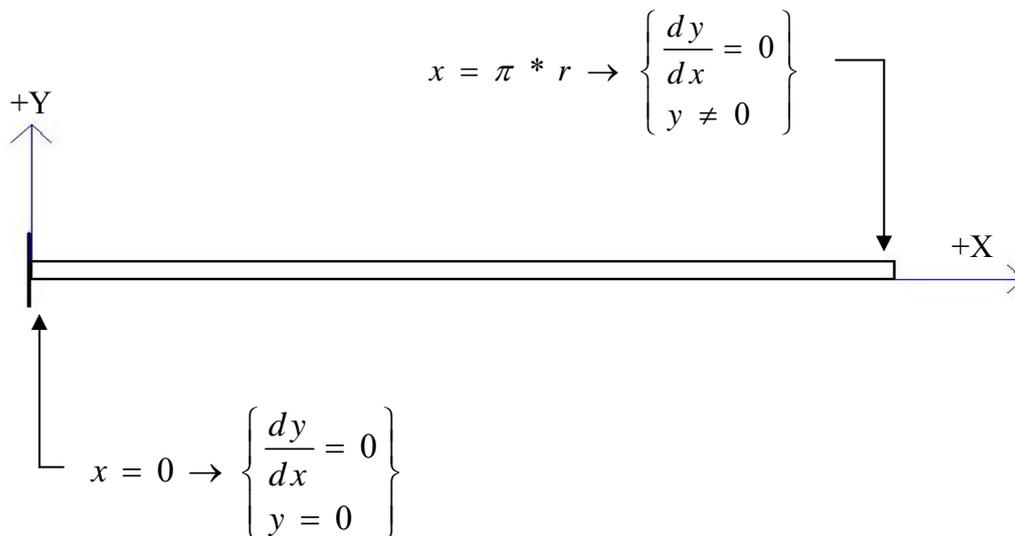


Figura 38: Esquematización de la viga elástica.

Para que el modelo planteado no se aleje de las condiciones reales del problema debemos aplicarle una carga distribuida que es la del peso propio de la media caña. La carga resultante queda como una función de x .

$$q(x) = \rho g h \sin\left(\frac{x}{r} - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{Ecuación (21)}$$

Donde:

$q(x)$: Carga distribuida

ρ : Densidad del material del caño

g : Constante gravitacional

h : Espesor del caño.

Utilizando el sistema de referencias que se plantea en la **Figura 40**, es posible analizar el momento total el eje x.

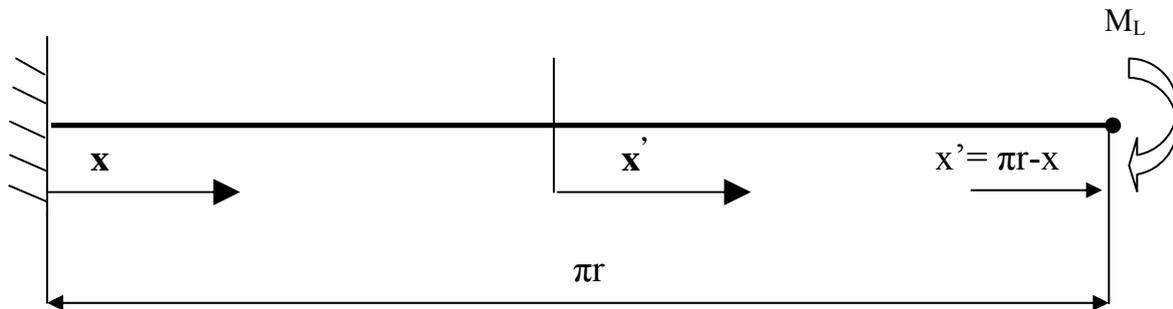


Figura 40: Sistema de referencia utilizado.

El momento total será:

$$M(x) = M'(x) - M_L \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$\text{Siendo } M'(x) = \int_{x=x'}^{x=\pi r} (q(x) + F(x, \delta))(x - x') dx \quad \text{Ecuación (24)}$$

Reemplazando

$$M(x) = \int_{x=x'}^{x=\pi r} (q(x) + F(x, \delta))(x - x') dx - M_L \quad \text{Ecuación (25)}$$

Utilizando el teorema de Castigliano³³ y aplicando las condiciones de contorno propias del problema es posible encontrar la solución de la expresión anterior.

Entonces utilizando el teorema:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad \text{Ecuación (26)}$$

$$\frac{dy}{dx} = \int \frac{M(x)}{EI} dx + C_1 = \int \frac{M'(x)}{EI} dx - \frac{M_L}{EI} x + C_1 \quad \text{Ecuación (27)}$$

$$y = \iint \frac{M(x)}{EI} dx dx + C_1 x + C_2 = \iint \frac{M'(x)}{EI} dx dx - \frac{M_L}{EI} \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2 \quad \text{Ecuación (28)}$$

Para poder averiguar el valor de las constantes debemos introducir las condiciones de contorno para las condiciones del problema.

Planteando condiciones en $x=\pi r$:

$$\frac{dy}{dx}_{x=\pi r} = 0 = \int \frac{M'(x)}{EI} dx - \frac{M_L}{EI} \pi r + C_1 \quad \text{Ecuación (29)}$$

$$\int \frac{M'(x)}{EI} dx = 0 \text{ en } x=\pi r \quad \text{Ecuación (30)}$$

Entonces:

$$\frac{dy}{dx}_{x=\pi r} = 0 = -\frac{M_L}{EI} \pi r + C_1 \quad \text{Ecuación (31)}$$

Planteando condiciones en $x=0$:

$$\frac{dy}{dx}_{x=0} = 0 = \int \frac{M'(x)}{EI} dx - \frac{M_L}{EI} 0 + C_1 \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$y_{x=0} = 0 = \iint \frac{M'(x)}{EI} dx dx - \frac{M_L}{EI} 0 + C_1 0 + C_2 \quad \text{Ecuación (33)}$$

Considerando ahora que:

$$q(x) = \rho g h \sin\left(\frac{x}{r} - \frac{\pi}{2}\right) \text{ y } F(x, \delta) = 0 \quad \text{Ecuación (34)}$$

La distribución de momentos será: Ecuación (35)

$$M'(x) = \int_{x'=x}^{x'=\pi r} [q(x') + F(x', \delta)](x' - x) dx \Rightarrow M'(x) = \int_{x'=x}^{x'=\pi r} \rho g h \sin\left(\frac{x'}{r} - \frac{\pi}{2}\right)(x' - x) dx$$

$$\Rightarrow M'(x) = \rho g h r^2 \left[1 + \cos\left(\frac{x}{r}\right) \right] \quad \text{Ecuación (36)}$$

Integrando la ecuación de la línea elástica con $M'(x)$ se obtiene: Ecuación (37)

$$\frac{dy}{dx} = \int \frac{M'(x)}{EI} dx - \frac{M_L}{EI} x + C_1 \Rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{\rho g h r^2}{EI} \left[x + r \sin\left(\frac{x}{r}\right) \right] - \frac{M_L}{EI} x + C_1$$

$$y = \iint \frac{M'(x)}{EI} dx dx - \frac{M_L}{EI} x + C_1 x + C_2 \Rightarrow y = \frac{\rho g h r^2}{EI} \left[\frac{x^2}{2} - r^2 \cos\left(\frac{x}{r}\right) \right] - \frac{M_L}{EI} \frac{x^2}{2} + C_1 x + C_2$$

Reemplazando las condiciones de contorno en la Ecuación (37) y (38) obtenemos:

$$\frac{dy}{dx}_{x=\pi r} = 0 = \frac{\rho g h r^2}{EI} \left[\pi r + r \sin\left(\frac{\pi r}{r}\right) \right] - \frac{M_L}{EI} \pi r + C_1 \Rightarrow M_L = \rho g h r^2 \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$\frac{dy}{dx}_{x=0} = 0 = \frac{\rho g h r^2}{EI} [0 + 0] - \frac{M_L}{EI} 0 + C_1 \Rightarrow C_1 = 0 \quad \text{Ecuación (40)}$$

$$y_{x=0} = \frac{\rho g h r^2}{EI} [0 - r^2] - \frac{M_L}{EI} 0 + C_1 0 + C_2 \Rightarrow C_2 = \frac{\rho g h r^4}{EI} \quad \text{Ecuación (41)}$$

Reemplazando C_1 , C_2 y M_L se obtiene la expresión final que describe el desplazamiento descrito por el extremo de la viga con vínculo doble por acción de una carga distribuida. No debemos olvidarnos que esta viga es el resultado del modelado de una media circunferencia, y expresión de la carga distribuida es el resultado de la acción del peso a dicha geometría.

Entonces la expresión final queda de la siguiente manera:

$$y(x) = \frac{\rho g h r^2}{EI} \left[\frac{x^2}{2} + r^2 \left(1 - \cos\left(\frac{x}{r}\right) \right) - \frac{x^2}{2} \right] = \frac{\rho g h r^4}{EI} \left[1 - \cos\left(\frac{x}{r}\right) \right]$$

Ecuación (42)

La ecuación analítica obtenida se utilizará con propiedades de material obtenidas de catálogos de tuberías plásticas. Se definen módulos al final de cada periodo de tiempo sacados de los valores instantáneos de la curva de Creep. Estos módulos de bibliografía técnica³⁴ son definidos para una carga inicial, que en este caso de estudio es el peso propio solamente. La magnitud de la carga se obtiene en base al factor de proyección que plantea el área en la cual el caño esta efectivamente apoyado en el piso. Calculada el área en contacto y con el

peso de cada una de las geometrías se obtiene la tensión resultante. A continuación en la **Figura 41** vemos las geometrías obtenidas de catálogos³⁵ las cuales se analizarán.

