



Universidad Nacional Autónoma de
México

Centro Tecnológico Aragón



**INFORME DE INVESTIGACIÓN
SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE
TUBERÍA DE PARED
ESTRUCTURADA DE POLIETILENO
DE ALTA DENSIDAD (PEAD)**

**M. en C. Jacinto Cortés Pérez.
I.Q. Sergio Alfonso Martínez González**

Septiembre de 2003.

Introducción

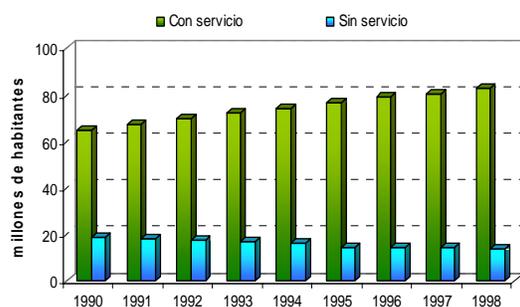
La Universidad Nacional Autónoma de México a través del Centro Tecnológico Aragón (CTA) se dio a la tarea de realizar un estudio de las diversas tuberías de drenaje que son empleadas actualmente en nuestro país. En particular, el interés se centró en las tuberías que poseen una pared estructurada, ya que presentan dimensiones inferiores a las de los tubos de pared constante y además se emplean materiales que tradicionalmente no han sido usados para estos fines, tales como el polietileno de alta densidad (PEAD). Una razón más que motivó el estudio, fue el hecho de que una breve investigación, realizada en fuentes especializadas de información, mostró que a pesar de los esfuerzos realizados por el gobierno federal, a la fecha, existen grandes carencias de servicios de suministro de agua potable y drenaje principalmente en zonas rurales de nuestro país. A continuación se presentan algunos de los datos que revelan la situación mencionada.

En materia de agua potable y alcantarillado se han logrado importantes avances desde 1990 a 1998. Actualmente la cobertura de agua potable es del 94.3 y 64.4% en población urbana y rural respectivamente. En materia de alcantarillado para 1998 fue de 87 y 32%.

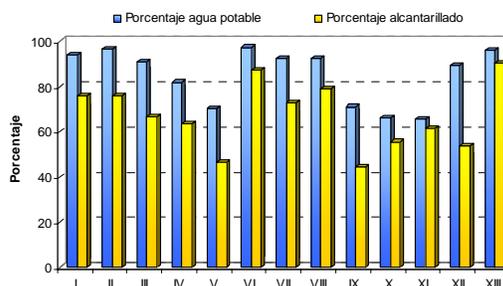
Tipo de población	Población total (mill. hab)	Porcentaje de cobertura de agua potable	Porcentaje de cobertura de alcantarillado
Urbana	70.5	94.3	87.0
Rural	25.3	64.4	32.0
Total	95.8	86.4	72.4

Fuente: CNA. Compendio Básico del Agua en México. Página 28. México.

Servicios de agua potable



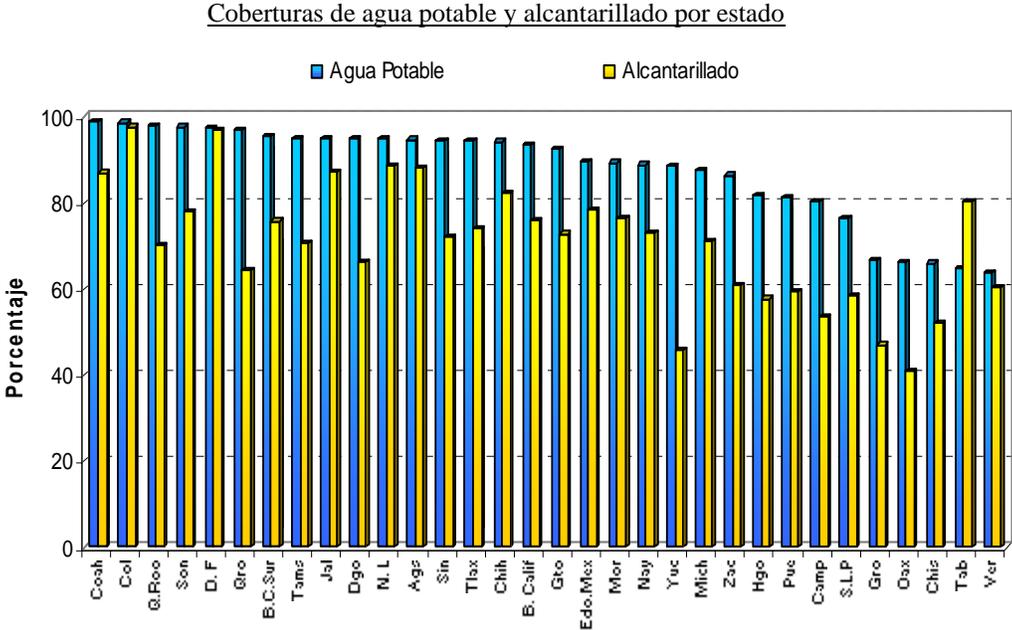
Porcentaje de cobertura de agua potable y alcantarillado por regiones administrativas**



Fuente: Castelán E. Análisis y Perspectiva del Recurso Hídrico en México. Pág 29. México

** CNA; 1999 : Compendio Básico del Agua en México, pág 28 y 30

Es importante destacar que el porcentaje de cobertura hace referencia a la cantidad de personas que tienen acceso al servicio de agua potable, sin hacer referencia a la calidad, ni al tipo de servicio. Asimismo, la distribución de éstos, no es homogénea ya que los mayores porcentajes de cobertura se ubican en el centro y norte del país.



Fuente: CNA; 1999 : Compendio Básico del Agua en México; Pág 31. México

Cabe mencionar que actualmente la cobertura de drenaje no ha sido cubierta en su totalidad y como la demanda de agua potable se incrementa año con año, es necesario crear una infraestructura capaz de desalojar las aguas residuales. Asimismo, es preciso considerar que uno de los problemas que se reportan para el drenaje, es la pérdida de capacidad para desalojar el agua residual y los tipos de materiales que son empleados en su fabricación.

La primera etapa de nuestro trabajo se enfocó al análisis de las normas que aplican a este tipo de tubería considerando que los criterios de diseño empleados para desarrollar productos similares son propiedad de cada empresa. De esta manera, partimos del hecho de que las normas desarrolladas deben tener como fin asegurar el adecuado funcionamiento de productos similares disponibles en el mercado. Es claro que sólo los productos que cumplen con dichas normas podrán ser empleados en obras públicas y/o privadas.

Debido a lo anterior se tiene que las normas deben ser definidas a través de un estudio profundo y riguroso de las condiciones reales de trabajo a las cuales estará expuesto el producto. Un estudio conveniente permitirá entonces establecer parámetros fundamentales que determinan la eficiencia con la que se espera que un producto se desempeñe durante el servicio.

Es importante destacar que en México una práctica común, que se contempla incluso en diversas leyes, es tomar normas procedentes de países desarrollados para evaluar productos similares debido a que dichas normas han sido validadas por especialistas y aceptadas para su uso. No obstante es importante mencionar que dichas normas son sujetas a constantes modificaciones debido a que su conveniencia depende del tiempo en el que son empleadas y de la evaluación de los resultados que han sido obtenidos en el servicio. Asimismo, es de suma importancia considerar que es posible que las condiciones de servicio en las que trabajan productos similares en nuestro país pueden cambiar y por ello, una norma que ha funcionado adecuadamente en otro país puede no resultar conveniente en México y esto debe ser tomado muy en cuenta.

En el caso particular de las normas que están siendo aplicadas en nuestro país para evaluar la eficiencia de tubería de drenaje, han sido tomadas como referencia, por razones obvias, las normas provenientes de Estados Unidos (Normas ASTM, AASHTO M294) Canadiense (CSA B182.6) y de la Comunidad europea. Con el espíritu de contribuir a la tarea de asegurar la calidad de los tubos para drenaje sanitario y pluvial, el CTA se dio a la tarea de revisar y evaluar las normas internacionales correspondientes, en particular las referentes a tubos corrugados de polietileno de alta densidad, así como la propuesta de norma mexicana NMX-E-241 que hoy en día se encuentra en proceso de revisión. El resultado de nuestro análisis nos permitió emitir una opinión técnica sobre la pertinencia de la misma y hacer algunas recomendaciones al respecto que tengan como fin, a mediano y largo plazo, optimizarlas.

Cabe destacar que nuestro análisis considera una intensa revisión de la bibliografía especializada existente, el estudio de las normas mencionadas, y la realización de estudios tanto teóricos como experimentales.

Tomando en cuenta las características geométricas de los tubos de PEAD con pared estructurada, las propiedades físicas y químicas del polietileno y la aplicación que se desea dar a dichos productos, el análisis que realizamos se enfocó a los siguientes aspectos:

- a) La conveniencia del espesor de pared interna.
- b) Los mecanismos que promueven la aparición y crecimiento de grietas.
- c) La resistencia al desgaste del material al ser sometido a condiciones de abrasión.

Para poder evaluar la conveniencia de las normas propuestas referentes a cada punto mencionado, fueron realizados los siguientes estudios preliminares, tanto teóricos como experimentales, en tubos de PVC con pared constante y de polietileno de alta densidad (PEAD) con pared estructurada.

- Compresión diametral libre.
- Compresión transmitida a tubos confinados.
- Deformación de la estructura de la pared de un tubo corrugado.
- Estudio de desgaste en tubos de PEAD corrugados y de PVC con pared constante.

La descripción detallada de los estudios realizados así como la discusión de los resultados obtenidos se describe en el documento anexo a la presente denominado reporte técnico. En la siguiente sección se presentan sólo las conclusiones derivadas de dichos estudios en

particular haciendo recomendaciones sobre la pertinencia de aplicar algunas normas en particular. Cabe destacar que aunque los estudios realizados son preliminares, fueron seleccionados cuidadosamente a fin de que los resultados que arrojaron permitan revelar la respuesta de los tubos ante las condiciones de servicio esperadas. En particular, se hizo énfasis en estudiar la respuesta mecánica de los tubos.

Queremos también manifestar nuestra felicitación por el interés del CNCP y la CNA en generar normas que cubran las nuevas tecnologías y productos disponibles en el mercado, y provean un marco adecuado que asegure técnicas de fabricación de esos productos y su aplicación en México

Reporte técnico

1. Marco Teórico

Antecedentes

Iniciaremos nuestra discusión haciendo una breve descripción de las normas aplicadas hoy en día en Estados Unidos para tubos que trabajan por gravedad. Concretamente se hace una descripción general de las normas AASHTO que son las que constituyen la base de la norma NMX-E-241 que se encuentra en discusión.

Las tuberías termoplásticas comenzaron a ser utilizadas hace 50 años en Europa y Norteamérica para drenaje y manejo de agua. La tubería de polietileno ha sido empleada para drenaje desde hace 35 años en Estados Unidos y para drenar vías de comunicación rápida desde hace 30 años. Estas tuberías eran generalmente de 150 mm (6 in) de diámetro y más pequeñas. Su uso y aplicaciones se extendieron, así como sus diámetros, provocando cuestionamientos acerca del tiempo de servicio y las propiedades de estos materiales, convirtiéndose en propiedades de interés.

El diseñar con materiales termoplásticos requiere el entendimiento de los comportamientos viscoelásticos y viscoplásticos. La resistencia mecánica de estos materiales ha sido puesta en relación con las fuerzas actuantes en él, el esfuerzo, el tiempo de carga y la temperatura.

Las propiedades principales son resistencia a la tensión y el módulo elástico (porque éstos son usados en el código de diseño), los cuales están directamente relacionados proporcionalmente con la densidad y en menor magnitud, el peso molecular. Los valores que realmente gobiernan el tiempo en que trabajará eficientemente una tubería, son el esfuerzo de cedencia en compresión y el módulo elástico, esto debido a que el esfuerzo de compresión es el de mayor magnitud y el módulo elástico junto con el momento de inercia de la sección del tubo determinan la llamada rigidez del anillo.

Cualquier discusión acerca de la vida de servicio de una tubería enterrada, no puede ignorar la calidad de su instalación y la práctica en ello. Todas las estructuras enterradas, independientemente del material, son estructuras del suelo y la tubería, es decir, interactúan entre sí para soportar las cargas requeridas.

Una mala instalación, provocará una mala interacción del sistema suelo - estructura. La AASHTO provee de una guía de instalación conservativa en la sección 30 de "AASHTO Standar Specifications for Highway Bridges", Requerimiento similares de instalación se encuentran también en la norma ASTM D 2321, "Standar Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pipe for Sewers and other Gravity . Flow Applications". Una apropiada instalación contribuye grandemente al buen funcionamiento del sistema por un largo tiempo.

Las actuales especificaciones ASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) incluyen también a la tubería corrugada de polietileno, en las Especificaciones Estándar para la Tubería Corrugada de Polietileno de entre 300 a 1200 mm de diámetro, con la siguiente asignación AASHTO: M 294.02 y la AASHTO LRFD Bridge Desing Specifications, Sección 12 – Estructuras Enterradas y túneles lineales.

La AASHTO M 294 establece que la tubería sea manufacturada con los materiales (resinas) que están definidos el párrafo siguiente:

“Las tuberías extruidas y accesorios moldeados por soplado deben de estar hechos con Polietileno virgen de conformidad con los requerimientos de la celda clase 335400C definida y descrita en la norma ASTM D 3350, excepto el contenido de negro de humo no debe exceder del 5% y la densidad no debe ser menor de 0.945 g/cm³ ni mayor de 0.955 g/cm³. Las resinas que tengan una clasificación más alta de celda en una o más propiedades, con excepción de la densidad, son aceptables para proveer al producto de los requerimientos conocidos.

Para el crecimiento de la resistencia a la ruptura lenta, la aceptación de las resinas deberá ser determinada utilizando un punto donde se haga una muesca y someterla a una prueba de carga constante de tensión (SP-NCTL) de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 9.5. El promedio del tiempo de falla de cinco muestras debe exceder 24 horas y para cada muestra el tiempo de falla de la prueba no debe ser menor de 17 horas”. Desde esta descripción de la resina, la sección 12 de la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications coloca las propiedades del material en la siguiente tabla:

Tipo de tubería	Clase Mínima de celda ASTM D 3350	Deformación a largo plazo permitido %	F _u inicial mínimo (MpA)	E min Inicial (MpA)	F _u mínimo para 50-años (MpA)	E min para 50-años (MpA)
Tubería de PE Corrugado-AASHTO M 294	335400C	5	20.7	758	6.21	152

Estos valores representan los mínimos para la celda de clasificación ASTM D 3350 y no representa lo que la industria esté utilizando realmente. Éstos representan valores iniciales de las propiedades de los materiales basados en un régimen de carga específico y puede ser o no representativos de las condiciones de cargas actuales. El valor inicial del módulo de flexión esta basado en pruebas realizadas de acuerdo con la ASTM D 790, Método 1, Procedimiento B, cargando un espécimen de 50 mm, 3.2 mm de espesor y 12.7 mm de ancho a una velocidad de 12.7 mm/min con un valor promedio del módulo secante calculado al 2 % del esfuerzo en las fibras exteriores. El esfuerzo de cedencia inicial en tensión es determinado de acuerdo a la ASTM D 638 utilizando una muestra o espécimen “dogbone”, de 1.9 mm de espesor cargado en un ritmo de 50 mm/min. Los valores del esfuerzo de cedencia en tensión y el módulo elástico para un tiempo de 50 años fueron seleccionados con base en resinas utilizadas en la década de los ochentas con algunos factores de seguridad adicionales, y no aplican a resinas actualmente requeridas y empleadas por la industria. El uso de un valor a 50 años, es una determinación arbitraria de

la industria que elabora tuberías para transportar gas a presión, donde los resultados de la prueba HDB realizada para 10,000 horas (1.14 años) fueron proyectados a 50 años, con un factor de seguridad. Si 10,000 horas son proyectadas hacia 2 órdenes de magnitud a 1,000,000 de horas, eso podría equivaler a 114 años.

Las resinas actualmente utilizadas por la industria de las tuberías de polietileno corrugado exceden el mínimo de la densidad a 0.948 g/cm^3 y tienen un índice de fusión menor de 0.4 g/10 minutos.

Estas resinas tienen un esfuerzo de cedencia inicial en tensión mínimo de 22.75 MPa (3,300 psi) y un módulo de flexión inicial de 900 MPa (130,500 psi), probado de acuerdo con las norma ASTM D 3350. Cuando la densidad aumenta, ambos valores se incrementan linealmente.

1.1- Principios mecánicos

Una vez habiendo presentado en forma general, una descripción de las normas AASHTO procederemos a abordar los aspectos más importantes que consideramos deben ser tomados en cuenta para evaluar la pertinencia de una norma. Dichos aspectos son esencialmente dos, las solicitaciones mecánicas y las solicitaciones químicas a las que estará sometida la tubería durante el servicio. En la presente sección se aborda la parte correspondiente a la parte mecánica del problema y mientras que en la sección 1.2 se describe con gran detalle las características del material del que se fabrican las tuberías en cuestión.