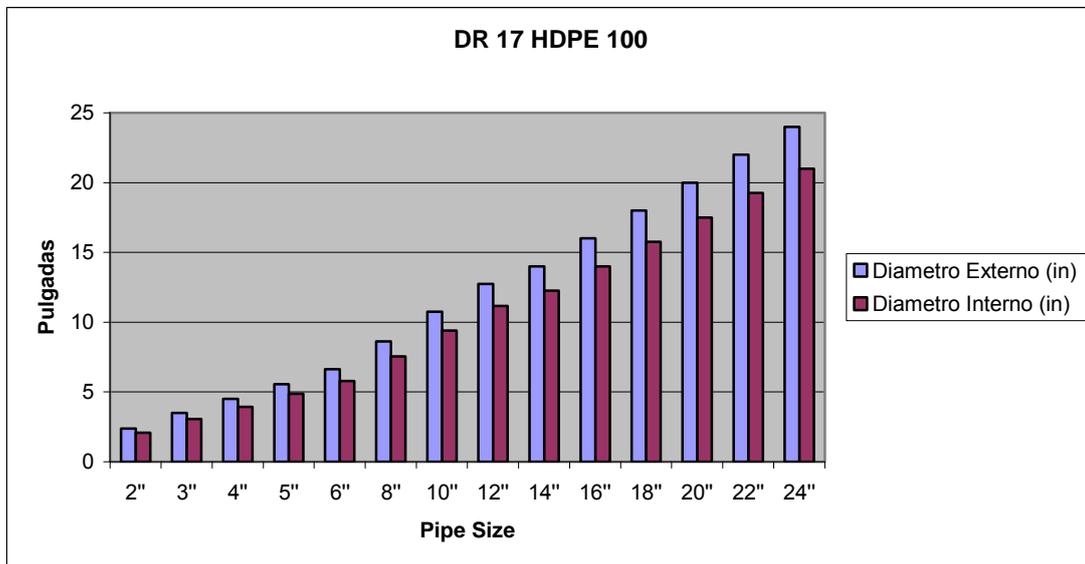


Figura 41: Dimensiones de caños utilizados.

En la **Figura 42** podemos visualizar los pesos correspondientes a cada caso. Se tomaran caños de un metro de longitud para efectuar la comparación.

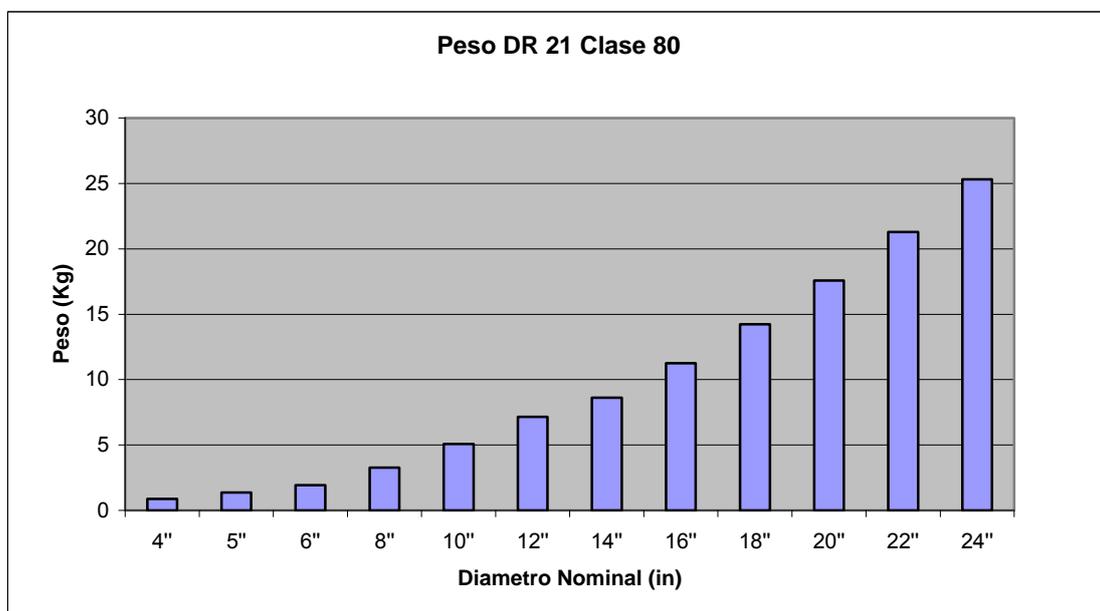


Figura 42: Peso de los caños en estudio.

Luego en la **Figura 43** a continuación se observan las tensiones generadas por el simple contacto del caño con el piso.

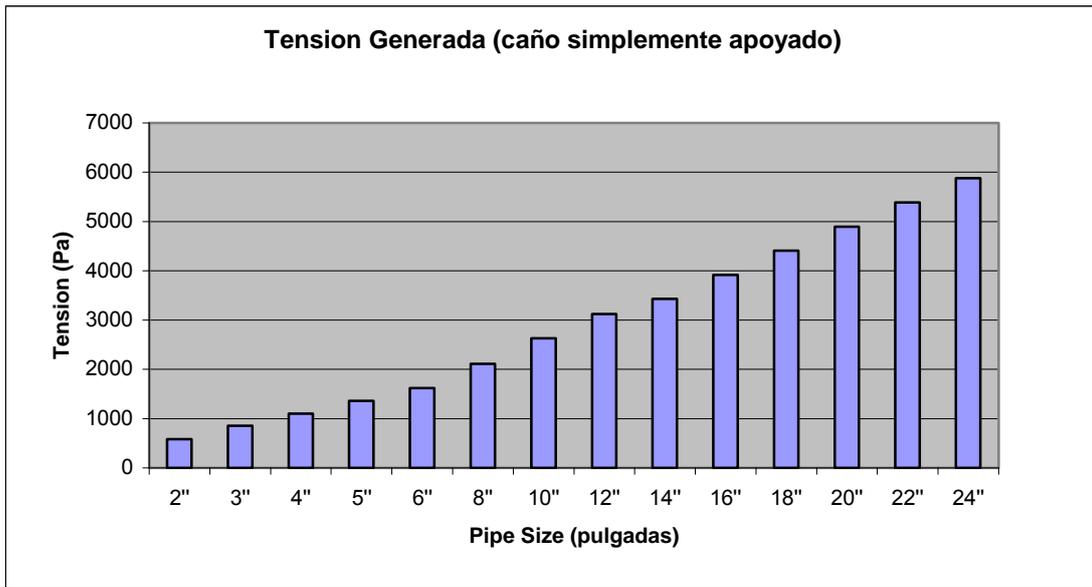


Figura 43: Tensión generada.

Las propiedades de Creep para el HDPE se definen en la **Figura 44** para una tensión inicial de 100psi. En el modelo de pequeñas deformaciones estos datos serán utilizados de manera discreta.

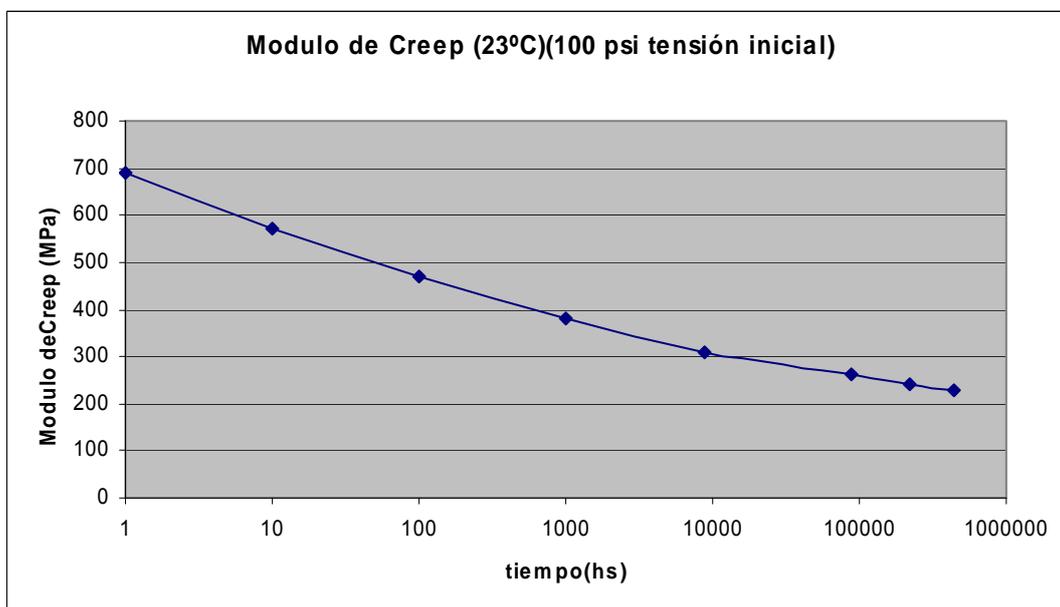


Figura 44: Modulo de Creep³⁴

Se resolverá un sistema pseudoelástico para definir el grado de ovalización, el cual tiene solución analítica conocida. Esto nos brindara resultados del modelo de manera instantánea para cada valor de modulo obtenido del grafico de Creep al final de cada intervalo.

Los resultados obtenidos se detallan a continuación:

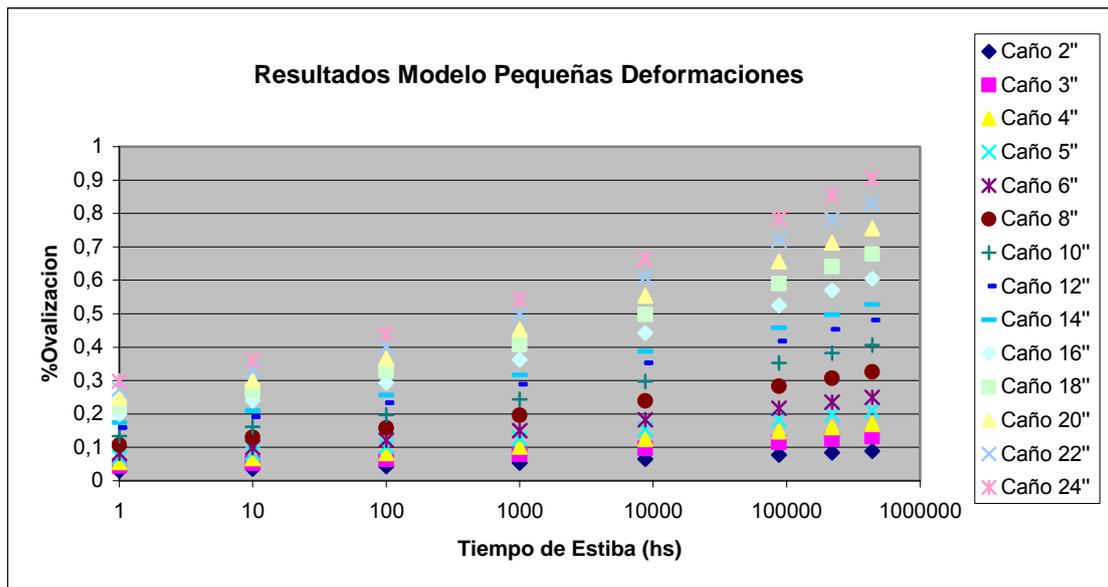


Figura 45: Resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos del modelo no reflejan lo que sucede en la realidad, dado que el grado máximo de ovalización obtenido es inferior al 1%. Este valor según dicho modelo se obtiene introduciendo valores de modulo a tiempos muy largos (438000 hs). Como los valores obtenidos no concuerdan con lo realmente sucedido se levantan las hipótesis de manera de mejorar los resultados obtenidos.

A continuación se hará uso de un software comercial usado en la practica de ingeniería, de este manera podemos levantar la hipótesis obteniendo mejores resultados.

7.2 Modelo Para Grandes Deformaciones

Se recurre a desarrollar un modelo numérico y obtener resultados acorde a lo visto en la realidad. A diferencia del modelo anterior en el cual se obtuvieron soluciones por puntos para bajas deformaciones este modelo será también por puntos pero para grandes deformaciones obtenidas con el software ABAQUS 6.6-3.

El modelo de grandes deformaciones que se utilizó levanta la hipótesis al sumarle un término que es despreciable en el anterior modelo de pequeñas deformaciones. La ecuación utilizada de forma completa es la siguiente:

$$\varepsilon_{i,j} = \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} - \frac{1}{2} \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \quad \text{Ecuación (43)}$$

Los primeros dos términos de la ecuación son los únicos que se tienen en cuenta para pequeñas deformaciones, esto quiere decir que se conserva la geometría inicial. Los términos derivados secundarios resultan importantes cuando se exige al modelo numérico este tipo de comportamientos para el cambio de forma. La solución a este problema se encarará directamente por la vía numérica dado la gran complejidad de las ecuaciones que se derivaran

El primer paso del desarrollo del modelo en computadora es llegar de manera grafica a las dimensiones establecidas de la pieza. Este paso se repite para cada una de las geometrías a estudiar como podemos ver a modo de ejemplo en la **Figura 46**.

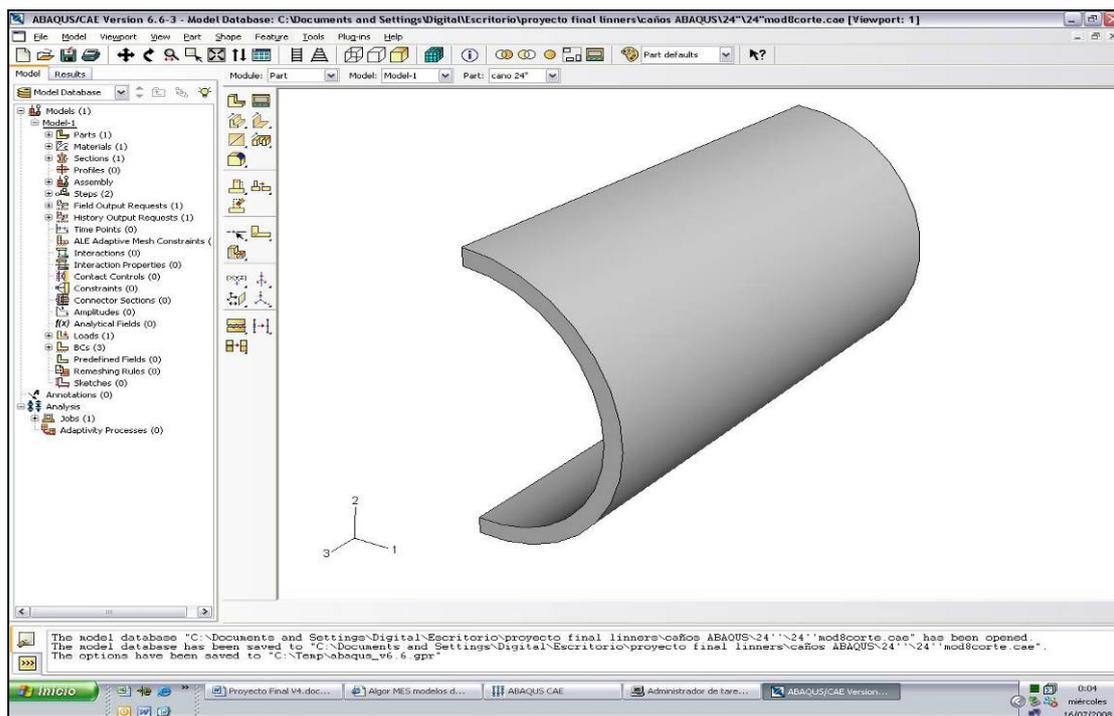


Figura 47: Croquis del modelo

Luego de graficar la pieza el Software requiere la introducción de las propiedades del material. Estos datos se obtienen de catálogos de materiales plásticos con los cuales se fabrican los tubos. El valor que se introduce de modulo elástico es el obtenido del grafico de Creep (Figura 44). Este se introduce reiteradas veces una vez que una corrida de solución fue completada para cumplir con el modelo que se definió. Uno de los mayores inconvenientes que

FACULTAD DE INGENIERIA

presentan este tipo de desarrollos numéricos es el error presente cuando no se trabaja con elementos de mallados suficientemente chicos. Para obtener resultados con el mínimo error posible se procedió de la siguiente manera: se fue mallando el modelo cada vez con mayor cantidad de elementos y se realizaron las corridas correspondientes hasta que los resultados entre dos corridas consecutivas presenten errores menores al 0.1%.

En el momento de definir la cantidad de pasos necesarios para la estabilización de los cálculos se introduce la condición de grandes deformaciones, de esta manera se consigue que cada uno de los elementos del modelo se pueda deformar un pequeño porcentaje mas sin desestabilizar los procedimientos de calculo.

En la siguiente figura se puede apreciar el modelo mallado. Luego se detalla de manera grafica los pasos donde se plantean las condiciones de contorno y las cargas aplicadas.

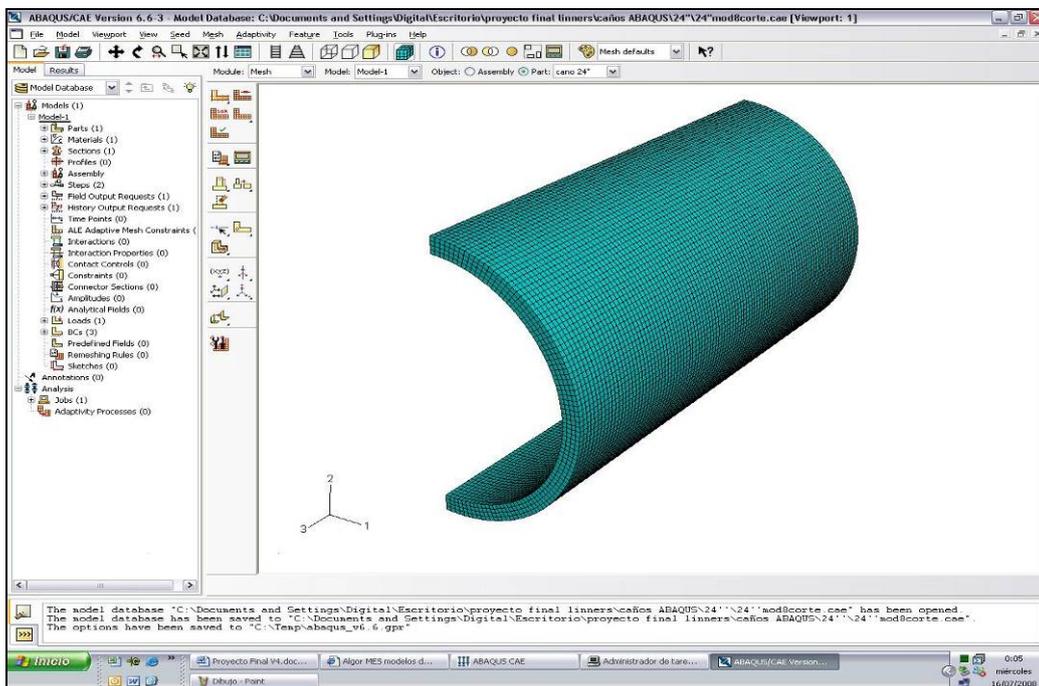


Figura 48: Mallado del modelo.