En primer lugar consideramos que, el establecimiento de las normas que aseguren el buen funcionamiento de las tuberías de drenaje debe tomar en cuenta de manera muy especial el desempeño estructural de las mismas, por lo que deben ser revisadas con detalle las condiciones mecánicas reales a las que estarán sujetas durante el servicio. Es importante mencionar que desde el punto de vista mecánico existen dos formas de clasificar a los tubos: una que se basa en el material del cual están fabricados y la otra que se refiere al tipo de cargas a las que estará sujeto durante el servicio.

De acuerdo al material del que se fabrican los tubos existen dos tipos de tubos: los flexibles y los rígidos. Los flexibles son aquellos que son fabricados de materiales termoplásticos y que tiene la característica de que permiten ser deformados considerablemente de manera elástica.

Por otro lado, la segunda forma de clasificar a los tubos es de acuerdo al tipo de cargas y/o esfuerzos a los que estará sujeto durante el servicio. En base en lo anterior se puede hablar de tubos que trabajan por gravedad y aquellos sujetos a presión interna

Si el tubo no estará sujeto a presión interna constantemente durante el servicio entonces hablaremos de tubos que trabajan por gravedad, como es el caso de drenajes sanitario y/o pluvial, las cargas a las que estará sujeto el tubo serán aquellas proveniente del suelo que lo confina así como a las cargas provenientes de vehículos que transitan sobre la superficie libre. A continuación se presenta una breve descripción del contexto teórico en el que se enmarca el estudio de un miembro estructural como lo es un tubo enterrado una cierta profundidad.

El llamado análisis estructural es parte de la mecánica de sólidos, que a su vez está comprendida en la mecánica de medios continuos, y tiene como objeto de estudio la determinación de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en un elemento mecánico sujeto a determinadas condiciones de carga y a restricciones de desplazamiento. Un elemento estructural es aquel que está sometido a una carga importante, y por lo tanto, es susceptible de sufrir fallas o bien deflexiones que pueden alterar la geometría de la estructura. Una falla puede ser considerada como la deformación irreversible que sufre el elemento en alguna región o bien la ruptura.

En forma general, resolver un problema de mecánica de sólidos, consiste en encontrar funciones matemáticas llamadas campos que determinen la magnitud de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos en función de la posición y que cumplan con las condiciones de frontera definidas por las restricciones de desplazamiento y/o las cargas externas aplicadas sobre el elemento mecánico. El problema se torna más complejo debido a que los campos de esfuerzos (S) y deformaciones (ϵ) son campos tensoriales simétricos mientras que el campo de desplazamientos (u) es vectorial. Adicionalmente, los campos de esfuerzos, deformaciones y desplazamientos deben cumplir con las leyes físicas implícitas en los fenómenos de la mecánica de medios continuos tales como el equilibrio de fuerzas y momentos, así como las relaciones constitutivas que definan de manera conveniente el comportamiento esfuerzo-deformación del material del cual fue fabricada la estructura. Cabe mencionar que en muchos casos el comportamiento esfuerzos-deformaciones puede ser considerado homogéneo, lineal e isótropo pero se debe tener la seguridad de que dichas condiciones se cumplen efectivamente en el problema que se estudia. En general la relación esfuerzo-deformación, que caracteriza mecánicamente a un material, es descrita por una función tensorial de la forma [Gurtin,1]:

$$S = S(\epsilon)$$

La cual si cumple con la definición matemática de linealidad puede ser escrita como [Gurtin,1]:

$$S(\epsilon) = \mu\epsilon + \lambda tr(\epsilon) \tag{1.1.1}$$

donde: μ, λ son llamados los coeficientes de Lamé, los cuales sí el material es no homogéneo dichos coeficientes dependerán de la posición.

Se dice que el comportamiento del material es no lineal cuando la función que define la relación esfuerzo-deformación no cumple con la definición matemática de linealidad. En casos es necesario aproximar dicha función con una serie de Taylor truncada en el tercero o cuarto término.

En el caso de los llamados termoplásticos, como el polietileno, el comportamiento esfuerzo-deformación es no lineal y viscoelástico. Como se describirá con más detalle posteriormente, la principal complejidad del comportamiento viscoelástico es que sus coeficientes elásticos van disminuyendo con el tiempo.

Existen diversos modelos que pueden ser empleados para aproximar el comportamiento viscoelástico de materiales como el polietileno entre ellos el más empleado es el modelo uniaxial de Maxwell [Dieter, Lubinier,2] el cual se puede escribir como:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{1}{G} \frac{d\tau}{dt} + \frac{\tau}{\eta}$$

$$\tau = \eta \frac{d\gamma}{dt} - \left(\frac{\eta}{G}\right) \frac{d\tau}{dt} = \eta\dot{\gamma} - \lambda_R \dot{\tau}$$
(1.1.2)

donde:

η es el coeficiente viscoso de corte

G es el modulo elástico de corte

$\lambda_R = \frac{\eta}{G}$ es el tiempo de relajación

de donde la deformación del material como función del tiempo es:

$$\gamma = \frac{\tau_0}{G} + \frac{\tau_0}{\eta} t$$
(1.1.2)(a)

Donde la aplicación de un esfuerzo de magnitud τ_0 genera una deformación inicial $\frac{\tau_0}{G}$ la cual crece linealmente en el tiempo con una pendiente $\frac{\tau_0}{\eta}$ mientras se mantenga el esfuerzo. Asimismo, el modelo de Maxwell establece que para una deformación constante se presentará una relajación del esfuerzo mediante que sigue la relación:

$$\tau = G\lambda_0 e^{-\frac{t}{\lambda_R}}$$
(1.1.2)(b)

donde λ_0 es la magnitud de la deformación constante.

Desde el punto de vista macroscópico, el comportamiento viscoelástico se manifiesta mediante dos efectos típicos los cuales se describen a continuación:

a) Si se le aplica un esfuerzo constante a una muestra del material, al transcurrir el tiempo se observa que la deformación inicialmente presentada por el material va incrementando progresivamente.

b) Si se somete una muestra del material a una deformación constante y se toma registro del esfuerzo se observa que esta disminuye con el tiempo.

Ambos comportamientos pueden ser apreciados en la Figura 1.1.1 correspondiente a una curva esfuerzo-deformación obtenida de una prueba en tensión a distintos tiempos.

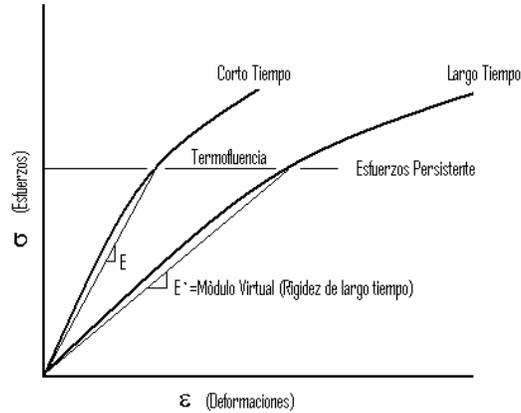


Figura 1.1.1. Curva esfuerzo deformación típica de un material viscoelástico.

La variación del comportamiento del material, en particular del módulo elástico y del esfuerzo de cedencia, debe ser caracterizada para cada material en particular. En la Figura 1.1.2 se muestra una gráfica en escala logarítmica donde se muestra la variación típica de la resistencia a la cedencia que presenta un material viscoelástico. Cabe mencionar que a pesar de que el comportamiento de los termoplásticos es no lineal y por lo tanto en estricto sentido sería incorrecto hablar de módulo elástico, es común considerar para muchos análisis la pendiente de una secante que corta la curva esfuerzo deformación al 2% de deformación.

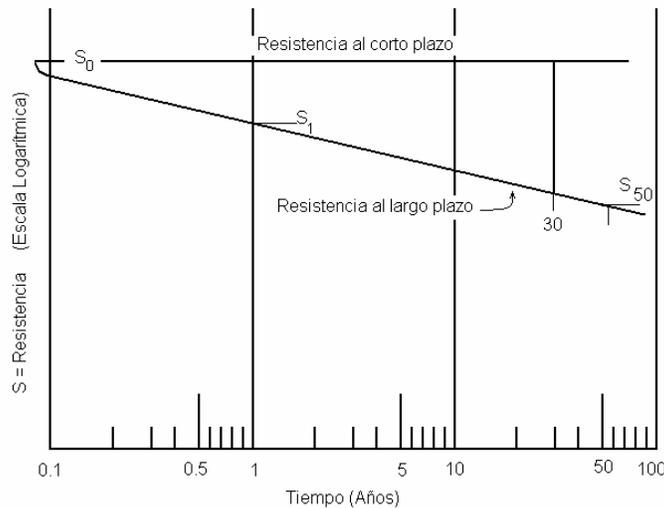


Figura Curva Log E-Log t típica de materiales viscoelásticos

En la sección 1.2 se presenta una descripción extensa de las características de un material viscoelástico como el PEAD, mientras tanto daremos una descripción general que resulta muy útil desde el punto de vista de la mecánica de materiales.

El comportamiento que presentan los materiales viscoelásticos se debe a que pueden ser considerados como fluidos hiperviscosos más que como un sólido en el sentido más general de la palabra. Un metal presenta estructura cristalina donde los átomos presentan un acomodo periódico bien definido mantenido por enlaces del tipo iónico-covalente. Por su parte en los termoplásticos los átomos se encuentran dispuestos en arreglos tipo cadenas de

distinta magnitud las cuales puede presentar cierta alineación o bien encontrarse entrelazadas entre sí. Cuando las cadenas se presentan alineadas se dice que el material es cristalino, mientras que si se encuentran entrelazadas se dice que es amorfo. Si el material es predominantemente amorfo, la aplicación de una carga constante permitirá que se presente un deslizamiento de las cadenas entrelazadas de tal manera que el material fluye lentamente. Asimismo, si se impone al material una deformación constante, al deslizarse las cadenas se presentará el efecto de relajación de esfuerzos.

Por otro lado, la solución de un problema de mecánica de sólidos consiste en realidad en encontrar la solución del modelo matemático que se obtiene al aplicar las leyes físicas tanto de equilibrio como las que caracterizan la respuesta del material. Dicho modelo consiste en un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales con condiciones de frontera para el cual sólo algunos cuantos casos, puede ser resuelto de manera analítica. El modelo matemático mencionado puede ser escrito como:

$$\begin{aligned} \text{Div}(S) &= 0 \\ S &= S(\varepsilon) \\ \varepsilon &= \frac{1}{2}(\nabla u + \nabla u^T) \end{aligned} \tag{1.1.3}$$

donde:

S y ε son los campos tensoriales de esfuerzos y deformaciones respectivamente y u es el campo vectorial de desplazamientos. Las condiciones de frontera pueden ser de desplazamiento, de esfuerzos o mixtas.

La complejidad matemática que envuelve la solución de un problema de mecánica de sólidos ha originado la necesidad de encontrar soluciones aproximadas que si bien no proporcionan la solución completa del problema, brinden información valiosa como por ejemplo los valores máximos de esfuerzos deformaciones y desplazamientos. La llamada mecánica de materiales, es un área de la mecánica de sólidos que se encarga de obtener este tipo de soluciones y es aplicada hoy en día ampliamente para el diseño de miembros estructurales [Ugural, Singer,3].

Asimismo, existen métodos numéricos que permiten obtener la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en un número finito de puntos. Este tipo de soluciones brindan información muy importante y puede decirse que hoy en día representa una de las herramientas más poderosas para la resolución de problemas en diversas áreas de la mecánica de medios continuos. Es importante mencionar que a pesar de las bondades que brindan los métodos numéricos, existen muchas fuentes de error durante la construcción de los modelos numéricos además de que los programas comerciales que permiten aplicar dicha técnica son considerablemente costosos.

Otra rama importante de la mecánica de sólidos es el llamada análisis experimental de esfuerzos, la cual consiste en obtener información sobre la solución del problema en la frontera del elemento a través de instrumentos de medición [Daily,4]. Típicamente, la información que puede ser obtenida mediante dichas técnicas corresponde con deformaciones y desplazamientos. Entre las técnicas de análisis experimental de esfuerzos más comúnmente usadas se encuentran la llamada extensometría eléctrica, la fotoelasticidad reflectiva y de transmisión, las lacas frágiles, las mallas de Moire, etc., y

recientemente están siendo desarrolladas técnicas ópticas como el de análisis de imágenes por computadora.

En la práctica es común combinar las diferentes técnicas de solución de descritas anteriormente dependiendo las características particulares del problema que se desee resolver y de la información que se quiera obtener. A continuación se presenta una breve descripción de la forma que ha sido planteado el problema de los tubos confinados.

Para analizar tubos de drenaje, la literatura [Moser,5] muestra claramente que se ha recurrido a soluciones aproximadas de mecánica de materiales. Los análisis presentados en la mayoría de los casos son uniaxiales ya que toman un anillo del tubo considerándolo como un aro más que como un cuerpo plano. La razón por la cual se ha optado por dicho procedimiento es que la solución analítica del problema es considerablemente compleja. La complejidad de la solución se deriva principalmente de las condiciones de frontera a las que estará sujeto el tubo al ser confinado por la tierra.

Lo anterior queda perfectamente aclarado, considerando que el emplear la teoría de elasticidad ha sido resuelto de manera analítica [Daily, Singer,4], empleando función de Airy, el problema de un anillo circular sujetos a presión constante tanto interna como externa. El problema, escrito en coordenadas polares puede ser escrito de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}) + F_r &= 0 \\ \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} + F_\theta &= 0 \\ \sigma_{rr} = -p_i \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{en } r = a \\ \sigma_{rr} = -p_o \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{en } r = b \end{aligned} \tag{1.1.4}$$

Como se mencionó anteriormente, la solución analítica del problema fue obtenida empleando una función de Airy como se muestra:

$$\begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{b_o}{r^2} + 2c_o + d_o(1 + 2 \ln r) \\ \sigma_{\theta\theta} &= -\frac{b_o}{r^2} + 2c_o + d_o(3 + 2 \ln r) \\ \tau_{r\theta} &= 0 \end{aligned} \tag{1.1.5}$$

De la solución general del problema, es decir para el caso de presión interna y externa constantes, se han obtenido dos soluciones para casos particulares una de ellas correspondiente al caso en que la presión interna es cero, es decir que se considera que el tubo se encuentra sujeto solamente a una presión externa:

$$\begin{aligned}
\sigma_{rr} &= \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} \\
\sigma_{\theta\theta} &= -\frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{(b^2 - a^2) r^2} + \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} \\
\tau_{r\theta} &= 0 \\
u_r &= \frac{1}{E} \left[-(1 + \nu) \frac{a^2 b^2 (p_o - p_i)}{(b^2 - a^2) r} + (1 - \nu) \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} r \right] \\
u_\theta &= 0
\end{aligned}
\tag{1.1.6}$$

donde: E es el módulo elástico del material del que está hecho el tubo, ν es el módulo de Poisson también del material. a, b, r son las dimensiones que se muestran en la Figura 1.1.3.

En las condiciones de frontera, que se muestran en la Figura 1.1.3, se ve claramente que la presión aplicada sobre el anillo es considerada constante. Bajo estas condiciones de frontera, es claro que a través del espesor de la pared la solución nos indica que sólo dos elementos del campo tensorial de esfuerzos son diferentes de cero; se trata de los esfuerzos normales: circunferencial $\sigma_{\theta\theta}$ y radial σ_{rr} . Así mismo, la solución de dicho problema nos indica que el campo vectorial de desplazamientos diferente es cero solamente el término radial u_r . Es claro también que tanto los esfuerzos radiales como circunferenciales depende r pero son de compresión. Es claro también que para una intensidad de presión externa cualquiera, el círculo interior o exterior del aro tomarán la forma de círculos con radio menor.

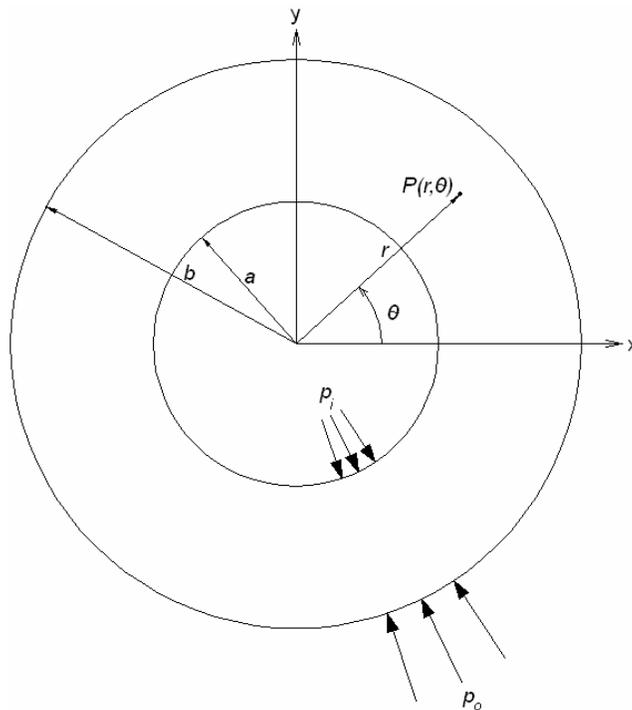


Figura 1.1.3. Condiciones de frontera para un aro sujeto a presión interna y externa constantes.

Como se puede ver, el problema mecánico del aro sometido a una presión externa constante ya ha sido resuelto, sin embargo si la presión externa aplicada depende de θ , como se muestra en la Figura 1.1.4, entonces las condiciones de frontera cambian y ahora deben ser escritas como:

$$\sigma_{rr} = -p(\theta)_i \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{en } r = a \quad (1.1.7)$$

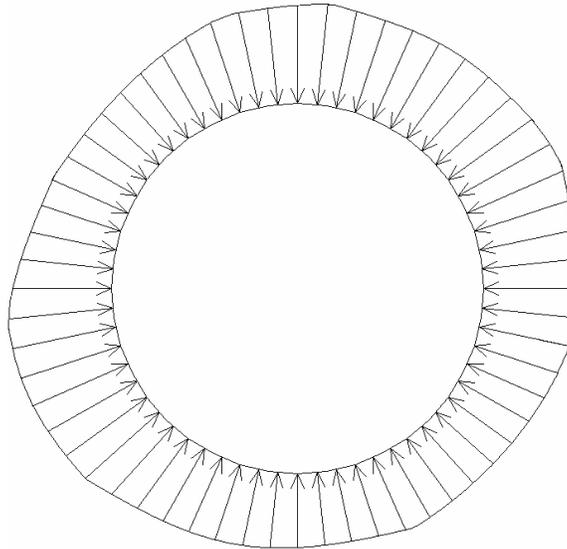


Figura 1.1.4. Aro circular sujeto a una presión externa que depende de θ .

Encontrar la solución del problema con dichas condiciones de frontera se vuelve extremadamente complicado ya que no es posible emplear las funciones de esfuerzo que se emplearon para encontrar la solución cuando la presión era constante puesto que sólo depende de r . Adicionalmente, si la geometría de la sección transversal anillo no es constante el problema se torna más complejo. De hecho, no existe una solución analítica reportada en la literatura para el problema con condiciones de frontera como las que se mencionaron por lo que dicho problema tiene que ser resuelto por algún método numérico como por ejemplo elemento finito. Es importante tomar en cuenta que aplicar el método del elemento finito para resolver un problema como el que se ha descrito requiere definir de manera conveniente las condiciones de frontera lo cual puede representar un gran problema sobre todo si no es posible medir la presión externa.

El problema del tubo confinado por tierra presenta precisamente este tipo de complicaciones debido a que la carga que transmite la tierra sobre el tubo es una presión externa no uniforme que al ser transmitida por un medio elástico, como es la tierra, depende de la componente de desplazamiento en la dirección radial. Es decir las condiciones de frontera para en el tubo confinado serían:

$$\sigma_{rr} = -p(\theta, u_r)_i \quad \tau_{r\theta} = 0 \quad \text{en } r = a \quad (1.1.8)$$

La carga transmitida por la tierra al tubo depende fuertemente del porcentaje de compactación de la tierra, del tamaño del grano, de la humedad, etc. La determinación de la carga transmitida por la tierra al tubo entra en otra rama de la mecánica de sólidos que es la llamada mecánica de suelos que tiene como principal complicación que el conglomerado de tierra no puede ser considerado como un continuo. No obstante, existen modelos reportados

en la literatura que permiten estimar las cargas generadas por columnas de tierra así como aquellas transmitidas a través de ella. En la Figura 1.1.5 se muestra una gráfica que representa uno de los modelos más aceptado sobre la transmisión de carga a través de la tierra [CCPA, Moser,5]. En la Figura 1.1.5 se aprecia claramente que la carga transmitida está formada por 2 componentes: una “muerta” debida a la columna de tierra sobre el tubo sepultado y la otra “viva” debida al paso de vehículos u otro tipo de cuerpos sobre el suelo. Asimismo, en la Figura 1.1.5 se puede ver que al incrementar la profundidad a la que está sepultado el tubo la carga viva transmitida al tubo disminuye. Cabe mencionar que dicho análisis no considera el confinamiento el confinamiento de la tierra en la región más próxima al tubo.

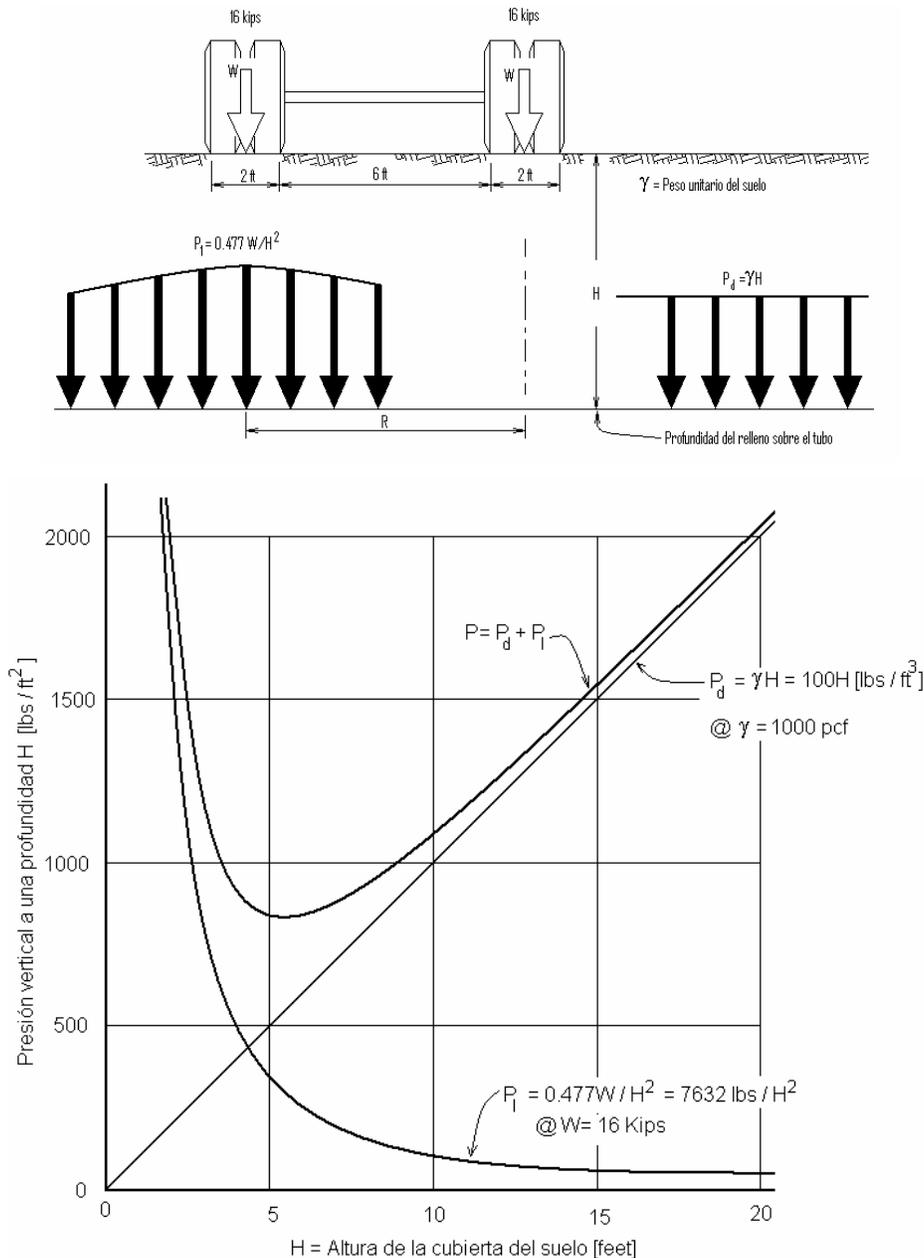


Figura 1.15. Diagrama de presión transmitida a un tubo confinado. La carga total esta compuesta por dos términos, carga viva (P1) más carga muerta (P2)

En realidad, se han reportado en la literatura [Moser,5] diversos trabajos orientados a determinar dicha relación. No obstante, lo que ha sido poco estudiado es la carga a la cual se somete el tubo durante la instalación del confinamiento en la carga transmitida al tubo. Entre dichos trabajos se encuentra el de Moser, cuyo trabajo consistió en medir la deflexión vertical, y en algunos casos también horizontal, que sufre un tubo confinado a distintas profundidades con diferentes grados de compactación de la tierra de confinamiento. El resultado principal es que cuando la compactación es de 96.5 % en escala próctor, el tubo presenta deflexiones verticales muy pequeñas a grandes profundidades. Dicho resultado revela que la presión que ejerce la tierra sobre el tubo varía considerablemente ya que el patrón de desplazamiento que sufre el diámetro interior del tubo, por tanto también el estado de esfuerzos, cambia notablemente al variar el grado de compactación de la tierra de confinamiento. De hecho es aceptado en la literatura que un adecuado confinamiento es aquel que mejor aproxima la formación de un arco de carga alrededor del tubo, condición que es deseada para un tubo fabricado con un material que presenta comportamiento viscoelástico. No obstante, se puede decir que no son muy abundantes los trabajos que han sido realizados sobre la variación de la presión externa aplicada sobre el tubo al variar el grado de compactación.

Como se mencionó anteriormente, la complejidad que implica la determinación de los campos de esfuerzos en un tubo confinado justifica plenamente el empleo de técnicas aproximadas como las de la resistencia de materiales. De hecho, en la literatura especializada en drenajes existen una serie de modelos aproximados que han sido empleados durante muchos años por diseñadores de tuberías en todo el mundo.

Existe una buena cantidad de estudios que muestran claramente que la determinación de la presión externa actuando sobre los tubos confinados por la tierra es el primer aspecto que debe ser tratado en el diseño de un tubo para drenaje [Moser, CCPA,5]. Los modelos propuestos consideran distribuciones de presiones diversas como las que se muestran en la Figura 1.1.6. Por otro lado, se asocia a la determinación de la presión externa aplicada sobre el tubo, el cambio geométrico que presentará un tubo debido a dicha presión. Varios ejemplos de dicha relación se muestran en la Figura 1.1.7.

En general, los modelos propuestos para explicar el efecto del confinamiento sobre el tubo se basan en la hipótesis del que el cambio geométrico que experimenta el tubo al estar confinado es el de pasar de una forma circunferencial a una elíptica. Un ejemplo de modelos de este tipo es la fórmula de Iowa.

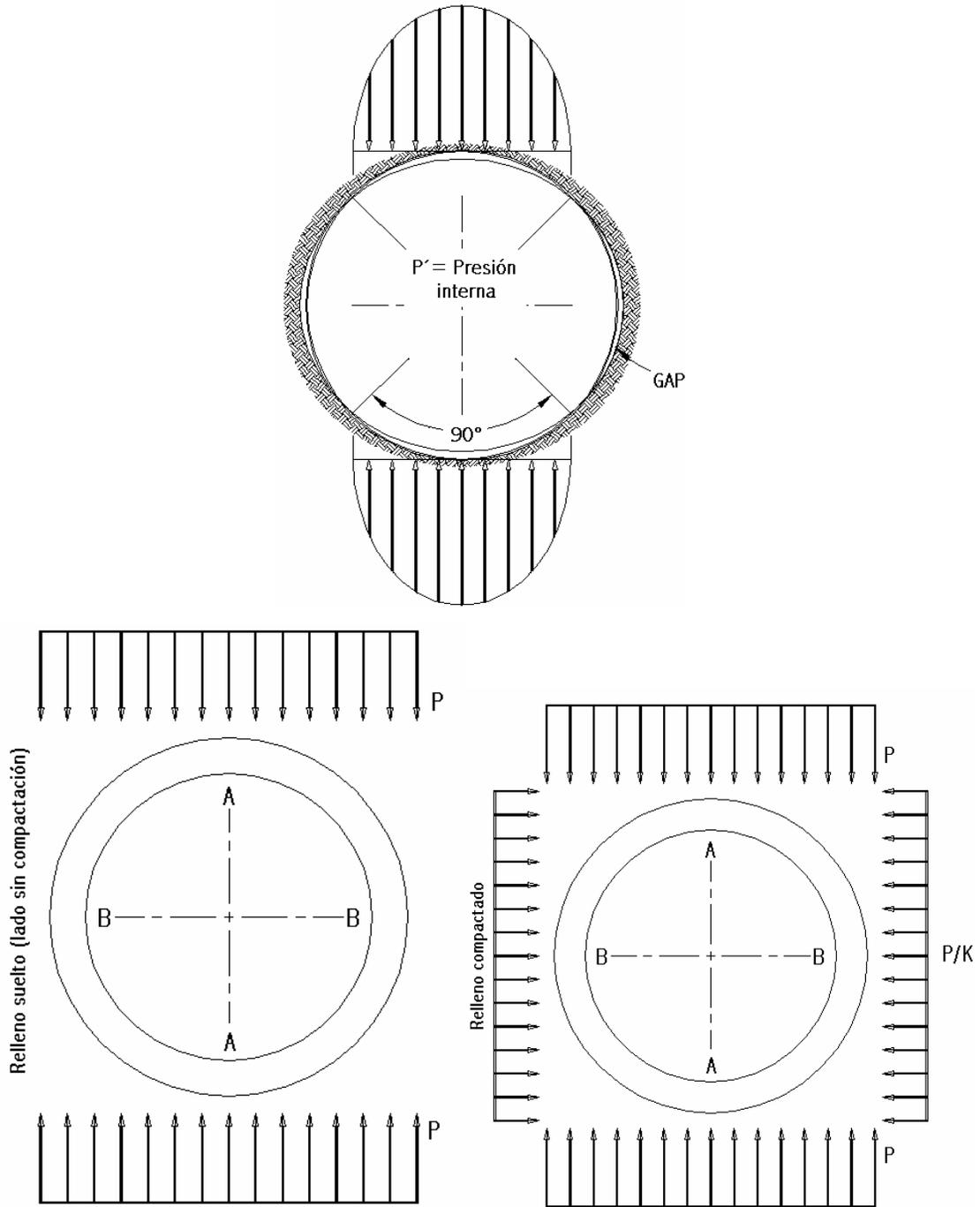


Figura 1.1.6. Distintas distribuciones de presiones actuando sobre un tubo enterrado.

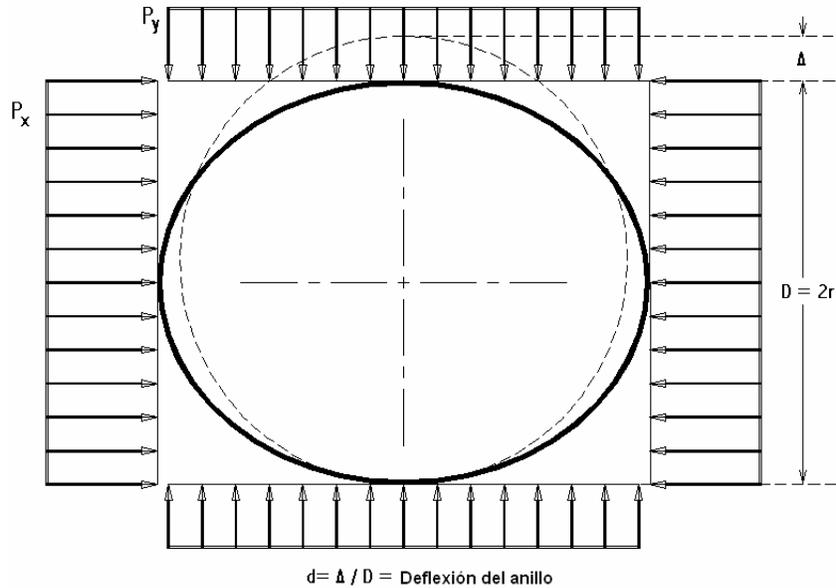


Figura 1.1.7. Cambio geométrico del tubo asociado a la presión externa aplicada.

Considerando dicha hipótesis, muchos manuales toman como parámetro importante para el diseño de una tubería, por rigidez, el arreglo de carga de compresión diametral libre el cual permite determinar la rigidez estructural del tubo. Dicho arreglo de carga es empleado para definir un parámetro muy importante llamado rigidez del aro o anillo. Como se muestra en la Figura 1.1.8, la rigidez del aro depende de la geometría de la sección y del módulo elástico del material del cual está fabricado. Aunque han sido propuestas algunas variantes de la ecuación de la rigidez del aro, la forma general de la ecuación que permite calcularlo es [Moser,5]:

$$\frac{F}{\Delta} = 53.77 \frac{EI}{D^3} \quad (1.1.9)$$

Cabe mencionar que el comportamiento que presenta el tubo en una prueba de compresión diametral no es equivalente al que presenta al estar confinado. En la sección denominada resultados, correspondiente al presente trabajo, se realiza un análisis de la deformación basado en el cambio geométrico del diámetro interior del tubo donde se aprecia claramente que se presentan severas variaciones en la distribución de deformaciones tangenciales al variar ligeramente el cambio geométrico que experimenta el diámetro interior del tubo.