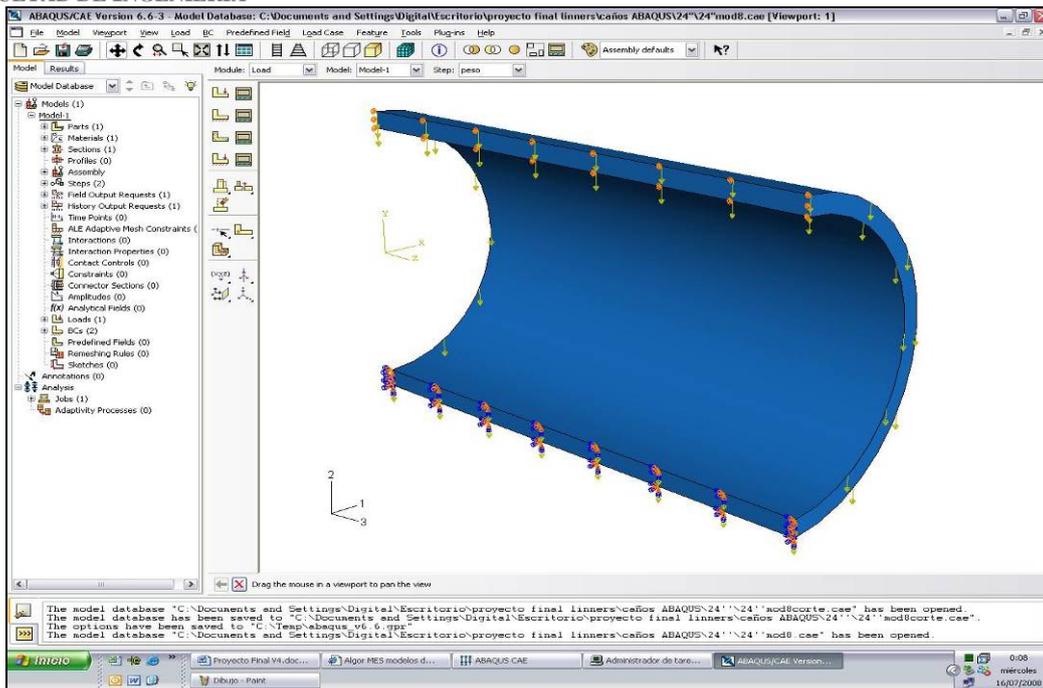


Figura 49: Condiciones de contorno y cargas aplicadas.

Luego de realizar todos los pasos que requiere el software se realizan las diferentes corridas.

A continuación se resumen los resultados obtenidos con el modelo de grandes deformaciones. Esta es la primera parte de resultados, ya que primero se analiza el proceso de ovalización y a partir de que diámetros se manifiesta. Luego teniendo en cuenta estos resultados se analiza a que distancia de los extremos se distorsiona el caño para cortarlo sin provocar innecesarios desechos de material.

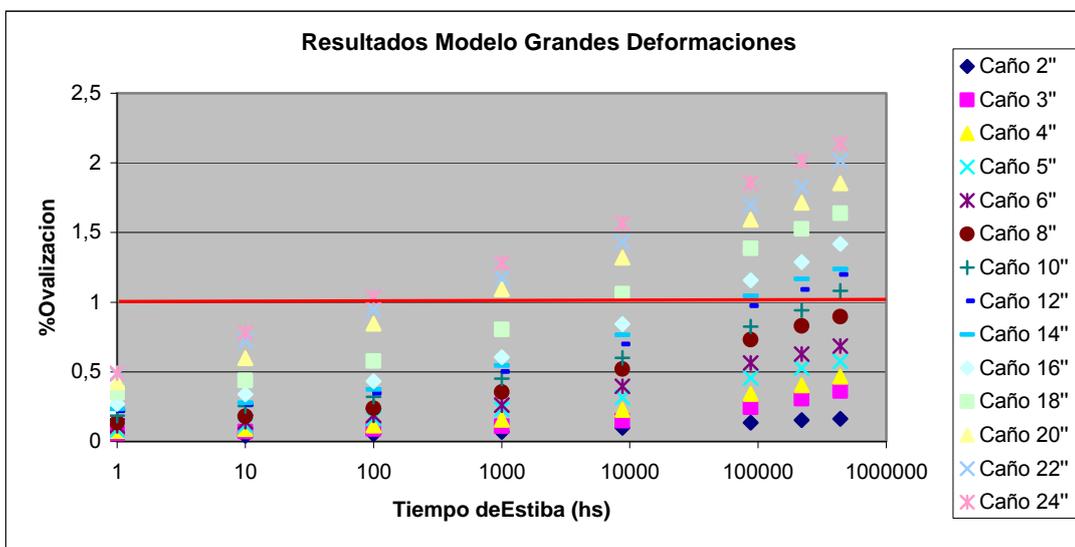


Figura 50: Resultados numéricos obtenidos.

Analizando los resultados obtenidos vemos una mayor deflexión que la presentada por el modelo de pequeñas deformaciones, superando en varios casos el 1% de ovalización que es el límite impuesto³⁶ por muchas empresas dedicadas a la soldadura de tuberías plásticas. En el siguiente grafico vemos una comparación entre los dos modelos desarrollados para un caño de 4”.

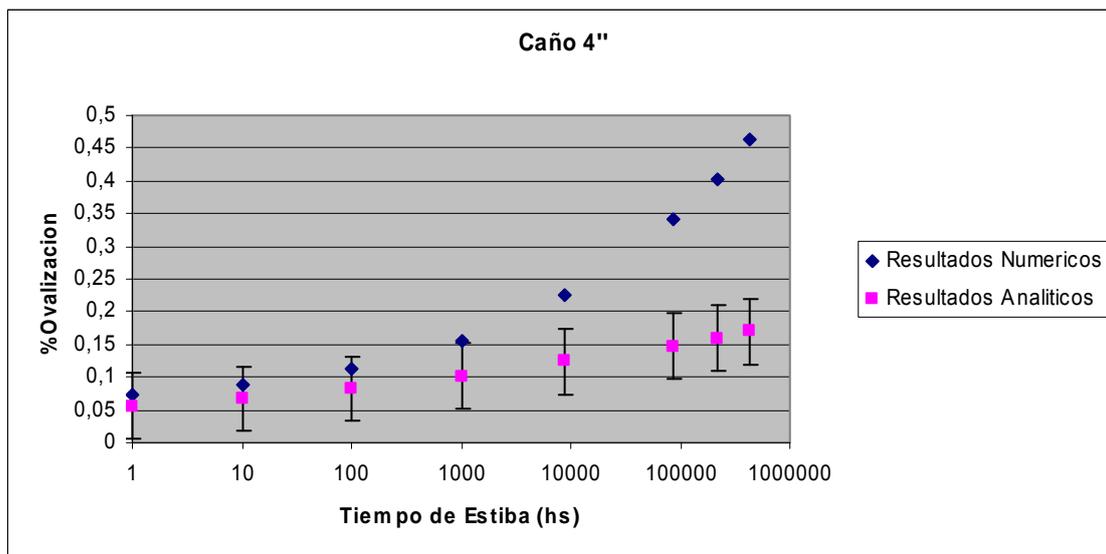


Figura 51: Comparación de resultados obtenidos.

Podemos ver en la figura anterior que a bajos tiempos de estiba los modelos tienen un comportamiento similar, siendo de pequeña magnitud los términos secundarios vistos en la Ecuación (43). A medida que la deformación aumenta el término secundario de producto de derivadas cruzadas empieza a tener peso y se separa de la linealidad presentada gráficamente en modelo de pequeñas deformaciones. Se detallan todos los resultados obtenidos en el **Apéndice 1**.

Análisis de Longitud Óptima de Corte

A esta altura del análisis se determina que los resultados obtenidos con el modelo numérico imponiéndole grandes deformaciones brindan soluciones más cercanas a la realidad. Se muestra a continuación los resultados del análisis efectuado sobre el alcance del fenómeno en función de la longitud. Los resultados se obtuvieron basándonos en los valores correspondientes al grado de ovalización hallados previamente. Para cuantificar el actuar del fenómeno se sumo al modelo una condición de contorno extra, entonces de esta manera

queda un extremo libre a la deformación vertical y al extremo opuesto se le impone un empotramiento. Haciendo sucesivos análisis para diferentes longitudes se determina la óptima para obtener resultados conservativos.

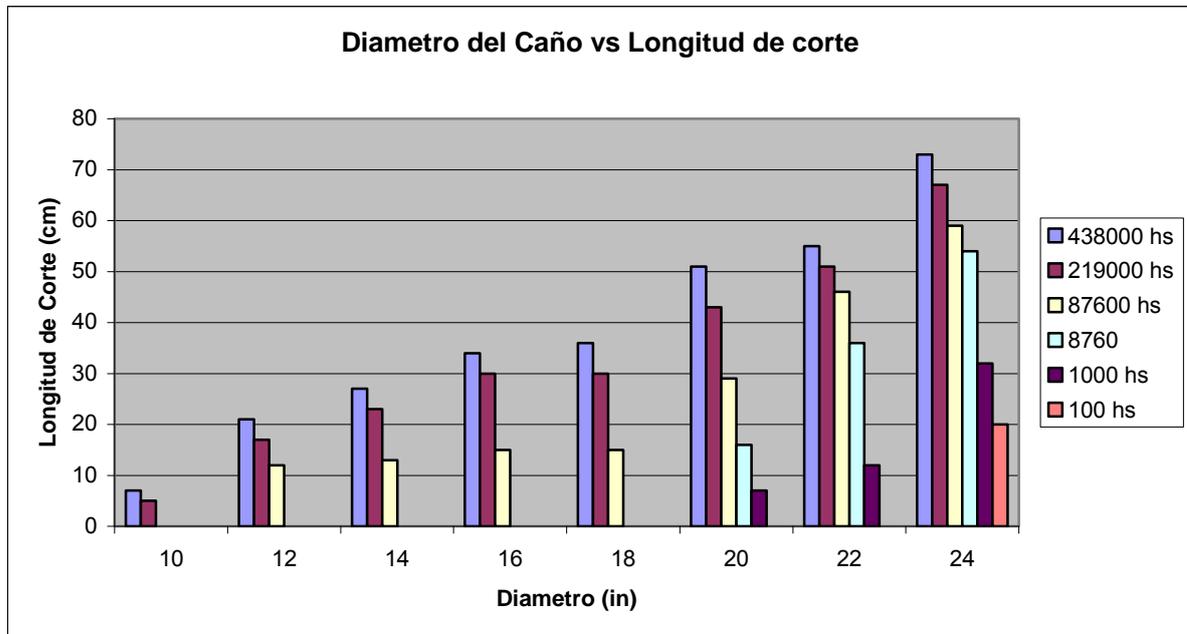


Figura 52: Longitudes de corte en función del largo de caño.