En realidad la prueba de compresión diametral brinda información sobre la capacidad del tubo a ser deformado al recibir carga lo cual debe ser tomado en cuenta para su instalación y manejo pero no como un criterio de resistencia. Es claro que un tubo muy poco rígido sufrirá deflexiones severas con cargas de magnitud moderada sin embargo dichas deflexiones no necesariamente son suficientes para que el tubo falle. Asimismo, es aceptado en la literatura que la curva deflexión-carga que se obtiene en una prueba de compresión diametral representa una forma indirecta de conocer el comportamiento esfuerzo-deformación del material. En el presente trabajo, sección de resultados, se presenta un análisis basado en el cambio geométrico del aro interior en el cual se muestra

que la deflexión diametral del tubo es directamente proporcional a la deformación tangencial en un cierto intervalo.

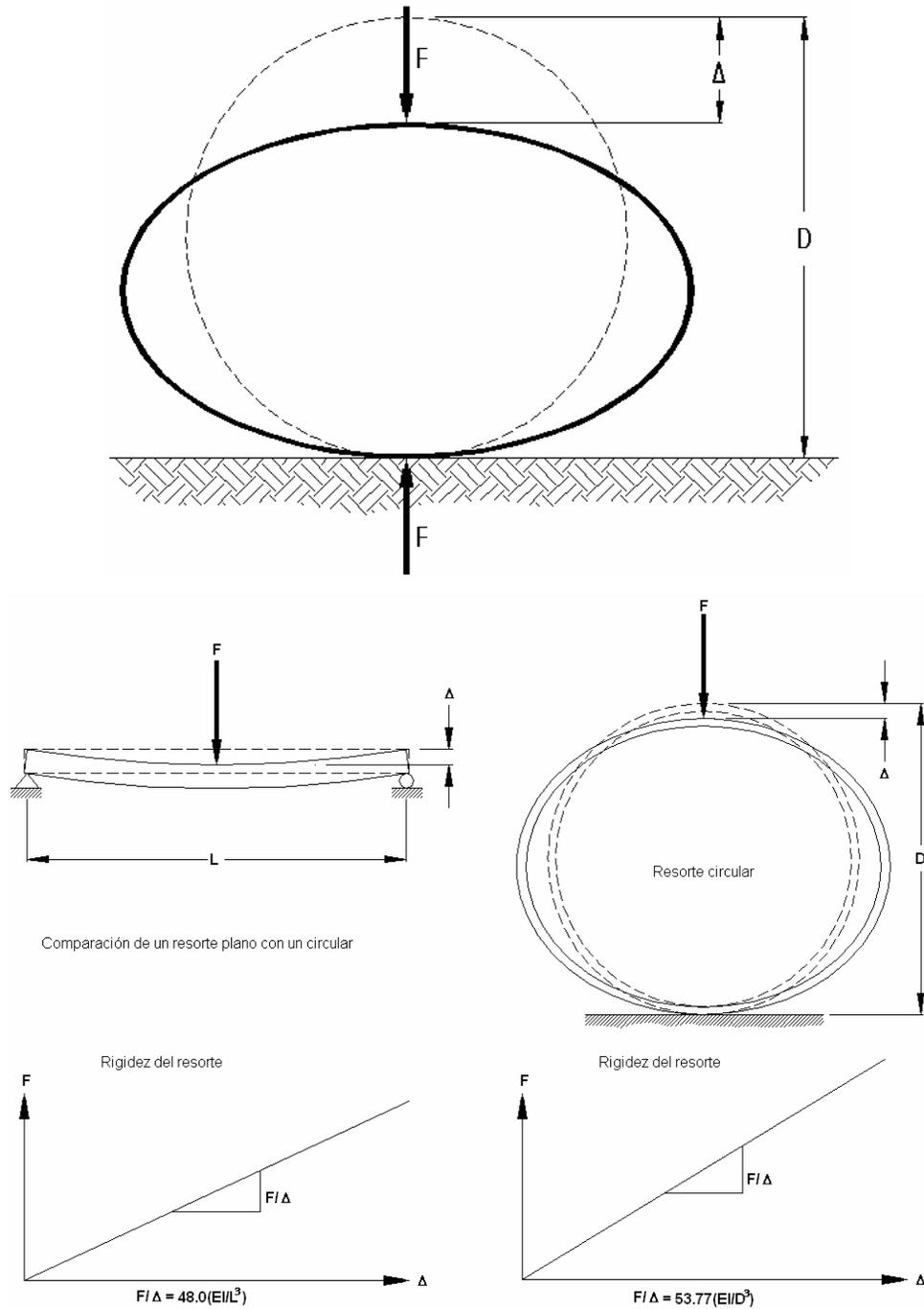


Figura 1.1.8. Cambio geométrico asociado a una carga de compresión diametral donde se define la rigidez del aro.

En general todos los análisis realizados sobre la determinación de estado de esfuerzos en un tubo confinado coinciden en que el estado de esfuerzos es el que se muestra en la Figura 1.1.9.

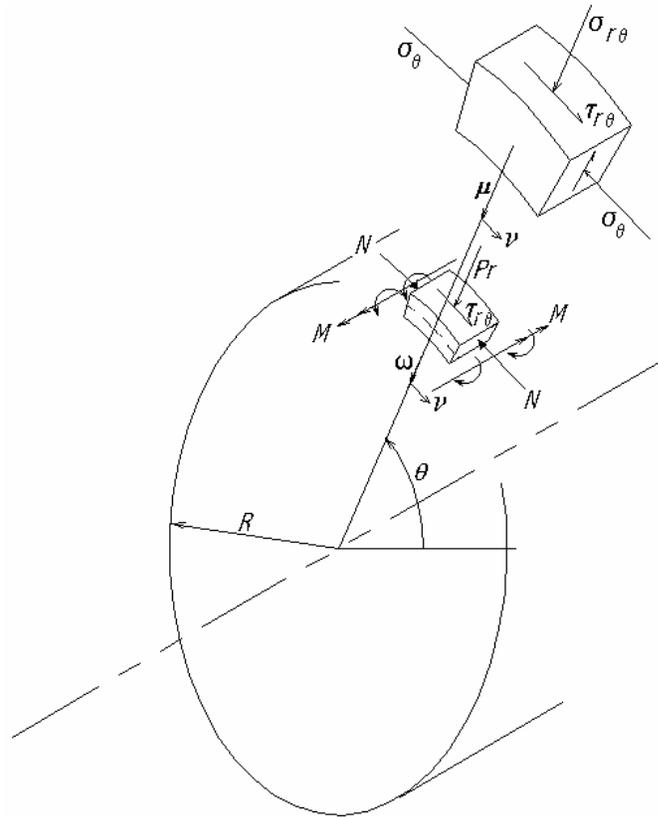


Figura 1.1.9. Estado de esfuerzos presente en un elemento diferencial de área localizado en un tubo confinado.

En la Figura 1.1.9 se aprecia claramente la presencia de esfuerzos de corte los cuales aparecen debido precisamente a que la presión externa aplicada al tubo no es constante.

Del estado de esfuerzo que muestra el diagrama mostrado en la Figura 1.1.9, se presta una atención especial a los esfuerzos tangenciales debido a que éstos son los más grandes. El diagrama de cuerpo libre de la Figura 1.1.7 muestra una analogía entre las fuerzas en una columna sujeta a una carga de compresión y un momento flector y un corte radial del aro en el que se encuentran presentes tanto fuerzas tangenciales como un momento flexionante por lo que los esfuerzos circunferenciales son divididos en dos componentes; una de compresión constante asociada a la tangencial y otro que varía a lo largo de r debido al momento flexionante. Asimismo, en la Figura 1.1.10 se puede apreciar que la resultante de ambos es una distribución radial que muestra que en la pared interior los esfuerzos circunferenciales son de compresión mientras que en la pared exterior pueden ser de tensión solo cuando la magnitud del momento flector es significativa. Cuando la presión externa tiende a la uniformidad el momento flector tiende a cero y el tubo permanecerá sensiblemente circular y sin tensiones; cuando la presión externa es no uniforme, el tubo podrá ovalarse y con ello generar un momento flector hasta valores significativos. La uniformidad de la presión externa del tubo es un factor inherente a la instalación.

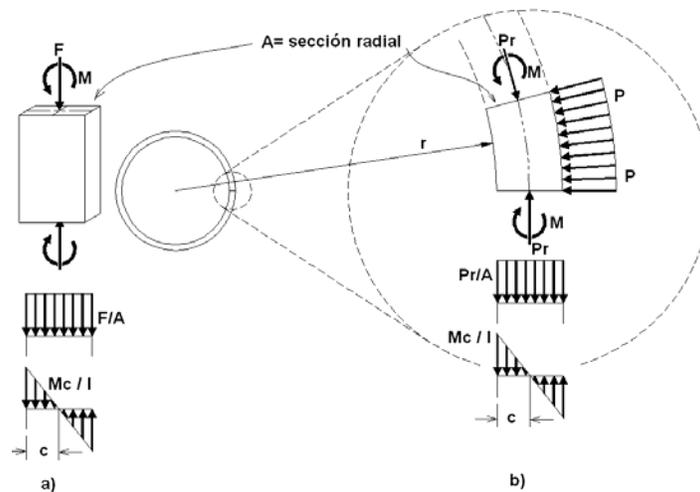


Figura 1.1.10. Diagrama que muestra una analogía entre las fuerzas presentes en un aro sujeto a una carga externa y una columna sujeta a carga de tensión y un momento flector.

Un parámetro importante para el diseño de tuberías de drenaje es el pandeo, el cual se asocia a la aparición de una inestabilidad en una región localizada. En los análisis realizados sobre modelos de aros se ha reportado que dicha inestabilidad aparece cuando en alguna región de la pared se generan momentos flexionantes de gran magnitud [Moser,5]. Dicha condición se presenta generalmente, cuando se presenta una disminución de la presión externa en la cercanía de dicha región. Cabe mencionar que también puede presentarse el pandeo de la pared del tubo cuando, debido a una carga excesiva sobre el mismo, se sobrepasa el valor crítico de pandeo de la sección, por lo que debe tomarse en cuenta un valor crítico de presión que puede ser aplicado al tubo. Para calcular la llamada presión crítica de pandeo existen ecuaciones como la de Moser la cual considera que la presión externa, debida al confinamiento del tubo, es constante.

Es importante destacar que además del análisis de la distribución de presión externa actuando sobre un aro, es preciso considerar que la tubería tiene una longitud a lo largo de la cual puede presentarse el caso de que la presión no es constante debido también a un confinamiento inadecuado. En la Figura 1.1.11 se muestra un diagrama en el que muestra el efecto de flexión en el tubo que puede presentarse debido a una variación de la presión a lo largo del eje del tubo. Si se presenta flexión axial en el tubo es claro que se presentarán esfuerzos normales axiales, lo cual hace que el problema mecánico se complique aún más, ya que se convierte en un problema tridimensional. Debe destacarse que este fenómeno produce esfuerzos de orden de magnitud muy inferior a los producidos por la presión externa de tierras.

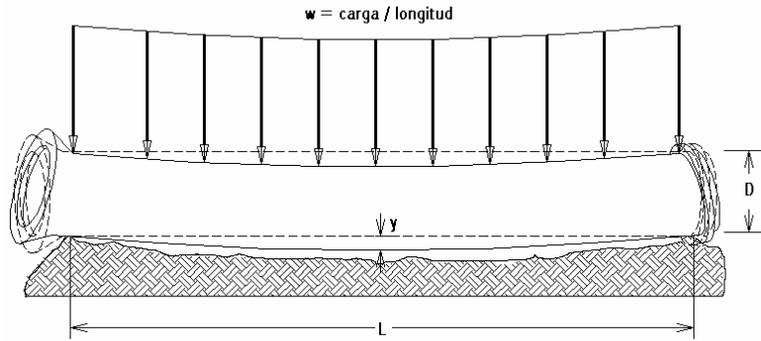
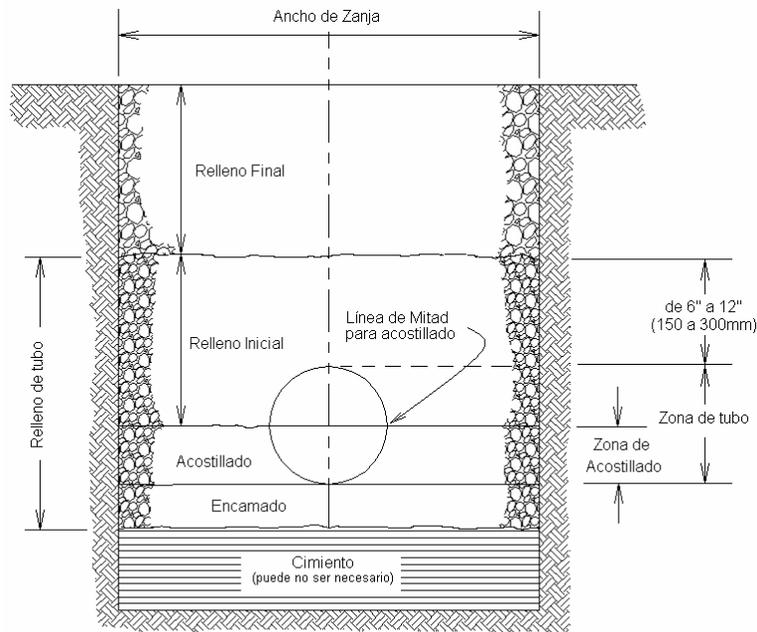


Figura 1.1.11. Diagrama que muestra la forma en que un confinamiento inadecuado puede generar flexión en un tubo.

De la discusión anterior, es claro que la determinación del procedimiento de confinamiento de un tubo es fundamental para asegurar que el tubo funcione eficientemente desde el punto de vista mecánico. A ese respecto han sido desarrollados modelos que sugieren determinados procedimientos para el confinado del tubo. En la Figura 1.1.12 se muestra un diagrama en el que se muestra de manera muy general la forma en la que debe ser realizado el confinamiento de un tubo.



Sección de Zanja

Figura 1.1.12. Diagrama que muestra de manera general la forma en que se recomienda que se realice el confinamiento de un tubo.

Existen procedimientos particulares que han sido desarrollados por empresas dedicadas a la fabricación de tubos los cuales deben considerar aspectos propios de su tubería.

Es claro que un tubo que trabaja bajo presión interna estará sometido a un esfuerzo constante mientras que un tubo que trabaja por gravedad, si el confinamiento es adecuado, estará sujeto más bien a una deformación constante [Moser,5].

Es importante destacar que la rigidez del anillo es un parámetro que permite determinar la capacidad de resistir cargas del tubo ya sea durante, el manejo, la instalación o bien durante el servicio. En general un tubo cuya rigidez de anillo es baja puede trabajar convenientemente a grandes profundidades pero durante su instalación debe lograrse un confinamiento tal que durante el servicio la transmisión de carga sea muy pequeña o prácticamente nula.

Otro aspecto importante que debe ser tomado en cuenta para el funcionamiento adecuado de la tubería es la posibilidad de aparición de fracturas y/o su crecimiento. Evidentemente, la aparición de una grieta requiere que los esfuerzos máximos alcancen el valor de esfuerzo último del material ya sea por una carga excesiva durante la instalación o el confinamiento o bien debido a la disminución de las propiedades del material en el tiempo inherente al comportamiento viscoelástico del material. Como se mencionó anteriormente, esta última condición es más favorecida cuando el tubo se encuentra sometido a esfuerzo constante como es el caso de tubos que soportan presión interna.

Por otro lado, la falla de una estructura más frecuente es debida a la preexistencia de grietas en el material originadas por defectos durante el proceso de fabricación, erosión excesiva durante el servicio o bien raspaduras durante el manejo. Bajo dichas condiciones, el crecimiento de una grieta puede darse a un nivel de esfuerzos considerablemente menor debido a que en una grieta preexistente se presenta una concentración de esfuerzos. En este caso el parámetro más importante es la rapidez con la que crecerá la grieta para lo cual es necesario realizar un estudio sobre el material específico. Debe quedar claro que para un esfuerzo aplicado cualquier grieta preexistente crecerá, sin embargo la rapidez de propagación puede ser tan lenta que nunca sea apreciable a la vista. En general el crecimiento de la grieta en un material termoplástico se ve acelerado si existe un esfuerzo de tensión constante, sin embargo otros factores como la presencia de ciclos de desplazamiento pueden influir considerablemente []. En todo caso, la prevención adecuada del crecimiento de una grieta debe considerar el estado de esfuerzos a los que estará sometido un tubo durante el servicio.

En estudios realizados sobre materiales termoplásticos como el acrílico, sometidos a ciclos de desplazamientos sobre una grieta preexistente se ha observado que para determinados niveles de esfuerzo un pequeño incremento del mismo puede generar un crecimiento considerable en la rapidez de propagación de la grieta mientras que para otros valores de esfuerzo, grandes variaciones del mismo generan incrementos en la velocidad de propagación de la grieta muy bajos.

Es claro que un tubo que trabaja a esfuerzo constante, como el caso de un tubo con presión interna, el crecimiento de una grieta puede ser estimado empleando una prueba en la que el esfuerzo se mantiene constante mientras que para un tubo que trabaja, o tiende, a deformación constante, como es caso de un tubo por gravedad, dicha prueba resulta excesiva. En realidad para un tubo que se espera que trabaje a deformación constante el esfuerzo tiende a relajarse y por tanto la velocidad de propagación de la grieta será considerablemente menor.

Por otro lado, es importante mencionar que una prueba de propagación lenta de grieta debe ser aplicada a un producto terminado más que a la materia prima. El proceso de fabricación, en especial el calentamiento, puede alterar considerablemente las propiedades del material.

Asimismo, la aplicación de pruebas rápidas son siempre recomendadas para procesos industriales a menos que las condiciones de operación justifiquen plenamente la aplicación de una prueba larga. Una prueba corta puede brindar información suficiente para evaluar la resistencia del material a la propagación de grietas y predecir el tiempo que tomará a la grieta alcanzar un tamaño crítico si se acelera convenientemente el proceso. En materiales termoplásticos, una práctica común es realizar la prueba a una temperatura alta en presencia de un agente químico que acelere el proceso.

Esta breve presentación del contexto teórico en el que se encuentra comprendido el desempeño mecánico del tubo confinado será referido en el análisis de los resultados obtenidos en los siguientes estudios:

- Compresión diametral libre.
- Compresión transmitida a tubos confinados.
- Deformación de la estructura de la pared de un tubo corrugado.
- Análisis numérico, por elemento finito, de un aro de tubo corrugado sujeto a diferentes condiciones de frontera.
- Análisis fenomenológico de la deformación del diámetro interior de un tubo.

En la sección 2 del presente trabajo se da una descripción detallada de las pruebas realizadas en cada caso mientras que en la sección 3 se presentan los resultados obtenidos.

1.2. Características del polietileno.

Los polímeros son moléculas largas formadas por la polimerización (enlaces químicos) es decir, la repetición de unidades moleculares pequeñas [Rubin,6]. Para producir polietileno, la unidad inicial es el etileno, un gas incoloro compuesto de dos átomos de carbono con doble enlace y cuatro átomos de hidrógeno (Ver Fig. 1.2.1.).

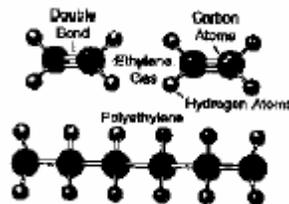


Fig. 1.2.1. Manufactura del Polietileno.

Actualmente, son tres los métodos más importantes para producir polietileno: en fase de gas, en solución, en lechada (fase líquida). La polimerización del etileno se puede dar con varios tipos de catálisis, bajo varias condiciones de presión y de temperatura y en reactores diseñados radicalmente diferentes. El etileno puede ser también copolimerizado con

pequeñas cantidades de otros monómeros como el buteno, propileno, hexeno y octeno. Este tipo de copolimerización resulta en pequeñas modificaciones en la estructura química y que son reflejadas en algunas diferencias en sus propiedades, como la densidad, ductilidad, dureza, etc. Las resinas que son producidas sin comonómeros son llamadas homopolímeros.

Sin tomar en cuenta el tipo de proceso, el proceso químico es el mismo. Bajo condiciones de reacción, el doble enlace entre los átomos de carbono es roto, permitiendo una unión con otro átomo de carbón como se muestra en la Fig. 1.2.1. Así, una sola cadena de polietileno es formada. Este proceso es repetido hasta que la reacción es terminada y la longitud de la cadena es formada. El polietileno está hecho por la unión de miles de unidades de etileno monomérico.

Las resinas de polietileno pueden ser descritas por tres características básicas que influyen grandemente en el proceso y en las propiedades finales, densidad, peso molecular y distribución del peso molecular. Las propiedades físicas y las características del proceso de cualquier resina de polietileno requieren de la comprensión de los papeles que juegan estos tres grandes parámetros.

1.2.1. Densidad

La primera producción de polietileno fue hecha utilizando el proceso de alta presión que resultaba en un producto que contenía considerables ramificaciones. Las ramificaciones son uniones aleatorias de pequeñas cadenas de polímero a la cadena principal. Dado que las cadenas ramificadas son incapaces de permanecer muy juntas, da como resultado que el material tenga una densidad relativamente baja, por lo cual ha sido llamado polietileno de baja densidad (PEBD). Con el tiempo los polietilenos adquirieron diferentes grados de ramificación, por lo cual surgió la necesidad de un estándar industrial que clasifique a la resina de acuerdo con su densidad [PPI,7]. La American Society for Testing of Materials (ASTM) estableció el siguiente sistema de clasificación que todavía sigue en uso. Este es parte de la norma ASTM D1248, *Standard Specification for Polyethylene Plastics Molding and Extrusion Materials*.

Tipo	Densidad
I	0.910 – 0.925 (Baja)
II	0.926 – 0.940 (media)
III	0.941 – 0.959 (alta)
IV	0.960 y más (alto homopolímero)

El tipo I es una resina de baja densidad producida principalmente en procesos de alta presión. También dentro de este rango se encuentran los polietilenos lineales de baja densidad (PELBD) los cuales representan un reciente desarrollo en el área del polietileno utilizando procesos de presión baja.

El tipo II es una resina de densidad media producida, ya sea por procesos de baja o alta presión.

Tipo III y IV son polietilenos de alta densidad. Los materiales del tipo III son usualmente producidos por pequeñas cantidades de comonómeros (típicamente buteno o hexeno) que es utilizado para el control de las ramificaciones. El control de estas ramificaciones proporciona una mejora en el comportamiento de ciertas aplicaciones donde algunos tipos de esfuerzos están involucrados. La resina de tipo IV es referida a los homopolímeros donde únicamente el etileno es utilizado en la polimerización, de lo cual resulta, las menores ramificaciones y la densidad más alta posible del material. La Figura 1.2.2 describe varias estructuras moleculares asociadas a cada tipo de polietileno.

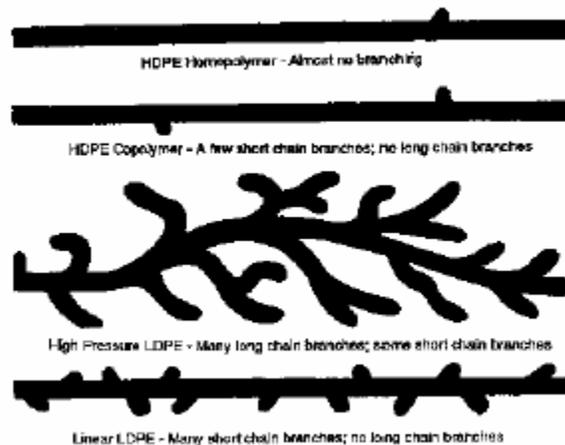


Figura. 1.2.2. Estructura de la cadena de polietileno.

1.2.2. Cristalinidad

La cantidad de ramificaciones determina la densidad de la molécula de polietileno. Entre más ramificaciones la densidad es más baja. El arreglo de las cadenas del polietileno puede ser explicado en términos de la cristalinidad contra la no cristalinidad o regiones amorfas ilustradas en la Figura 1.2.3. Cuando las moléculas se encuentran juntas y en una formación estrecha, el espacio intermolecular es reducido.

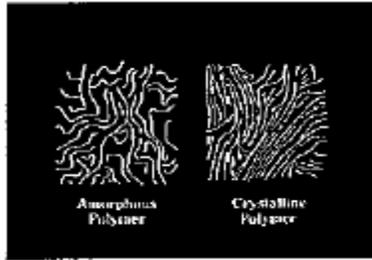
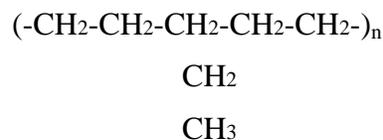


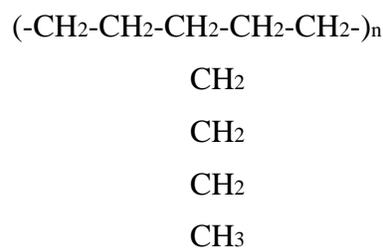
Fig. 1.2.3. Cristalinidad del polietileno

El polietileno es uno de los numerosos polímeros en el cual, las porciones de las cadenas del polímero en ciertas regiones la alineación de esas cadenas es muy cercana y ordenada tomando una forma de poliedro, los cristales microscópicos son llamados esferulitos. Otras porciones de la cadena están en regiones amorfas, sin tener un arreglo molecular definido. Debido a que el polietileno contiene ambas regiones, cristalina y amorfa, es llamado material semi cristalino. Ciertos grados de PEAD pueden contener más del 90% de regiones cristalinas, comparado con el 40% del PEBD. Debido a su arreglo cercano, las regiones cristalinas son más densas que las amorfas. La densidad del polímero entonces, refleja el grado de cristalizado.

Conforme las ramificaciones son adicionadas a la cadena principal del polietileno a través de la polimerización, el lugar y la frecuencia de esas ramificaciones afectan otros aspectos de las áreas cristalinas o amorfas. Esto incluye el lugar y la distribución de los esferulitos, así como también la naturaleza del área intermedia de las moléculas que están entre los esferulitos. Por ejemplo, utilizando buteno como comonomero resulta un etilo en la estructura:



Usando hexeno resulta un butilo en la cadena:



Si dos polímeros son producidos, uno utilizando etilo y en otro usando butilo, el polímero que contiene la ramificación de butilo tendrá la densidad más baja. Entre más larga sea la ramificación, se reduce la cristalinidad y por ello, es de baja densidad. Para el polietileno de alta densidad, el número de ramificaciones está en el orden de tres a cuatro cadenas por cada mil átomos de carbono. Esto únicamente toma una pequeña cantidad de ramificaciones que afectan la densidad.

La densidad de la resina tiene influencia en varias propiedades físicas. Características como la cedencia al esfuerzo por tensión y la rigidez (de flexión o de tensión) son reducidas cuando la densidad se incrementa.

1.2.3. Peso molecular

El tamaño de una molécula de polímero es representado por su peso molecular, el cual es el total de los pesos atómicos de todos los átomos que conforman la molécula. El peso molecular ejerce una gran influencia en el procesamiento y las características físicas y mecánicas del polímero. Los termoplásticos para sistemas de tuberías son de alto peso molecular ($> 100,000$) pero no tan alto como para obstaculizar la manufactura o las subsecuentes operaciones como la fusión por calor.

El peso molecular es controlado durante el proceso de manufactura. La variación de la longitud usualmente es determinada por catálisis, condiciones de polimerización y el tipo de proceso utilizado. Durante la producción de polietileno, no todas las moléculas crecen a la misma longitud. Ya que el polímero contiene moléculas de diferentes longitudes, el peso molecular usualmente es expresado como un valor promedio.

Hay varias formas para expresar el peso molecular promedio, pero la más común es el número promedio (M_n) y el peso promedio (M_w). Las definiciones de estos términos son las siguientes:

$M_n = \text{Peso total de todas las moléculas} \div \text{Número total de moléculas}$

$M_w = (\text{Peso total de cada tamaño}) (\text{respectivo peso}) \div \text{Peso total de todas las moléculas}$

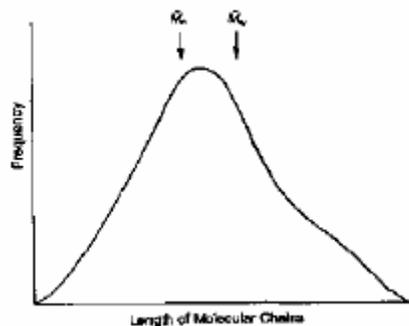


Fig. 1.2.4. Distribución típica del peso molecular

1.2.4. Efecto de la distribución del peso molecular en las propiedades

La distribución de moléculas de diferente tamaño en un polímero de polietileno sigue la curva distribución normal en forma de campana, descrita por la teoría de probabilidad Gaussiana. Como en otras poblaciones, la curva con forma de campana puede reflejar la gama de distribuciones desde la parte angosta hasta la ancha. Un polímero con una estrecha distribución de su peso molecular (DPM) contiene moléculas que están cercanamente al mismo peso molecular. Este se cristalizará más rápido y a un ritmo más uniforme.

Un polímero que contiene longitudes de cadena dentro del rango ancho, desde el corto al largo se dice que tiene un ancho DPM. Las resinas que contienen este tipo de distribución poseen una buena resistencia a la ruptura por esfuerzo ambiental (ESCR), buena resistencia al impacto y una buena procesabilidad.

Los polímeros también pueden tener una figura bimodal de curva de distribución, como el nombre sugiere parece describir una combinación de dos poblaciones diferentes de polímeros, en la cual cada uno tiene su particular promedio y distribución. Las resinas que tienen un DPM bimodal contienen tanto moléculas largas como pequeñas de polietileno, dando a la resina excelentes propiedades físicas, mientras mantiene una buena procesabilidad. La diferencia entre las diferentes distribuciones se muestra en la Figura 1.2.6.

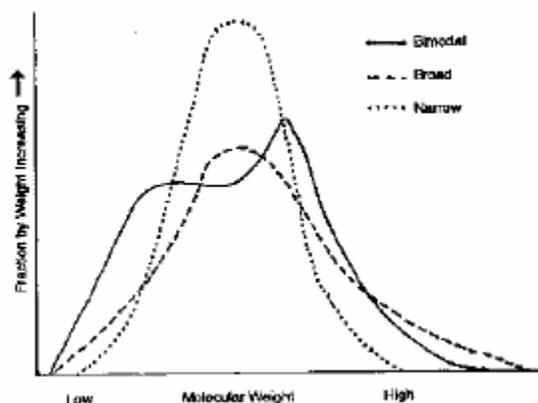


Figura. 1.2.6. Distribución del peso molecular

El DPM depende mucho del tipo de proceso empleado para elaborar una resina en particular. Para los polímeros con la misma densidad y un promedio de peso molecular, su rango de fluidez es relativamente independiente del DPM. Sin embargo, las resinas que tienen la misma densidad e índice de fusión pueden tener muy diferentes distribuciones de peso molecular. Los efectos de la densidad, el peso molecular y la distribución del peso molecular se muestran en la siguiente tabla:

Propiedad	Cuando la densidad incrementa, la propiedad:	Cuando el índice de fusión aumenta, la propiedad:	Cuando la distribución del peso molecular se acerca al lado ancho, la propiedad:
Esfuerzo de tensión (a la cedencia)	Incrementa	Disminuye	
Rigidez	Incrementa	Disminuye	Disminuye un poco
Resistencia al impacto	Disminuye	Disminuye	Disminuye
Ruptura a baja temperatura	Incrementa	Incrementa	Disminuye
Resistencia a la abrasión	Incrementa	Disminuye	
Dureza	Incrementa	Disminuye un poco	
Punto de ablandamiento	Incrementa		Incrementa
Resistencia al esfuerzo de ruptura	Disminuye	Disminuye	Incrementa
Permeabilidad	Disminuye	Incrementa un poco	
Resistencia química	Incrementa	Disminuye	
Esfuerzo de fusión		Disminuye	Incrementa
Brillo	Incrementa	Incrementa	Disminuye
Neblina	Disminuye	Disminuye	
Envejecimiento	Disminuye	Disminuye	Incrementa

1.2.5. Características del polietileno de alta densidad.

El PEAD es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino [PPI,7, RUBIN,6]. El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de comonomero presente y del tratamiento térmico aplicado. La cristalinidad de una resina de PEAD determinada puede variar dentro de una amplia gama debido a la tasa de enfriamiento de la masa fundida. Las tasas de enfriamiento más lentas favorecen el crecimiento cristalino. El intervalo de cristalinidad del PEAD normalmente abarca de un 50 a un 80 %. La densidad normalmente citada en las especificaciones para el PEAD está determinada por una lámina moldeada por compresión que ha sido enfriada a una tasa de 10°C por minuto. La mayoría de los procesos comerciales de fabricación enfrían la masa fundida a tasas mucho más rápidas. Como resultado, un artículo hecho de PEAD raramente alcanza la densidad citada en las especificaciones. Debido a que el grado de cristalinidad del PEAD es variable, ésta puede considerarse como un polímero amorfo con una cantidad variable de carga cristalina.

1.2.5.1. Polimerización.

El PEAD se manufactura mediante un proceso a baja presión. Por comparación, el polietileno de baja densidad (PEBD) se manufactura mediante un proceso a alta presión. La presión en la fabricación del PEAD está por debajo de los 14 MPa. En muchos casos, está por debajo de los 7 MPa.