Cañería en disposición de Voladizo

Se planteo también el caso para un caño de 4" en disposición de voladizo. Esta disposición es comúnmente encontrada en los yacimientos o cuando se necesitan transportar los caños de un lugar a otro. En muchos casos como se explico en el **Capítulo 6**, el daño o colapso se da repentinamente, ya que la deformación vertical aumenta paulatinamente para este tipo de materiales sometidos a carga constante. Como consecuencia se disminuye el momento de inercia de la sección y directamente el esfuerzo necesario para la flexión. A continuación se muestra uno de los resultados obtenidos numéricamente para esta disposición.

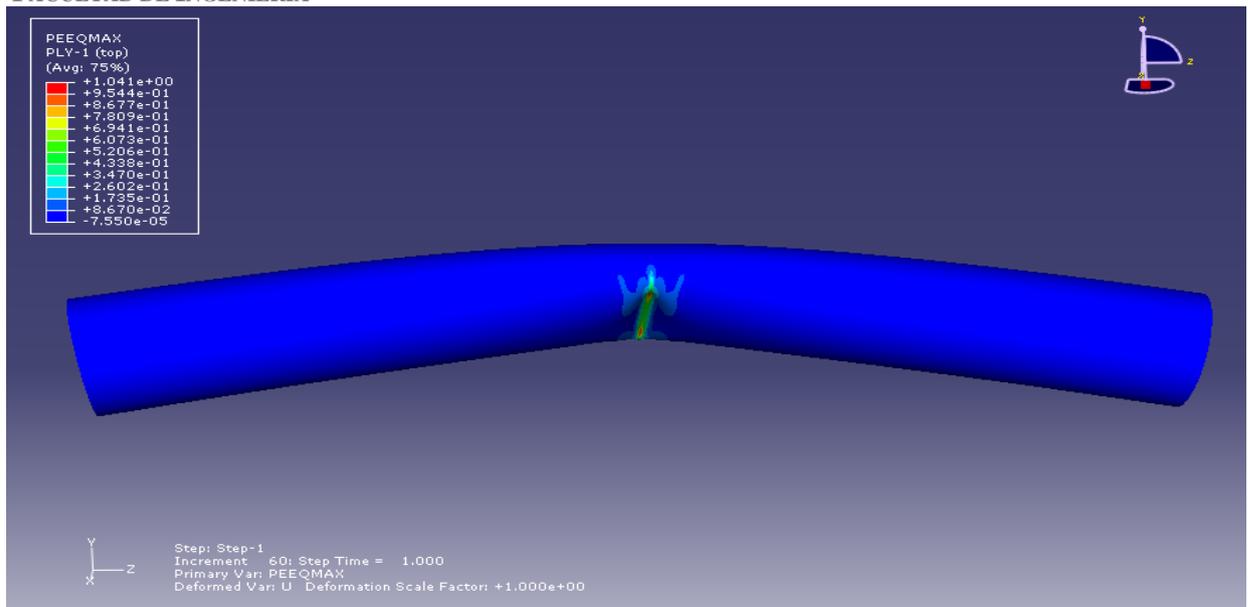


Figura 53: Geometría alcanzada con disposición en voladizo.

Puede verse que la cañería en las inmediaciones del punto de contacto con la superficie rígida queda inutilizada a fines prácticos. Por consiguiente se deduce la peligrosidad de esta disposición en campo si se desea mantener los caños íntegros o con una funcionalidad adecuada.

Conclusiones

Andrés Rodríguez

Se determinó que la imposición de grandes deformaciones al modelo desarrollado es adecuada y brinda soluciones cercanas a la realidad. Como se planteo en el transcurso del trabajo, era esperable una deformación vertical lo suficientemente grande para la no soldabilidad de la cañería. Estas deformaciones se alcanzan a tiempos largos para caños de pequeños diámetros y espesores, y tiempos cada vez más cortos a medida que el diámetro aumenta. Como pudimos ver en el transcurso del capítulo las tensiones generadas por el caño apoyado simplemente en el piso son de pequeña magnitud independientemente del tipo de suelo. Para cada uno de los estudios realizados se planteo la peor condición de apoyo, es decir en un solo punto como si en un principio fuese un sólido indeformable. Esto da la pauta de lo conservativos de los resultados.

En la realización de los cálculos para determinar la magnitud del fenómeno en los caños de mayores diámetros, inicialmente se plantearon modelos con caños de mayor longitud, estas se fueron acortando a medida que no se veían cambios en los resultados. Los desechos de material son importantes y debe prestarse especial atención para las cañerías más grandes que incluso presentan el fenómeno al cabo de 100 hs. Esto justifica el uso de soportes internos para grandes caños en los países de Europa donde son comúnmente usados para desagües pluviales y transporte de agua.

El contacto directo del caño con imperfecciones o salientes en el suelo magnifican el proceso de daño. Lo mismo ocurre cuando no se tienen los recaudos suficientes y las cañerías quedan en disposición de voladizo. Cuando por alguna razón se presenta daño en voladizo la longitud de descarte depende directamente del largo del extremo libre, lo que conlleva a grandes pérdidas de material o excesivo tiempo de soldadura. Es claro y fue el objeto del presente trabajo, que el caño "liner" debe presentar una circunferencia casi perfecta para que el contacto con el caño metálico sea el mayor posible y se desempeñen de manera satisfactoria.

Como conclusión final del estudio realizado se determina que los caños más propensos a sufrir el fenómeno son los de mayor diámetro a tiempos relativamente cortos. Se concluye también que la disposición en voladizo es una



causante mayor de daño y descarte que la ovalización por peso propio para los caños de menor diámetro a tiempos más cortos. En base a las conclusiones se determina la importancia de la correcta estiba no solo en campo sino también durante el transporte y salida de fábrica. Se comprueba la importancia en el uso de soportes internos para cañerías con diámetros mayores a 16”.

Apéndice 1
Comparación de resultados.

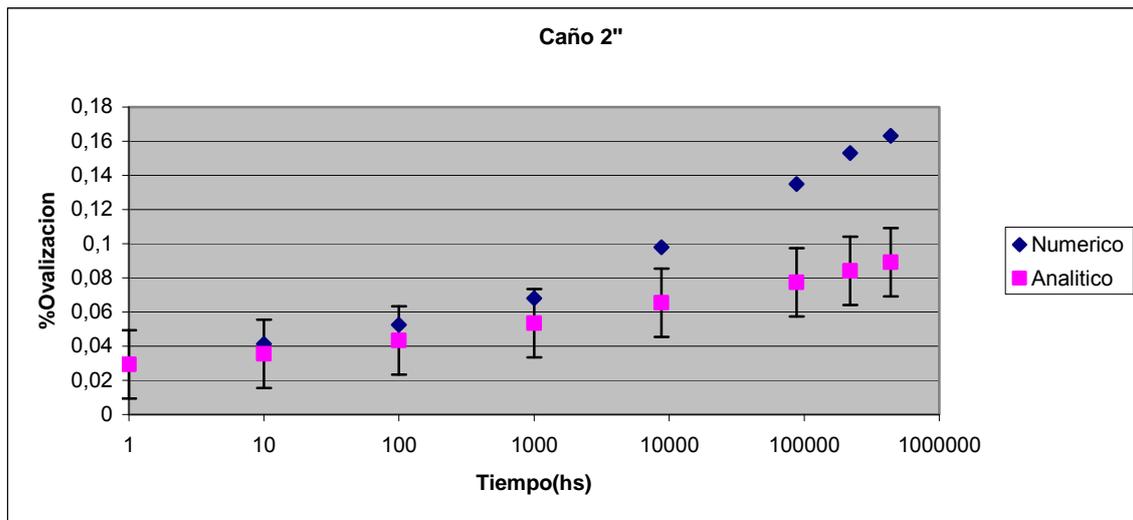


Figura A1: Comparación de resultados. Caño 2''.

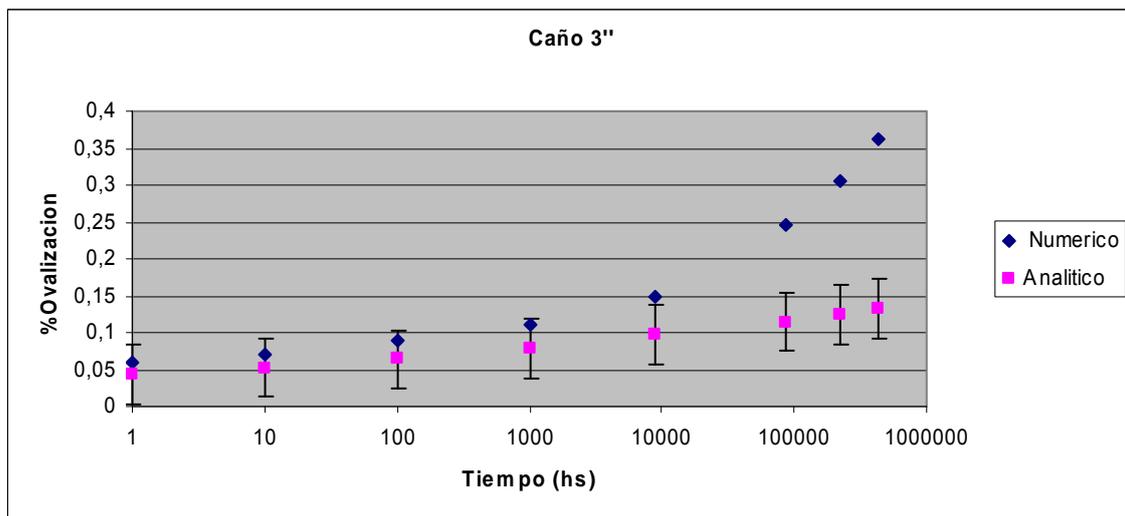


Figura A2: Comparación de resultados. Caño 3''.

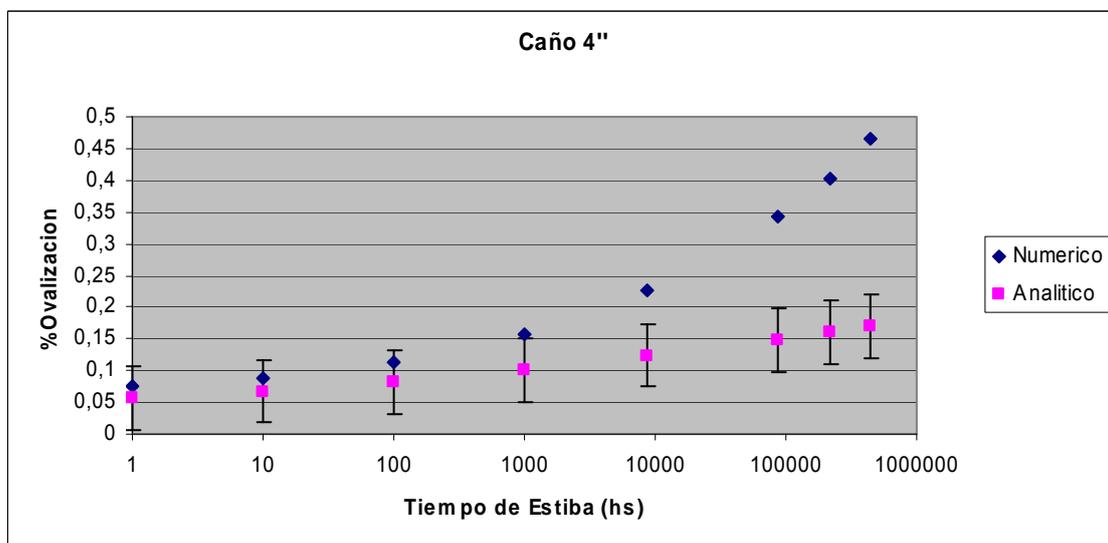


Figura A3: Comparación de resultados. Caño 4''.

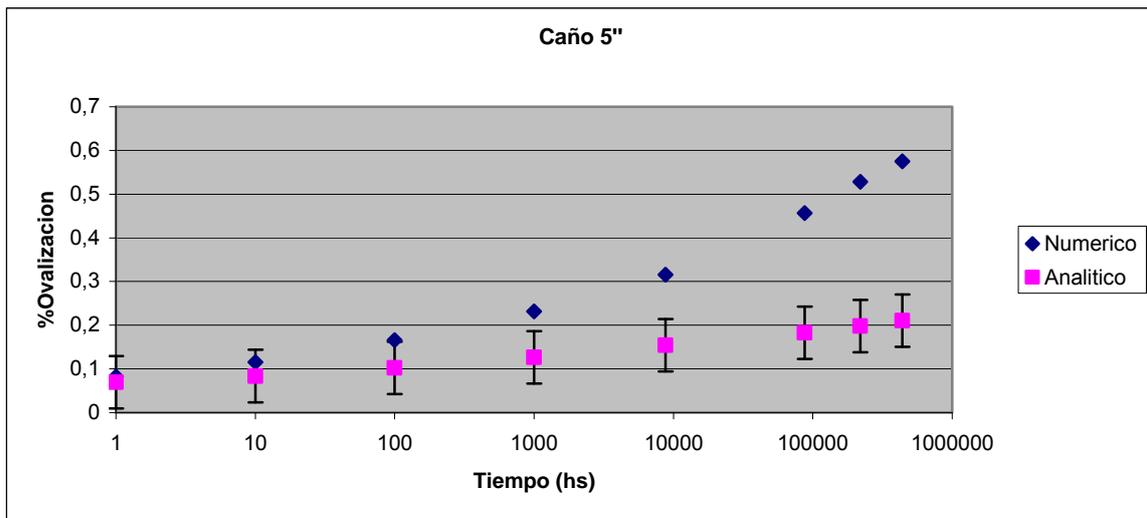


Figura A4: Comparación de resultados. Caño 5''.

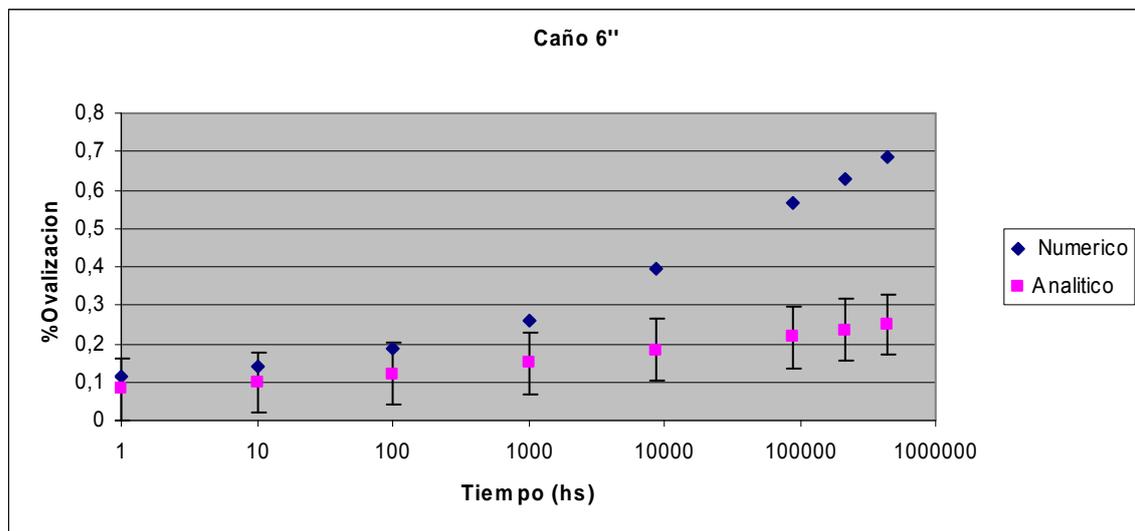


Figura A5: Comparación de resultados. Caño 6''.

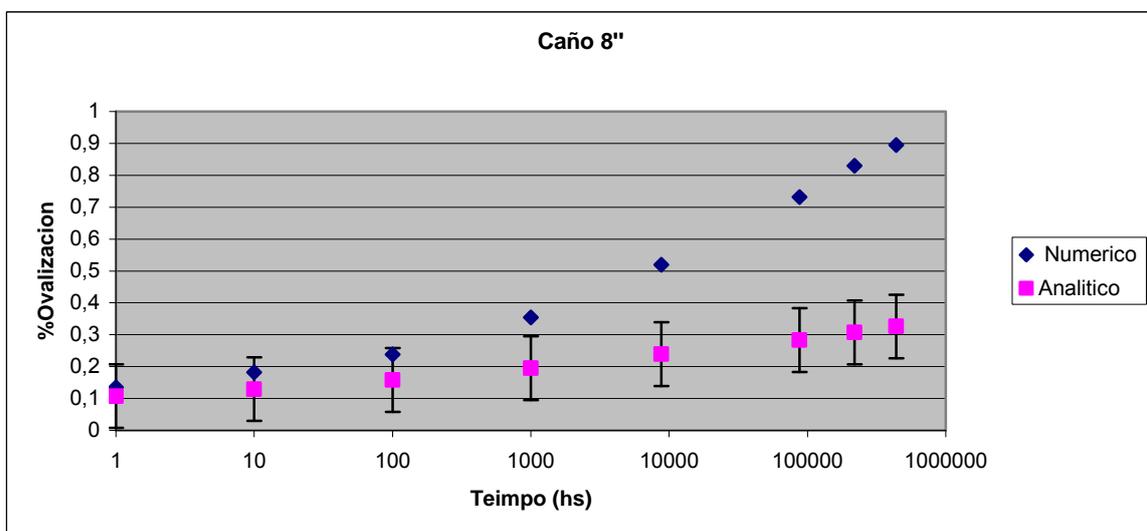


Figura A6: Comparación de resultados. Caño 8''.

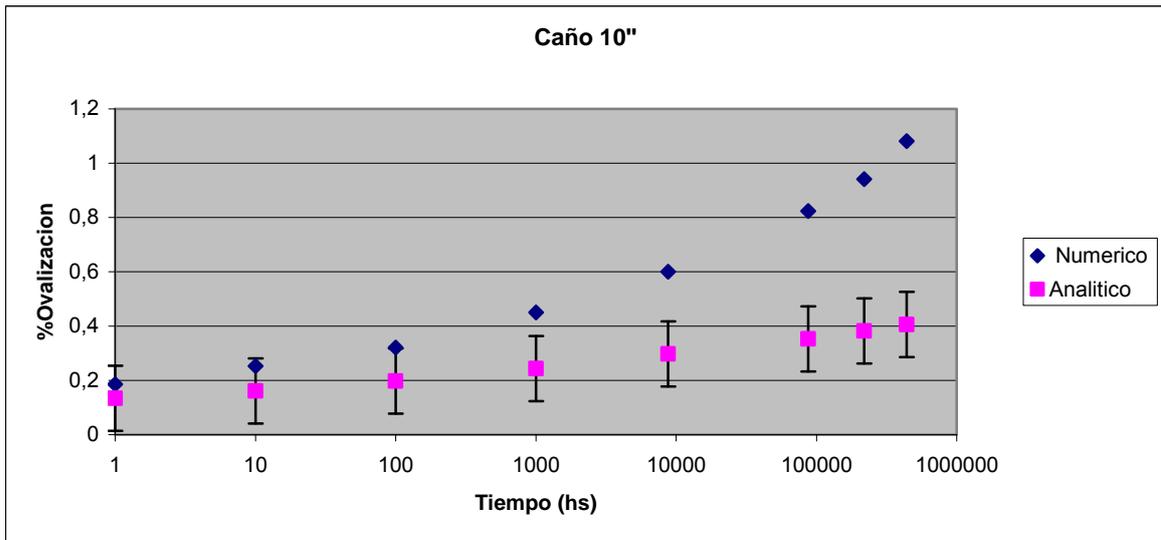


Figura A7: Comparación de resultados. Caño 10''.