Hay tres procesos comerciales importantes usados en la polimerización del PEAD: los procesos de disolución, en suspensión y en fase gaseosa. Los catalizadores usados en la fabricación del PEAD, por lo general son o del tipo óxido de un metal de transición o del tipo Ziegler/Natta.

Es importante notar que el comportamiento de las resinas de PEAD con índices de fusión, densidades y distribuciones de pesos moleculares (DPM) idénticas, puede variar si las resinas se producen mediante procesos diferentes. Estas diferencias normalmente sólo se consideran en aplicaciones críticas con muy estrechos márgenes de proceso. En la mayoría de sus aplicaciones, las resinas de PEAD seleccionadas de más de un proveedor funcionarán adecuadamente, aún si las resinas se hacen mediante diferentes procesos.

Junto con el índice de fusión y la densidad, la distribución de pesos moleculares (DPM) es una propiedad distintiva del PEAD. A medida que se polimeriza el PEAD, se producen moléculas de resina de PEAD que tienen un intervalo estrecho de longitudes moleculares, se dice que tiene una DPM estrecha. La DPM es una gráfica del peso molecular contra el número de frecuencia de un peso molecular determinado. A medida que se ensancha la DPM del PEAD, se incrementa la procesabilidad y la resistencia a la fusión, en tanto que decrecen la resistencia al impacto, la tenacidad a baja temperatura y la resistencia al combamamiento. La DPM del PEAD es, en gran parte, controlada por el tipo de catalizador usado en la polimerización y por el tipo de proceso de fabricación empleado.

1.2.5.2.Descripción de las propiedades.

En el caso del PEAD, se incrementan las propiedades de resistencia a la cedencia en tensión, la rigidez o resistencia a la deformación, impermeabilidad, resistencia a la abrasión, contracción en el moldeo y dureza al incrementarse la densidad. Por otra parte, se incrementan la resistencia al impacto, la flexibilidad y la resistencia al resquebrajamiento por intemperización (RRI) al disminuir la densidad.

A medida que el peso molecular promedio del PEAD se incrementa, el flujo de polímero fundido decrece. La prueba normal para la medición del flujo de masa fundida del PEAD se llama índice de fusión. El índice de fusión es inversamente proporcional al peso molecular promedio.

Las propiedades de RRI, resistencia al impacto, resistencia a la tracción, elongación, resistencia a la fusión e hinchamiento en troquel mejoran al disminuir el índice de fusión (así como al aumentar el peso molecular promedio).

Las propiedades de procesabilidad, estiramiento de la masa fundida y ópticas decrecen al disminuir el índice de fusión. A medida que se incrementa el peso molecular promedio del PEAD, hay más contracción y combamiento en las paredes moldeadas.

Estos breves comentarios sobre el índice de fusión y la densidad indican que no es posible maximizar todas las propiedades del PEAD en una sola resina. Por tanto, es necesario adquirir compromisos en cuanto al diseño de cualquier resina de PEAD. Por esa razón, la mayoría de los fabricantes de PEAD ofrecen muchos tipos de resina en su mezcla de producto. La selección de una resina de PEAD para una aplicación determinada tiene que ver con una evaluación cuidadosa de los requerimientos de aplicación a fin de seleccionar la resina de PEAD que más satisfaga los requerimientos más importantes.

La temperatura de transición vítrea T_g del polietileno está muy por debajo de la temperatura ambiente. Esto proporciona al polietileno una naturaleza más elástica (en comparación con el poliestireno, que tiene una temperatura de transición vítrea por encima de la ambiental). La naturaleza elástica del PEAD también limita su temperatura de servicio en comparación con la de un polímero con una T_g por arriba de la temperatura ambiente. Se le han asignado valores diferentes a la T_g del PEAD mediante diferentes técnicas de medición, lo cual ha dado pie a muchas controversias. Existen tres intervalos de temperatura comúnmente asignados como temperatura de transición vítrea del polietileno: -133 a -113 °C; -88 a -73 °C y -43 a 13 °C.

Debido a que el PEAD es elástico, su módulo de deformación es más importante que, por ejemplo, su módulo de flexión en la determinación de la resistencia durante el servicio de una parte hecha de PEAD que deba soportar una carga de trabajo por un período prolongado (de más de una hora). Los módulos de flexión o de tracción no se pueden usar con seguridad para calcular la resistencia de la parte fabricada. En lugar de eso, el diseñador debería consultar las especificaciones de termodeformación plástica y seleccionar un módulo de deformación que corresponda al tiempo de servicio máximo correspondiente a la carga de trabajo de la parte. El módulo de deformación debería emplearse en los cálculos de resistencia en lugar de los módulos de flexión y de tracción.

El no considerar la deformación dentro del diseño de las partes hechas de PEAD es una invitación a la falla prematura de dicha parte. La resistencia a la deformación mejora en el PEAD al incrementar la densidad y el peso molecular promedio. La resistencia a la deformación también se puede mejorar mediante técnicas de entrecruzamiento o reticulación, como la irradiación y el entrecruzamiento químico.

1.2.5.3.Aplicaciones.

El PEAD tiene muchos usos como envoltura de alimentos debido a que proporciona una excelente protección contra la humedad. No obstante, el PEAD, al igual que todos los polietilenos, está limitado a aquellas aplicaciones en el empaqueo de alimentos que no requieren de una barrera contra el oxígeno. En forma de película, el PEAD se usa en empaques para bocadillos y en recubrimientos de cajas para cereales; en forma de botella moldeada por soplado, para contener leche y algunas bebidas no carbonatadas y, en forma de tubo moldeado por inyección, para el empaquetamiento de margarina, crema batida para decorar, ultramarinos y conducción de agua pluvial y residual.

Debido a que el PEAD tiene una buena resistencia química, se emplea en el empaquetamiento de muchos productos químicos caseros e industriales. Ejemplos de tales aplicaciones del PEAD moldeado por inyección son las cubetas de 20 litros para líquidos de limpieza para pisos, cubetas de 1 galón para pintura y contenedores de pasta resanadora para construcción. Las aplicaciones del PEAD moldeado por soplado incluyen los tambores de 55 galones para anticongelante.

Si bien el PEAD tiene una buena resistencia química, puede presentar cierta tendencia a resquebrajarse por intemperización, comúnmente por agentes como detergentes y tensoactivos. El PEAD puede usarse en el empaque de estos productos si se selecciona cuidadosamente una resina con una relación tiempo resistencia al resquebrajamiento por intemperización (RRI) más prolongada que de la vida de anaquel del producto.

La RRI se incrementa al decrecer la densidad y el índice de fusión. No obstante existen muchas pruebas para evaluar la RRI, no existe sustituto para la experiencia de campo con un producto dado.

El PEAD no proporciona una buena barrera a los disolventes hidrocarbonados de bajo peso molecular, como el queroseno y no se recomienda en recipientes sin desfogue. Se llega a usar en contenedores de gasolina no críticos, en donde la pérdida de gasolina a través de las paredes puede ser tolerable y el contenedor tiene desfogue. Se puede usar en contenedores de gasolina con alto riesgo, como los depósitos de combustible de automotores si se añade una capa aislante mediante tratamiento por sulfonación y fluoruración superficiales.

Los usos generales del PEAD incluyen las cajas para bebida moldeadas por inyección, las charolas para pan y abarrotos, así como películas (que tienen un uso amplio y creciente en los sacos para comestibles y mercancías). Otra aplicación interesante es la lámina extruida que después es termoformada en artículos como canoas y recubrimientos de lechos para remolques.

1.2.5.4. Condiciones del procesamiento.

El PEAD sin agentes de refuerzo y de relleno (carga) no es higroscópico y por lo común, no requiere de un secado previo al proceso. El PEAD con carga absorberá pequeñas cantidades de humedad, de manera que puede requerir de un desecado.

Si el PEAD se almacena en silos en el exterior, los cambios extremos de temperatura pueden provocar que la humedad se condense sobre los comprimidos para lo que sería necesaria la desecación.

La resina debe protegerse del polvo, las fibras y de otros polímeros, ya que este tipo de contaminación puede afectar tanto el proceso como el funcionamiento en el uso final.

Las temperaturas normales de proceso varían de 177 a 316 °C. La estabilidad térmica es, por lo general, buena en todo el intervalo de temperatura si los tiempos de exposición a altas temperaturas son relativamente cortos. De otro modo la resina se puede degradar por entrecruzamiento, escisión de las cadenas o ambos. Es normal que ocurra un ligero cambio en el índice de fusión durante el proceso del PEAD.

Los artículos de PEAD pueden pulverizarse y reciclarse. El PEAD reciclado normalmente se mezcla con resina nueva antes de procesarse, por lo común en proporción de un 10% o menos de producto remolido. Por arriba de un 10% las propiedades físicas del producto fabricado pueden ser afectadas adversamente. Para mejores resultados, el producto remolido debe ser protegido de la contaminación por otros polímeros, la suciedad, el papel, etc.

1.2.5.5. Propiedades que imparte el procesamiento.

La resistencia al impacto, la rigidez y la estabilidad térmica de los artículos de PEAD son profundamente afectadas por las condiciones de procesamiento. Por ejemplo, la orientación unidireccional o el sobreempacamiento de un moldeado pueden disminuir grandemente la resistencia funcional al impacto.

Si se mantienen elevadas las temperaturas del proceso y si éste tiene un largo período de resistencia, la estabilidad térmica del artículo terminado puede reducirse grandemente.

La rapidez de enfriamiento afectará la rigidez y la resistencia al impacto del artículo. Con una rapidez de enfriamiento más lenta, la rigidez se incrementa y disminuye la resistencia al impacto.

1.2.5.6. Resistencia a la abrasión y ataque químico.

Los plásticos no presentan corrosión galvánica como los metales, ya que no son conductores [PPI,8, RUBIN,6]. Sin embargo, pueden ser afectados directamente por medio de un ataque químico, corrosión por tensión o solvatación. El aumento de la resistencia está en función de varios aspectos, incluidos la temperatura, el tiempo y el esfuerzo de contacto.

El polietileno es un hidrocarburo parafínico de alto peso molecular no polar. Es muy resistente a medios químicos y a otros medios como sales, ácidos y álcalis. Sin embargo, aceites, grasas y ceras pueden causar pequeñas burbujas.

Los agentes oxidantes fuertes tienden a atacar directamente las moléculas e inician un deterioro gradual de sus propiedades.

Los químicos orgánicos tienden a ser absorbidos por el plástico, este proceso es llamado solvatación. Los efectos de la solvatación, los cuales dependen mucho del tiempo, incluyen desarrollo de burbujas y ablandamiento del polímero.

La tensión por corrosión tiene lugar bajo acciones combinadas de tensión y ambiente químico. Otro nombre de este fenómeno es “ruptura por esfuerzo ambiental (ESC)”.

La resistencia al esfuerzo de ruptura se incrementa cuando la densidad disminuye y también el punto de fusión (peso molecular alto) decrece. El tipo de copolímero y su ubicación en la cadena del polímero, también afecta grandemente el ESC característico de él.

1.2.5.6.1. Prueba de inmersión.

La información publicada acerca de la resistencia química de varias resinas de polietileno y manufacturadas fue determinada por la prueba de inmersión. Estas sencillas pruebas de resistencia química utilizan muestras controladas que son inmersas en un medio químico (sin estar sometidas a esfuerzos) a dos o tres diferentes temperaturas. Después de cierto tiempo las muestras son removidas, pesadas, inspeccionadas y probadas. La resistencia es determinada por la cantidad aumento ó pérdida de peso o cambio en las propiedades mecánicas. Los rangos son listados como: “generalmente resistente”, “resistencia limitada” y “no resistente”. Algunos de los resultados son mostrados en la siguiente tabla. Cuando se usen este tipo de datos, se debe tener especial consideración si el material es expuesto a esfuerzos químicos, mecánicos o térmicos.

Las siguientes abreviaciones son utilizadas las cuales indican: la Resistencia química de resinas de las tuberías de polietileno de alta densidad.

R Generalmente Resistente. (Si el aumento es menor del 3% o se observó una pérdida de peso menor de 0.5%, y la elongación a la ruptura no cambió significativamente)

C Tiene resistencia limitada únicamente y puede ser conveniente en algunas condiciones. (Sí el aumento está entre el 3% y el 8% y/o se observó una pérdida de peso entre el 0.5% y el 5%, y/o la elongación a la ruptura disminuyó menos de un 50%)

N No es resistente. (El aumento es mayor del 8% o se observó una pérdida de peso mayor al 5% y/o la elongación a la ruptura disminuyó más de un 50%)

D Decoloración.

Los términos R a C, C a N, y R a T son utilizados cuando existen desacuerdos en la literatura.

Donde las concentraciones no son proporcionadas, indica que es un material relativamente puro, excepto en el caso de los sólidos, donde se indican soluciones acuosas saturadas.

* Indica que la resistencia química no aplica para juntas soldadas.

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Acetaldehyde & Acetic Acid		R	—	—
Acetaldehyde (aqueous)	all	R to C	C	C to N
Acetamide		R	—	R
Acetic acid	100% (glacial)	R	C to N	C to N
Acetic acid	50%, 60%, 70%, 80%	R	C	R to C
Acetic acid	10%, 20%	R	—	R
Acetic acid vapor		R	R	—
Acetic anhydride	100%	R	—	C
Acetoacetic acid		R	—	—
Acetone, 100%		R to C	C	C
Acetophenone		R	—	—
Acetylene		R	—	—
Acids aromatic		R	—	R
Acronal® dispersions - usual commercial		R	—	C
Acrylic acid emulsions		R	—	R
Acrylonitrile	technically pure	R	—	R
Adipic acid, saturated sol.		R	—	R
Adipic acid ester		R	—	C
Aktivin® (chloramine)(aqueous 1%)		R	—	R
Alcohol, allyl		R	C	R
Alcohol, amyl	technically pure	R	C	R to C
Alcohol, benzyl		R to C	C	R
Alcohol, (n-butanol)		R	R	R
Alcohol (2-butanol)		R	R	—
Alcohol, ethyl		R	C	R to C
Alcohol, hexyl		R	R	R
Alcohol, isopropyl (2-propanol)		R	R to C	R to N
Alcohol, methyl		R	R	R to C
Alcohol, propyl (1-propanol)		R	R	R
Allyl acetone		R	—	R to C
Alums (aqueous)	all	R	R	R
Aluminum salts (chloride, fluoride hydroxide, metaphosphate, sulphate)		R	R	R
Amino acids		R	—	R
Ammonia, gas		R	R	R
Ammonia, liquid		R	—	R
Ammonia (aqueous)		R	R	R
Ammonium salts (acetate, carbonate chloride, fluoride 10-25%, hydrosulphide, hydroxide, metaphosphate nitrate, phosphate, sulphate, sulphide, thiocyanate)		R	R	R
Amyl acetate	technically pure	R to C	C to N	C
Amyl chloride	100%	C	—	N
Amyl phthalate		R	—	C
Aniline (aqueous)	all	R	C to N	C to N
Aniline chlorhydrate		C	—	—
Aniline hydrochloride (aqueous) all		R to C	—	R
Aniline dyes		C	—	—
Animal oils		R	—	R to C
Aniseed oil		C	—	N
Anisole		C	—	C to N
Antifreeze		R	—	R
Anthraquinone		C	—	—
Anthraquinone sulfonic acid		R	—	R
Antimony chloride, pentachloride		R	—	R
Antimony trichloride		R	R	R
Aqua Regia		N	N	N
Arsenic acid (anhydride)		R	—	R
Arsenic acid (aqueous)		R	R	R

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Aryl sulfonic acid		R	—	—
Ascorbic acid		R	—	R
Asphalt		R	—	C
Aspirin		R	—	R
Barium salts	all	R	R	R
Barium hydroxide (aqueous)	all	R	R	R
Battery acid		R	—	R
Beater glue		R	—	R
Beer		R	R	R
Beet sugar liquor		R	—	—
Beeswax		R	C	C to N
Benzaldehyde (aqueous)	10%	R	—	C
Benzaldehyde in Isopropyl alcohol	1%	R	—	R
Benzene	pure	C	C to N	C to N
Benzene Sulfonic acid	all	Tro C	—	R to C
Benzoic acid (aqueous)	all	R	R	R
Benzoyl chloride		C	—	N
Bichromate-sulphuric acid concentrated		R	—	N
Bismuth salts		R	—	R
Bisulphite solution		R	—	R
Bitumen		R	—	C
Black liquor-paper		R	R	—
Bleach liquor (12.5% active chlorine)		R	N	N
Bleach liquor (5.5% active chlorine)		R	R	R
Bone oil		R	—	R
Borax		R	R	R
Boric acid (aqueous)	all	R	R	R
Boric acid methylester		R	—	C to N
Boron trifluoride		R	C	C
Brake fluid		R	—	R
Brandy - wine		R	—	—
Brine	saturated	R	R	R
Bromic acid		R	N	—
Bromine (gas)		N	N	N
Bromine (aqueous)		C	N	N
Bromine (liquid)		N	N	N
Bromochloromethane		N	—	—
Butanediol (aqueous)	all	R	R	R
Butadiene		R	C	—
Butane tetrol (erythritol)		N	N	—
Butane, gas		R	R	R
Butanetriol (aqueous)	all	R	—	R
Butoxy® (methoxybutyl acetate)		R	—	C
Butter		R	—	R to N
Butyl acetate		R to C	C	C to N
n-Butyl acetate		R	—	C
Butyl acrylate		R	—	C
Butyl benzyl phthalate		R	—	R
Butylene glycol		R	—	R
Butylene		R	R	—
Butyl phenol		R to C	C	R
Butyric acid (aqueous)	all	R	C	C
Calcium chloride		R	R	—
Calcium salts (aqueous)		R	R	R to C
Camphor oil		N	—	N
Camphor (crystals)		R	C	C
Calcium hydroxide		R	R	R
Cane sugar liquors		R	R	R
Carbazole		R	—	R