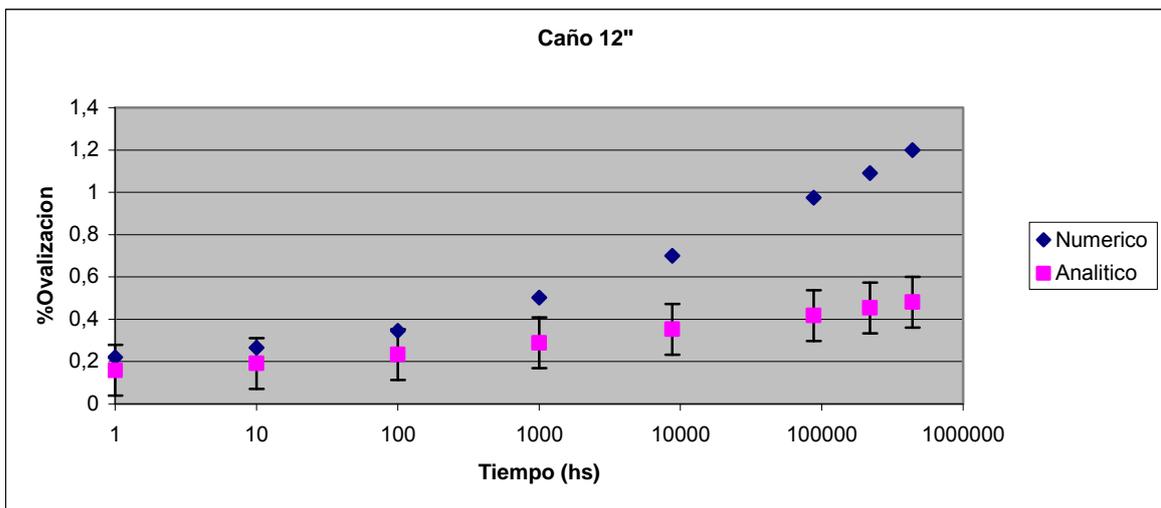


Figura A8: Comparación de resultados. Caño 12''.

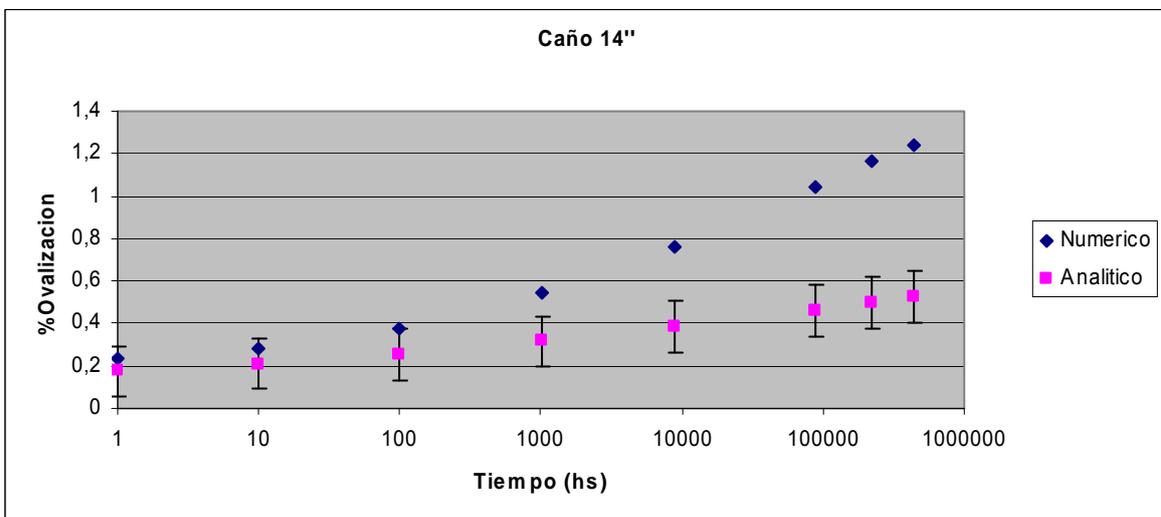


Figura A9: Comparación de resultados. Caño 14''.

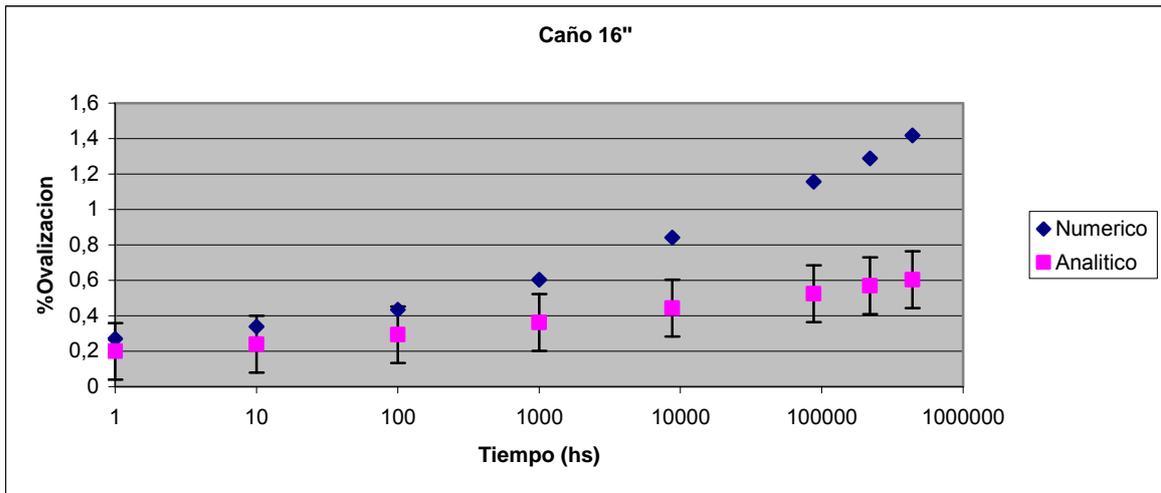


Figura A10: Comparación de resultados. Caño 16''.

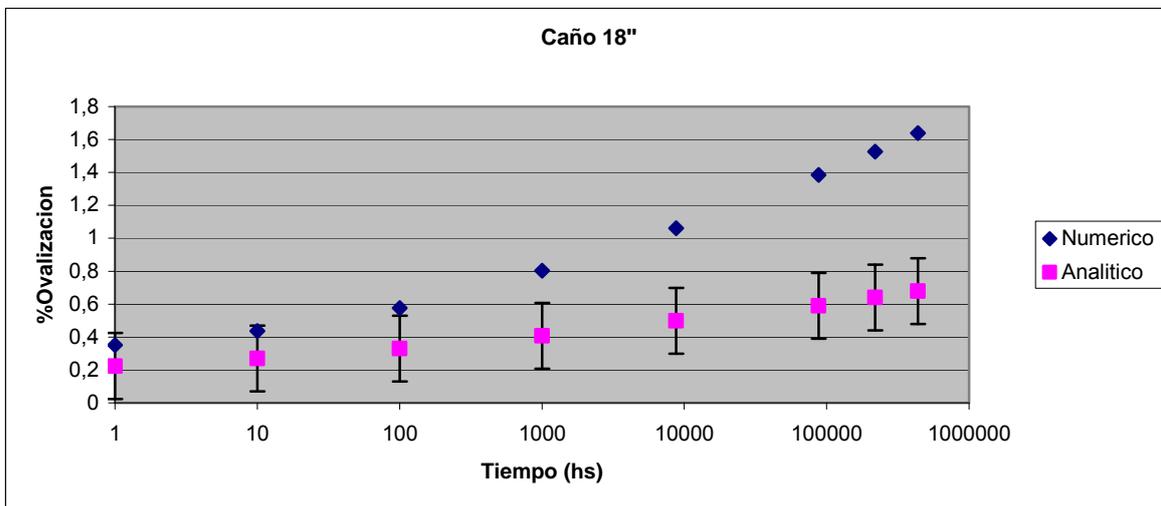


Figura A11: Comparación de resultados. Caño 18''.

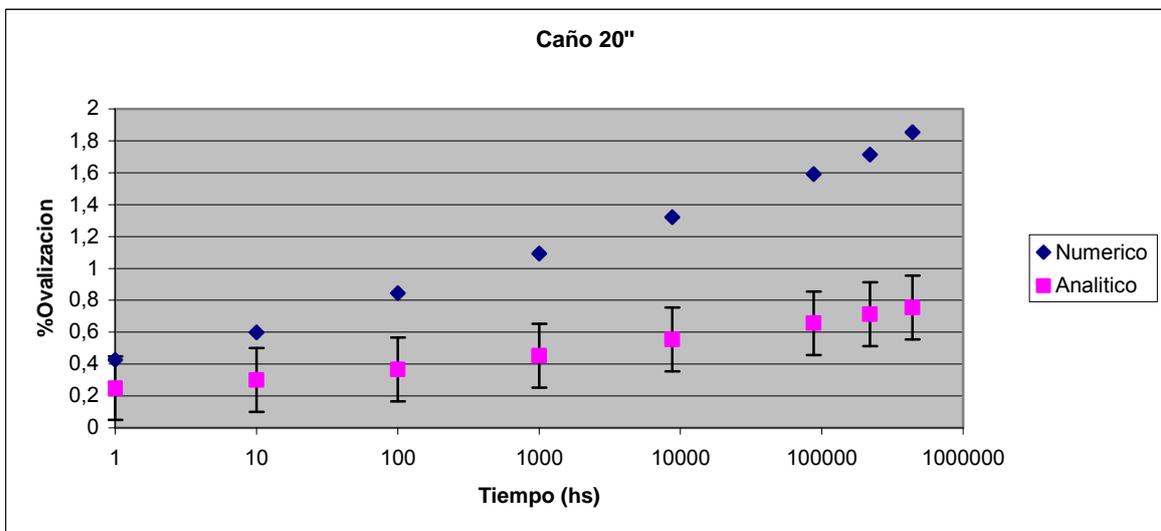


Figura A12: Comparación de resultados. Caño 20''.