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Carbolic acid		R	—	R
Carbolinum for fruit trees (aqueous)		R	—	C
Carbon bisulfide		C to N	N	N
Carbon dioxide (wet or dry)		R	R	R
Carbonic acid (aqueous)	all	R	R	R
Carbon monoxide		R	R	R
Carbon tetrachloride		C to N	N	N
Carnauba wax		R	—	R
Casein		R	C	—
Castor oil		R	C	R to C
Caustic potash (dry & solution)		R	R	R
Caustic soda (dry & solution)		R	R	R
Cellosolve		C	C	—
Cetyl alcohol (hexadecanol)		R	—	R
Cellosolve acetate		C	C	—
Chloral hydrate (aqueous)	all	R	R	RD
Chloramine		R	—	—
Chloroacetic acid		R to C	R to N	R to N
Chloric acid	20%	R	N	—
Chlorine, gaseous, dry		C to N	N	N
Chlorine, gaseous, moist		C to N	N	N
Chlorine, liquid		N	N	N
Chlorine, water		R to C	C	C to N
Chlorobenzene		C to N	C to N	N
Chlorocarbonic acid		R	—	C
Chlorobenzyl chloride		C	C	C
Chloroethanol	pure	R	—	RD
Chloroform	pure	C to N	C to N	N
Chloromethane	100%	C	—	N
Chloropicrin		R to C	—	N
Chlorosulphonic acid	100%	C to N	C to N	N
Chrome alum		R	R	R
Chrome anode mud		R	—	R
Chrome salts (aqueous)	all	R	—	R
Chromic acid	10%, 30%, 40%, 50%	R	R to C	C to N
Chromic acid	80%	R	R to C	N
Chromium trioxide (aqueous*) up to 50%		R	—	—
Chromosulphuric acid		R	C	N
Cidar		R	—	R
Glucic acid (aqueous)	saturated	R	R	R
Clophen® A50 E A60		R	—	C to N
Coal-tar oil		RD	—	CD
Coconut oil		R	R to C	R to C
Cod liver oil		R	—	R to C
Coke oven gas (benzene free)		R	R	R
Coffee extract		R	—	R
Cognac		R	—	—
Cola concentrate		R	—	R
Copper salts (aqueous)		R	R	R
Copper chloride (aqueous)		R	R	R
Copper cyanide		R	—	R
Copper fluoride (aqueous)		R	R	R
Copper nitrate (aqueous)		R	R	R
Copper sulphate (aqueous)	all	R	—	R
Corn oil		R	R to C	C
Corn syrup		R	R	R
Cranberry sauce		R	—	R
Coumarone resins		R	—	R
Creosote		R	R	RD
Cottonseed oil		R	C	R
Cresol	100%	R to C	R to N	CD
Cresol (aqueous)	diluted	R	—	RD

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Crotonaldehyde	pure	R to N	N	C
Cresylic acid	50%	C	—	—
Cyclanone	usual commercial concentration	R	—	R
Crude oil		C	C	—
Cyclohexane		R	C	R to N
Cyclohexanol		R to C	C to N	N
Cyclohexanone		R to C	R to C	C to N
Decalin	pure	R	—	R
Detergents		R	R	R
Developer solutions (photographic)		RD	R	RD
Dextrin		R	R	R
Dextrose		R	R	R
Diazo salts		R	C	R
1,2-dibromoethane		C	—	N
Dibutyl ether		R to C	C	N
Dibutyl phthalate	pure	R	C	C
Dibutyl acetate		R	C	C
Dichloroacetic acid	pure	R	R	CD
Dichloroacetic acid	50%	R	—	CD
Dichloroacetic acid methyl ester		R	—	R
Dichlorobenzene		C	C to N	N
Dichloromethane		C	—	C
DDT (powder)		R	—	R
Dichloroethylene		C to N	C to N	N
Dichloropropane		C	—	N
Dichloropropene		C	—	N
Diesel fuel		R	C	C
Diethyl amine		C	C	—
Diethylene glycol		R	R	R
Diethyl ether		R to C	C	C to N
Di (2-ethylhexyl) phthalate (DOP)		R	—	C
Diethyl ketone		R	—	C
Diglycolic acid (aqueous)	30%	R	R	R
Diisobutyl ketone	pure	R	R	C to N
Diisopropyl ether		R to C	—	N
Dimethylamine		R to C	C	C
Dimethyl formamide	pure	R	R	R to C
Dimethyl sulphoxide		R	—	R
Diethyl phthalate		R to C	C	C to N
Dioxane 1,4		R	R	R
Diphenylamine		R	—	C
Diphenyl oxide		R	—	C
Disodium phosphate		R	R	R
Disodium sulphate		R	—	R
Dodecylbenzenesulphonic acid		R	—	C
Drinking water		R	—	R
Dyes		RD	—	RD
Electrolyte baths		R to C	—	C
Emulsifiers		R	—	R
Emulsions (photographic)		R	—	R
Emulsions (acrylic)		R	—	R
Ephedrin (aqueous)	10%	R	—	R
Epichlorohydrin		R	—	R
Epsom salts	all	R	—	R
Esters, aliphatic	pure	R	R	R to C
Ethane		R	—	R
Ether		R to C	C	C
Ethyl acetate	pure	R	C	C to R
Ethylbenzene	pure	C	—	—

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F	Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Liquid manure		R	—	R	Molasses		R	R	R
Liquid paraffin		R	—	R	Mixed acids (sulfuric & nitric)		N	N	—
Liquid soaps		R	—	R	Mixed acids (sulfuric & phosphoric)		R	C	—
Lithium bromide		R	—	R	Monochloroacetic acid		R	—	R
Lubricating oils		R to C	C	C	Monochloroacetic acid ethyl ester		R	—	R
Lithium salts		R	R	—	Monochloroacetic acid methyl ester		R	—	R
Linoleic acid		R	R	—	Monochlorobenzene		C to N	C to N	N
Lysol		R	—	C	Monohydroxylamine		—	—	—
Machine oil		R	R	C	Morpholine		R	—	R
Magnesium salts		R	R	R	Motor oil		R	R	R to C
Magnesium carbonate		R	R	R	Mowilith® polymer emulsions		R	—	R
Magnesium chloride		R	R	R	Mustard		R	—	R
Magnesium fluoride		R	—	R	Nail varnish remover		R	—	C
Magnesium hydroxide		R	—	R	Naphtha		R to C	C to N	C to N
Magnesium iodide		R	—	R	Naphthalene		R	C	C
Magnesium sulphate		R	R	R	Nickel chloride		R	R	R
Magnesium nitrate		R	R	R	Nickel nitrate		R	R	R
Maleic acid	50%-100%	R	R	R	Nickel salts		R	R	R
Malic acid	50%	R	R	R	Nickel sulphate (aqueous)	all	R	—	R
Manganese sulphate		R to C	R to C	R	Nicotine		R	—	R
Margarine		R	—	R	Nicotinic acid	diluted solution	R	—	R
Mesh		R	—	R	Nitric acid	0-30%	R	R to C	R
Mayonnaise		R	—	—	Nitric acid	30-50%	R to C	C	N
Menthol		R	R	C	Nitric acid	50%	C	N	N
Mercuric chloride		R	R	R	Nitric acid	70%	C to N	N	N
Mercuric cyanide		R	R	R	Nitric acid	80%	N	N	N
Mercurous nitrate		R	R	R	Nitric acid	90%	N	N	N
Mercuric salts		R	R	R	Nitric acid	100%	N	N	N
Mercury		R	R	R	Nitric acid fuming		N	N	N
Metallic soaps		R	R	R	Nitrobenzene		R to C	C	N
Metallic mordants		R	—	—	Nitrocellulose		R	—	—
Methacrylate		R	—	R	Nitroketone		R	C	N
Methacrylic acid		R	—	R	Nitrous acid		R	N	—
Methane		R	R	—	Nitrous oxide, gas		R	N	—
Methanol	pure	R	R	R	Nitroglycerine		R	C	—
Methyl acetate		C	C	—	Nitroglycol		—	—	—
Methyl bromide		C	C to N	N	Nitropropane		—	—	—
Methyl cellosolve		C	C	—	Nonyl alcohol		R	—	R
Methyl chloride		C	C to N	N	Octyl cresol		C	N	—
Methyl chloroform		C	C	—	Oils and fats		R	R to C	C to N
Methyl benzene		C	—	N	Oils, vegetable		R to C	C	C
Methoxy butanol		R	—	C	Oleic acid		R to C	C	C
Methoxybutyl acetate (Butozyl)		R	—	C	Oleum		N	N	N
Methyl cyclohexane		C	C	N	Olive oil		R	R	R
Methyl cyclohexanone		R	C	—	Optical brighteners		R	—	R
Methyl methacrylate		R	C	R	Orange juice		R	—	R
Methyl salicylate		R	—	C	Orthophosphoric acid	50%	R	R	R
Methyl sulfate	50%	R	—	R	Orthophosphoric acid	85%	R	R	C
Methyl sulfuric acid		R	—	R	Oxalic acid		R	R	R
Methyl ethyl ketone		R to N	R	N	Oxygen, gas		R	R	R
Methyl glycol		R	—	R	Ozone, gas		C	C	N
Methyl isobutyl ketone		R	—	C to N	Palmitic acid	10%	R	R	R to C
4-Methyl/2-pentanone		R	—	R to CD	Palmitic acid	70%	R	R	—
Methyl propyl ketone		R	—	C	Palmityl alcohol		R	—	R
n-Methyl pyrrolidone		R	—	R	Paraffin		R to C	C	C
Methylene bromide		C	C	—	Palm kernel oil		R	—	R
Methylene chloride*		C	C	C to N	Paraformaldehyde		R	—	R
Methylene iodide		C	C	—	Pentane		C	C	—
Milk		R	R	R	Pentanol		R	—	R
Mineral oil		R to C	C	C to N					

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F	Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Peppermint oil		R	—	—	Potassium nitrate		R	R	R
Peracetic acid		R	—	—	Potassium orthophosphate saturated		R	—	R
Perchloric acid (aqueous)	up to 20%	R	R	R	Potassium perchlorate		R	R	R
Perchloric acid (aqueous)	20% to 50%	R	R	C	Potassium perborate		R	R	R
Perchloric acid (aqueous)	70%	R	R to C	N	Potassium permanganate	up to 25%	R	R	R
Perchloroethylene		C	C	M	Potassium persulphate (aqueous) all		R	R	R
Perfume oils		C	—	C to N	Potassium salts		R	R	—
Petroleum (sour, refined)		R	C	C	Potassium sulphate		R	R	R
Petroleum ether		R	—	C	Potassium sulfide		R	R	R
Phenol		R	C	RD	Potassium sulfite		R	—	R
Phenolic resin moulding materials		R	—	R	Potassium tetracyanoacrylate		R	—	R
Phenylcarbinol		—	—	—	Potassium thio sulphate		R	—	R
Phenethylalcohol		R	—	R	Propene, gas		R	R	R
Phenylhydrazine		C	C	C to N	Propargyl alcohol (aqueous)	7%	R	—	R
Phenylhydrazine hydrochloride		R to C	C	R	Propionic acid (aqueous)	all	R	—	R to C
Phenylsulphonate		R	—	R	Propylene dichloride	100%	C to M	—	N
Phenylsulphonate		R	—	R	Propylene glycol		R	R	R
Phosgene gas		C to M	C	—	Propylene oxide		R	—	R
Phosgene liquid		M	M	—	Prussic acid		R	R	R
Phosphorus oxychloride		R	R	C	Pseudocumene		C	—	C
Phosphorus pentoxide		R	R	R	Pyridine		R	C	C
Phosphorus trichloride		R	R	C	Pyrogallol acid		—	—	—
Phosphoric acid	50%	R	R	R	Pulp mill water (red & black liquor)		R	R	—
Phosphoric acid	80%-100%	R	—	CD					
Phosphorus, yellow		—	—	—	Quinine		R	—	R
Phosphorus, red		—	—	—	Quinol (hydroquinone)		R	—	R
Phosphates (aqueous)	all	R	R	R					
Photographic developers		RD	—	RD	Rayon coagulating bath		R	—	R
Phthalic acid (aqueous)	50%	R	R	R	Rubber dispersions (latexes)		R	—	R
Phthalic acid ester		R	—	R to C					
Picric acid (aqueous)		R	R to C	C	Sargrotan®		R	—	C
Pineapple juice		R	—	R	Saline acid (aqueous)		R	—	C
Pine-needle oil		R	—	C	Salicylic acid		R	R	R
Plating solution, metals (many types)		R	C	R	Saturated steam concentrate		R	—	R
Plasticizers		R	—	C	Sewertrout		R	—	R
Polyester plasticizers		R	—	R to C	Salicylaldehyde		R	R	—
Polyester resins		C	—	R	Sea water		R	R	R
Polyglycols		R	—	R	Selenic acid		R	R	R
Potash		R	R	R	Sewage, residential		R	R	—
Potash aluminum (aqueous)		R	—	R	Silicic acid (aqueous)	all	R	R	R
Potassium alkyl xanthates		—	—	—	Silicone, oil		R	R to C	R to C
Potassium bicarbonate (aqueous) all		R	—	R	Silver, acetate		R	R	R
Potassium bichromate	40%	R	—	R	Silver, cyanide		R	R	R
Potassium bisulphate (aqueous)	all	R	—	R	Silver, nitrate		R	R	R
Potassium borate (aqueous)	1%	R	R	R	Silver salts		R	R	R
Potassium bromate (aqueous)	up to 10%	R	R	R	Soap solutions (can be stress cracking agents)		R	R	R
Potassium bromide (aqueous)	all	R	R	R	Sodium acetate (aqueous)	all	R	R	R
Potassium carbonate (aqueous)	all	R	R	R	Sodium aluminum phosphate		R	—	R
Potassium chlorate (aqueous)	all	R	R	R	Sodium benzoate		R	R	R
Potassium chloride (aqueous)	all	R	R	R	Sodium bicarbonate		R	R	R
Potassium chromate (aqueous)	40%	R	R	R	Sodium bisulphate		R	R	R
Potassium cyanide (aqueous)	all	R	R	R	Sodium bisulphite (aqueous)	all	R	R	R
Potassium dichromate (aqueous)	all	R	R	R	Sodium borate		R	R	R
Potassium ferricyanide (aqueous)	all	R	R	R	Sodium bromide		R	R	R
Potassium ferrocyanide (aqueous)	all	R	R	R	Sodium carbonate (aqueous)	all	R	R	R
Potassium fluoride (aqueous)	all	R	R	R	Sodium chlorate	saturated	R	R	R
Potassium hydroxide (aqueous)	all	R	R	R	Sodium chloride (aqueous)	salt	R	R	R
Potassium hypochlorite		R	R	C	Sodium chlorite		R	R	R
Potassium hydrogen carbonate		R	—	R	Sodium chromate		R	—	R
Potassium hydrogen sulfate	saturated	R	—	R	Sodium cyanide		R	R	R
Potassium hydrogen sulfide		R	—	R	Sodium dichromate		R	—	R
Potassium iodide		R	—	R	Sodium dichromate, acid		R	C	—