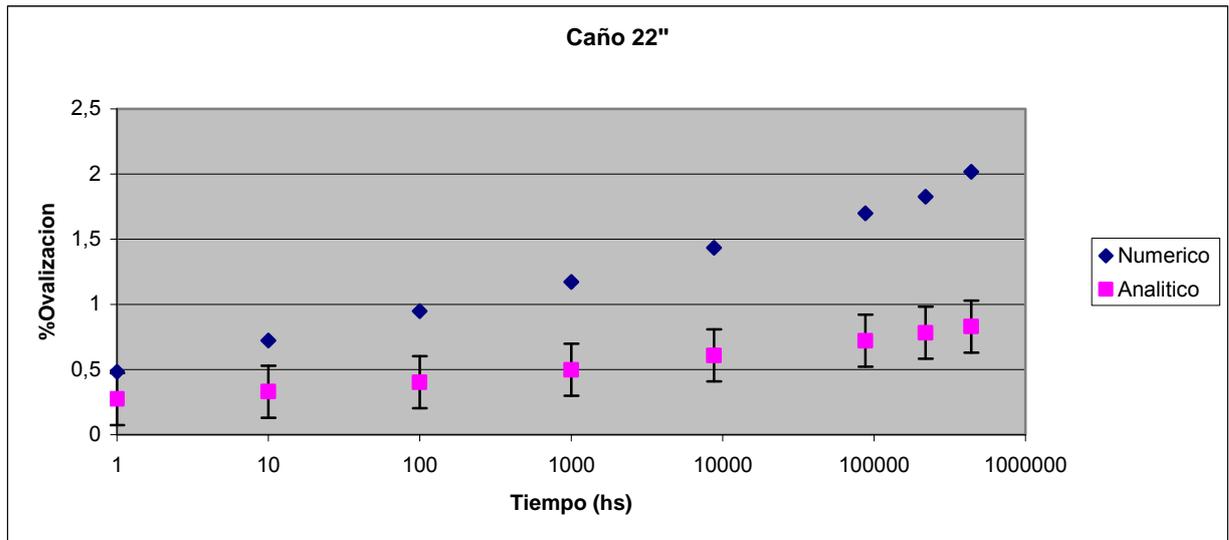


Figura A13: Comparación de resultados. Caño 22''.

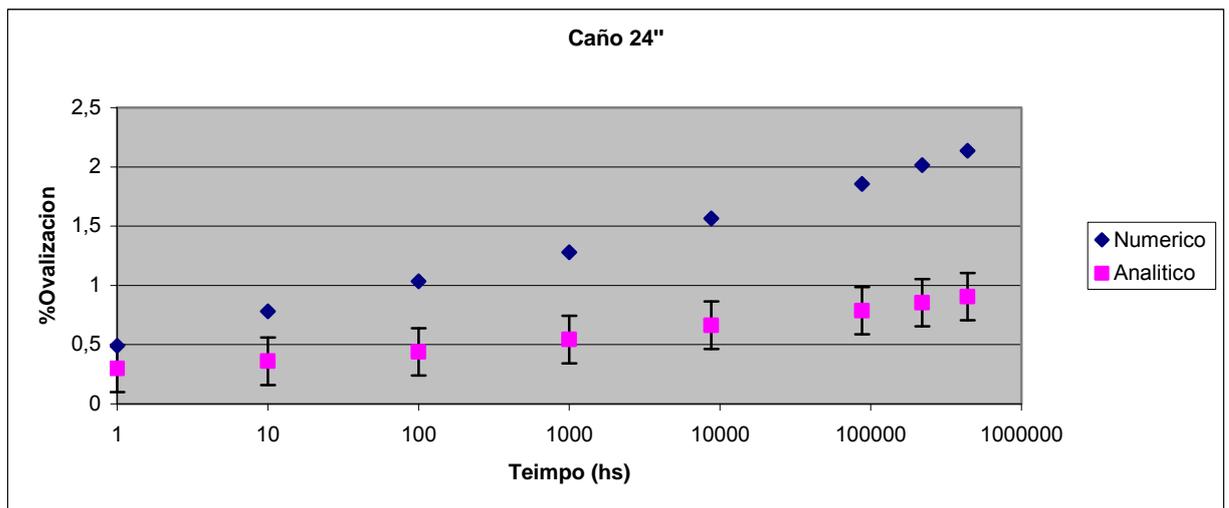


Figura A14: Comparación de resultados. Caño 24''.

Referencias Bibliográficas

- ^{1, 2} *Plastic Pipe Sistem-Faiulure Investigation and Diagnostic (2006)*, Swiss Federal Laboratories for Materials, EMPA Switzerland.
- ³ *Existing Sewer Evaluation and Evaluation.*(1983). American Society of Civil Engineers and the Water Environment Federation, New York.
- ⁴ *Un sector positivo y en crecimiento*; María Cristina Ocampo Villegas, Abril 2006
- ⁵ *Un sector positivo y en crecimiento*; María Cristina Ocampo Villegas, Abril 2006
- ⁶ Society of Plastics Industry Inc(2006)
- ⁷ LARS-ERIC JANSON,,Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposnal.P.19-21
- ⁸ LARS-ERIC JANSON,,Plastics Pipes for Water Supply and Sewage Disposnal.P.173-174
- ⁹ Sandstrum, S.D (1986, August). Sewer Rehabilitation with Polyethylene Pipe.
- ¹⁰ *Renewing Sewers with Polyolefin Pipe.*(1985,June). A publication of the Plastic Pipe Institute, Washington, DC.
- ¹¹ Predicción, Análisis y Tratamiento de Depósitos en Operaciones de Producción de Petróleo – Revisión Bibliográfica y Estado del arte – J. C. Sotomayor – Simposio de Producción de Hidrocarburos – Bariloche 1988 – p 607-630
- ¹² J.Baron Project Services,. Non Metallic Solution for Oilsands,.NACE INTERNATIONAL 2006
- ¹³ Moghissi-Place, Internal Corrosion Direct Assessment Methodology for Liquid Petroleum Pipelines, NACE INTERNATIONAL 2007
- ¹⁴ *Plastic Pipe Sistem-Faiulure Investigation and Diagnostic (2006)*,Swiss Federal Laboratories for Materials, EMPA Switzerland..P12-13.

-
- ¹⁵ *Non Metallic Solutions for Oilsands (October 2006)*,. John Baron. NACE INTERNATIONAL.
- ¹⁶ REGLAMENTO DE TRANSPORTE DE HIDROCARBUROS,.Resolución 1460 ANEXO 2,.ENERGAS.
- ¹⁷ *Pipeline Replacement Using Relining*,. (2006), Mark Heathcote. Plastics Industry Pipe Association. PIPA
- ¹⁸ J.C Boot y M.M.Naqvi, Corrosión 2000, #777
- ¹⁹ James F Mason, Elf Aatochen North America and John D. Alkire, BP Amoco Exploration NACE, Corrosion Paper N° 00782
- ²⁰ Meihuan Zhu, Davis E.Hall, Creep Induced Contact and Stress Evolution in Thin-Walled Pipe Liners,. Thin Walled Structures 39(2001) 939-959.
- ²¹ James F Mason, Elf Aatochen North America and John D. Alkire, BP Amoco Exploration NACE, Corrosion Paper N° 00782
- ²² Boot JC. Elastic buckling of cylindrical pipe lining whit small imperfections subject to external pressure. Trenchless Technol Res 1998; 12(1/2):3-15.
- ²³ Chicurel R. Shrink buckling of thin circular rings. ASCE J Eng. Mechan Div EM 1971; 97:1121-32.
- ²⁴ Mc Alpine GA. Statistical analysis and implications of test data from long-term structural behaviour of pipeline rehabilitation systems. Water Environment Federation 69th Annual Conference and Exposition, Dallas, Texas, October 5-9, 1996.
- ²⁵ Aggarwal SC, Cooper MJ. External pressure testing of insituform lining. Internal report, 1984.
- ²⁶ Timoshenko SP, Gere JM. Theory of elastic stability. 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1961
- ²⁷ Falter B. Structural analysis of sewer linings. Trenchless Technology Res 1996;11(2):27-41

-
- ²⁸ Timoshenko SP, Gere JM. Theory of elastic stability. 2nd ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1961
- ²⁹ Zhao J. Finite element analysis of creep buckling for cured-in-place pipe. MS thesis, Louisiana Tech University, Ruston, LA, USA, 1998.
- ³⁰ Glock D. Behaviour of liners for rigid pipeline under external water pressure and thermal expansion. Der Stahlbau 1977; 7:212–7.
- ³¹ ASTM F1216-93. Standard practice for rehabilitation of existing pipelines and conduits by the inversion and curing of a resin-impregnated tube. ASTM, Philadelphia, PA, USA, 1989
- ³² Ing Pérez Farras, L. Ing Pérez Sandra ,M. Nociones sobre calculo estructural de conducciones enterradas. Departamento de Hidráulica. UBA noviembre 2003
- ³³ Ing J,L Otegui Ph.D. Mecánica de materiales estructurales. Primera Edición, Marzo 2004; 247-255.
- ³⁴ Polyethylene Piping Systems. Driscopipe® 6400.
- ³⁵ Independent Pipe Products, Inc.
- ³⁶ Plásticos Huelva. Sistemas de Tuberías contra la corrosión- Materiales termoplásticos. Procedimiento de Unión PLH-DT-TP-Soldadura Rev. 1.