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Sodium dodecylbenzenesulphonate		R	—	R
Sodium ferricyanide		R	R	R
Sodium ferrocyanide		R	R	R
Sodium fluoride		R	R	R
Sodium hexacyanoferrate		R	—	R
Sodium hydrogen carbonate		R	—	R
Sodium hydrogen diphosphate		R	—	R
Sodium hydrogen sulfite		R	—	R
Sodium hydroxide, aqueous & solid	all	R	R	R
Sodium hypochlorite		R	R	R
Sodium nitrate (aqueous)	all	R	R	R
Sodium orthophosphate		R	—	R
Sodium perborate (aqueous)	all	R	—	R
Sodium perchlorate (aqueous)	R	R	—	R
Sodium peroxide	10%	R	—	R
Sodium peroxide (aqueous)	saturated	C	—	—
Sodium phosphate (aqueous)	saturated	R	—	R
Sodium salts (aqueous)		R	R	—
Sodium silicate		R	—	R
Sodium sulphate		R	R	R
Sodium sulfide		R	R	R
Sodium sulfite		R	—	R
Sodium thiosulphate		R	R	R
Soft soap		R	—	R
Soybean oil		R	—	R
Spindle oil		R to C	—	C
Stain removers		R to C	—	C
Stannic chlorides		R	R	R
Stannous chloride		R	R	R
Starch (aqueous)	up to 100%	R	R	R
Stearic acid		R	R	R to C
Styrene		C	—	N
Stoddard solvent		R	C	—
Succinic acid	50%	R	—	R
Sulfur dioxide, dry		R	R	R
Sulfur dioxide, wet		R	R	R to C
Sulfite liquor		R	R	—
Sulfur		R	R	R
Sulfuric acid	up to 50%	R	R	R
Sulfuric acid	50%-70%	R	R	R
Sulfuric acid	70%-90%	R	C to N	C
Sulfuric acid	90%	C to N	N	N
Sulfuric acid fuming		N	N	N
Sulfurous acid		R	R	R
Sulfuric ether		R to C	—	C
Sulfur trioxide		N	N	N
Sulfuryl chloride		N	—	—
Syrups & augers		R	R	R
Tall oil		R	R	—
Tallow	pure	R	R	R
Tannic acid		R	R	R
Tanning liquors		R	R	—
Tartaric acid (aqueous)		R	R	R
Tetrabromoethane		N	N	N
Tetrachloroethane		C to N	C to N	N
Tetrachloromethylene		—	—	—
Tetraethyl lead		—	—	—
Tetrahydrofuran		C to N	N	N

Chemical Name	Concentration	73°F	120°F	140°F
Tetrahydronaphthalene		R	—	C to N
Thioglycolic acid		R	—	R
Thionyl chloride		N	N	N
Thiophene		C	—	N
Thread cutting oil		—	—	—
Terpineol		—	—	—
Titanium tetrachloride		R	R	—
Toluene		C to N	C to N	N
Toluene - kerosene	25%-75%	C	—	N
Transformer oil		R	R to C	R to C
Tributyl citrate		C	C	—
Tributyl phosphate		R to C	N	R
Trichloroacetic acid	pure	R	R	C to N
Trichloroacetic acid	50%	R	C	R
Trichloroethylene	pure	C to N	C to N	N
Trichlorobenzene		N	—	N
Tricresyl phosphate		R to C	C	R
Triethanolamine		R	C	R to CD
Triethylene glycol		R	—	R
Triethylamine		R	C	—
Triethyl borate		R	—	C to N
Trimethyl propane		C	C	—
Trimethylol propane (aqueous)		R	—	R
Tri- <i>n</i> -chloroethyl phosphate		R	—	R
Trioctyl phosphate		R	—	C
Triodium phosphate		R	—	R
Turpentine		C	C to N	N
Tutogen [®] 41		R	—	R
Tween [®] 20 & 80		R	—	N
Two-stroke engine oil		R	—	C
Urea	up to 33%	R	R	R
Uric acid		R	—	R
Urine		R	R	R
Vaseline		R to C	R	C
Vegetable oils		R	R	R
Vinegar		R	R	R
Vinyl acetate		R	—	R
Walnut oil		R	—	C
Water, distilled, fresh, mine, salt, tap		R	R	R
Wax alcohols		C	—	C
Whites		R	—	R to C
Whey		R	—	R
Whiskey		R	R	R
Wine		R	R	R
Wood stains		R	—	R to C
Xylene		C to N	C to N	N
Yeast		R	R	R
Zinc carbonate		R	R	R
Zinc chloride		R	—	R
Zinc oxide		R	—	R
Zinc salts (aqueous)	all	R	R	R
Zinc sulfate		R	—	R
Zinc sludge	†	R	—	R
Zinc stearate		R	—	R

1.2.5.6.2. Prueba de abrasión y resistencia química. Universidad Estatal de California.

Para verificar la abrasión y la resistencia química que tienen las tuberías corrugadas de polietileno de alta densidad el Dr. Lester Gabriel [PPI,8] de la Universidad Estatal de California en 1990, realizó unas pruebas sobre dicha tubería bajo condiciones controladas de laboratorio.

El estudio tiene como objetivo verificar la durabilidad de la tubería de polietileno cuando es utilizada en sistemas de drenaje sanitario [PPI,8], cuando el flujo que transporta contiene compuestos y materiales químicos que pueden ocasionar una disminución en las propiedades físicas y químicas de la tubería. Para poder tener un comparativo las condiciones se repitieron en tubos de concreto que es el material más utilizado para desalojar aguas residuales de tipo sanitario.

Las pruebas que se realizaron consistieron en hacer girar las distintas tuberías de prueba de concreto y PEAD (12 pulgadas de diámetro) a una velocidad de 0.9 m/s y agregando un sistema disperso a diferentes valores de pH y arena de cuarzo que funciona como abrasivo. La prueba termina cuando el concreto muestra el acero de su estructura y es comparado con la pérdida del espesor de la pared interna de la tubería de polietileno.

Los resultados que se obtuvieron son los siguientes:

- a) Para un sistema disperso con un valor de pH de 7, es decir arena de cuarzo y agua libre de contaminación, se observó que el concreto tenía un espesor de pared interna de 54.6 mm y se perdió completamente esta pared, mientras que para la tubería de polietileno corrugado que tenía un espesor de pared interna de 2.8 mm quedó un 40% de ella.

Por lo tanto, se puede observar que solo se tuvo un efecto de abrasión, ya que no se tenían presentes agentes químicos en el sistema.

- b) Para evaluar un efecto de abrasión con ataque químico, se preparó un sistema disperso con un valor de pH de 4, manteniendo la arena de cuarzo para seguir con el fenómeno de abrasión. Los resultados determinados son que en la tubería de concreto reforzado con un espesor de pared interna de 54.6 mm después de terminada la prueba no quedó nada de este espesor; mientras que en la tubería de polietileno corrugado con un espesor de pared interna de 2.8 mm, se obtuvo un remanente del 31% de dicho espesor.

Las conclusiones a las que llegó el Dr. Lester Gabriel derivaron en establecer que la tubería de polietileno corrugado puede resistir al efecto de abrasión y ataque químico, por lo tanto, se le concede un tiempo de vida de 50 años o más [PPI,8]. Esta asignación también es sustentada a que se tienen 30 años de servicio las tuberías y siguen funcionando adecuadamente.

Otro tipo de análisis desarrollado [RATAJSKA,9] en este tipo de resinas indica que una resina sintética como es el caso del PEAD, tiene una degradación por el medio ambiente mucho menor que una natural, fortaleciendo el tiempo de vida asignado por el Dr. Gabriel.

Considerando la importancia que tiene el ataque químico y la abrasión en la vida útil de un tubo fabricado con un material termoplástico, en el presente trabajo se realizaron una par de pruebas que tienen como fin evaluar dicha resistencia. En la sección denominada pruebas experimentales se describe con detalle las características de las pruebas realizadas.

Consideramos de gran importancia considerar los datos mostrados en la tabla siguiente, donde aparecen los valores promedio de calidad del agua en los colectores de la red primaria del sistema de drenaje de la Zona Metropolitana de la Cd. de México. Este estudio fue desarrollado en 1999, cuando el Consejo de Estudios para la Restauración y Valoración Ambiental (CONSERVA), convocó a los especialistas en materia ambiental a proponer estudios tendientes a mejorar la calidad del ambiente del Distrito Federal.

En la siguiente tabla se muestran los valores típicos de un agua residual de origen sanitario en la Ciudad de México.

PARAMETRO, mg/l a menos que se especifique otra unidad	1	2	3	4
pH, unidades	7.79	7.36	7.59	7.60
Color, unidades Pt-Co	493.54	145.00	193.01	270.59
Turbidez, UTN	220.65	161.33	232.49	217.07
Alcalinidad total, ppm CaCO ₃	466.19	229.73	365.39	561.25
Alcalinidad a la fenolftaleina, ppm CaCO ₃	141.83	176.16	10.00	10.00
Dureza total, ppm CaCO ₃	249.87	169.92	224.42	312.11
Carbonatos, ppm CaCO ₃	60.69	352.32		
Bicarbonatos, ppm CaCO ₃	460.28	206.25	393.96	564.25
Conductividad eléctrica, µmho/cm	1,811.90	863.37	1,407.02	2,010.83
Cloruros	217.57	40.02	108.73	145.95
Boro	3.54	0.35	1.62	1.24
Sulfatos	137.62		109.24	111.80
Dureza de calcio, ppm CaCO ₃	134.89		120.48	105.00
Dureza de magnesio, ppm CaCO ₃	121.01		89.48	91.00
Sólidos totales	1,866.21	923.67	1,971.30	264.44
Sólidos totales fijos	1,175.65	604.00	752.21	541.71
Sólidos total volátiles	728.58	521.33	438.03	216.29
Sólidos disueltos total	1,064.83	680.07	916.97	844.88
Sólidos disueltos fijos	899.49	504.00	669.49	519.57
Sólidos disueltos volátiles	181.16	170.67	221.55	141.29
Sólidos suspendidos total	801.38	264.61	411.58	319.47
Sólidos suspendidos fijos	276.17	100.00	82.81	22.14
Sólidos suspendidos volátiles	514.23	350.67	218.05	75.00
Sólidos sedimentables	9.35	0.87	1.76	1.65
Nitrógeno amoniacal	31.69	18.89	48.01	42.10
Nitrógeno total	54.47	43.96	52.95	36.39
Nitratos	0.21	0.40	0.26	0.51
Fósforo total	19.11	7.04	13.02	14.45
Fosfatos totales	58.58	21.59	39.93	44.36
Orto fosfatos	47.89		26.02	10.72
Nitrógeno orgánico	21.91		16.34	10.95
Nitrógeno de nitritos	0.05	0.07	0.10	0.07
Calcio soluble	37.813	30.667	39.135	43.400
Magnesio soluble	25.350	14.000	20.239	22.800
Sodio soluble	269.300	104.667	187.066	88.400
Potasio soluble	33.788	36.333	33.559	17.600
Calcio total	53.026	41.467	53.389	61.431
Magnesio total	28.583	16.100	23.330	112.864
Sodio total	250.253	81.267	145.986	214.653

PARAMETRO, mg/ a menos que se especifique otra unidad	1	2	3	4
Potasio total	34.763	21.558	35.882	62.636
Hierro soluble	1.398	0.149	0.101	0.052
Manganeso soluble	0.178	0.062	0.518	0.088
Plomo soluble	0.069	0.063	1.494	0.065
Cadmio soluble	0.009	0.009	0.019	0.008
Mercurio soluble	0.001	0.001	0.001	0.001
Arsénico soluble	0.001	0.002	0.003	0.004
Cromo soluble	0.067	0.111	0.061	0.096
Cinc soluble	0.029		0.016	0.007
Cobre soluble	0.032		0.026	0.540
Silicio soluble	32.025		24.251	29.000
Hierro total	13.114	2.507	10.110	2.435
Manganeso total	0.318	0.097	1.903	0.131
Plomo total	0.178	0.104	0.182	0.082
Cadmio total	0.009	0.009	0.018	0.009
Mercurio total	0.002	0.001	0.001	0.001
Arsénico total	0.002	0.004	0.006	0.016
Cromo total	2.297	0.412	0.096	0.058
Cinc total	2.131		0.309	0.076
Cobre total	0.206		0.262	2.652
Silicio total	34.08		26.10	27.50
Coliformes fecales, NMP/100 mL	8.10E+07	4.90E+07	8.70E+07	2.67E+07
Coliformes totales, NMP/100 mL	1.45E+08	1.26E+08	1.09E+08	1.13E+08
DBO total	624.12	351.47	317.58	330.83
DBO soluble	304.82	232.33	146.72	69.50
DQO total	1,135.53	660.03	722.85	932.93
DQO soluble	447.45	374.61	271.34	121.97
Grasas y aceites	38.90	80.50	59.58	30.75
SAAM	12.54	11.80	9.74	19.69
Temperatura, °C		24.25	21.00	

2.- Estudios realizados

2.1.- Pruebas experimentales

Compresión diametral libre

Para la realización de estas pruebas experimentales fueron preparadas muestras de tubos de PEAD con pared estructura de la marca ADS Mexicana con diámetros interiores de 10 y 36 pulg., así como tubos PVC hidráulicos con diámetro interior nominal de 10 pulgadas. La compresión de los tubos fue realizada en una máquina universal en un arreglo como el que se muestra en la Figura 2.1.1. La carga fue aplicada a una rapidez de 11Kg/mim y fueron registrados los valores de carga correspondientes a un 5%, 20% y en algunas muestras 60 % de reducción del diámetro interior.



Figura 2.1.1 Arreglo de compresión diametral libre

Un grupo de muestras, de PVC y PEAD diámetro interior igual a 10 pulg., fueron sometidas a un desbaste en la pared interior, realizado por torneado, para simular una condición de desgaste. Fueron practicados 3 diferentes magnitudes de desbaste a cada tipo de tubo, con lo cual se obtuvieron diferentes porcentajes de disminución de la pared interior. Para este grupo de muestras fue registrado el valor de carga correspondiente a una deflexión diametral de un 5% y 20 % del diámetro interior. Cabe mencionar que, fue tomada como pared interior del tubo de polietileno el espesor la misma en la región correspondiente a parte interior de cresta como se indica en la Figura 2.1.2.

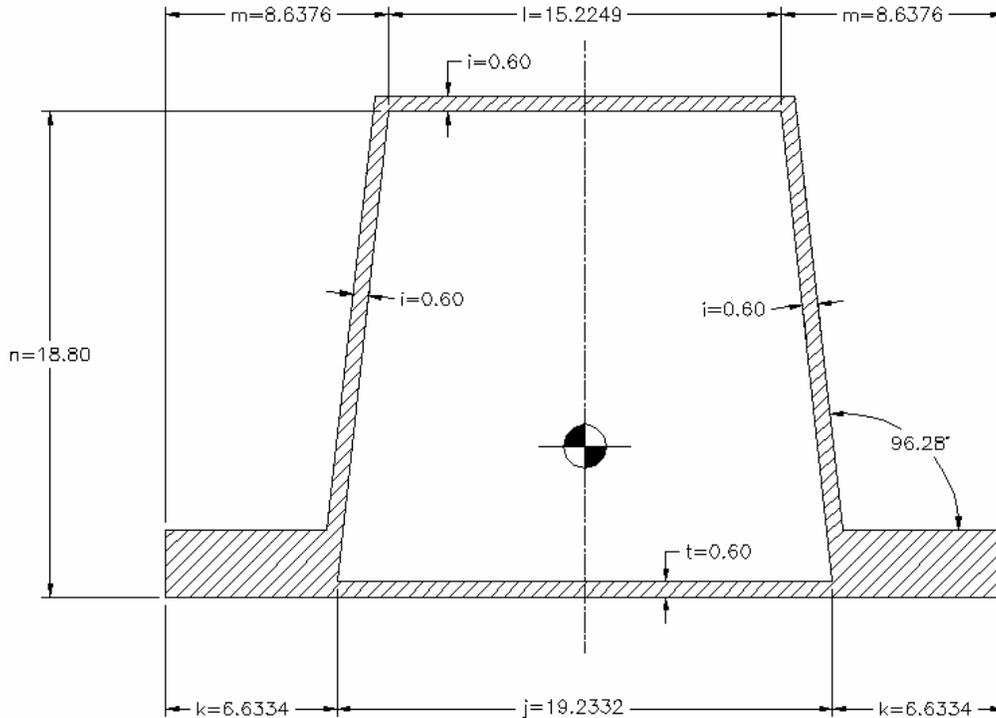


Figura 2.1.2. Diagrama que muestra la geometría del perfil que presentó un tubo de PEAD empleado en nuestro estudio. La pared interna de dichos tubos fue tomada como t de la figura.

Otro grupo de 8 tubos de PEAD corrugado sin desbaste en la pared interior, cuatro de ellos con diámetro interior de 10 pulg. y dos de 36 pulg., así como dos tipo D, de triple pared, de 60 pulg. de diámetro, fueron sometidos a compresión diametral libre y registrados los valores de carga correspondientes a una deflexión de 5%, 20% y 60 % del diámetro interior.

Los tubos de PEAD sometidos a compresión diametral libre fueron instrumentados con galgas extensométricas tipo EA-30-250BF-350. Uno tubo de 10 pulg. de diámetro interior y otro de 36 pulgadas, fueron instrumentados con 3 de ellas en la parte exterior del tubo y 2 en la parte interior. Las posiciones de los extensómetros fueron llamadas: valle exterior, lateral cresta, cresta exterior, valle interior, cresta interior. En la Figura 2.1.3 se muestran las posiciones donde fueron pegados los extensómetros. Estas muestras fueron cargadas diametralmente hasta que fue observada la inversión de la curvatura es decir el pandeo del mismo. Un tubo de 10 otro de 36 y uno más de 60 pulg. fueron instrumentado con 5 extensómetros colocados en la pared interna como se muestra en la Figura 2.1.4. La muestra fue sometida a compresión diametral de hasta una deflexión de un 60% de diámetro interior.

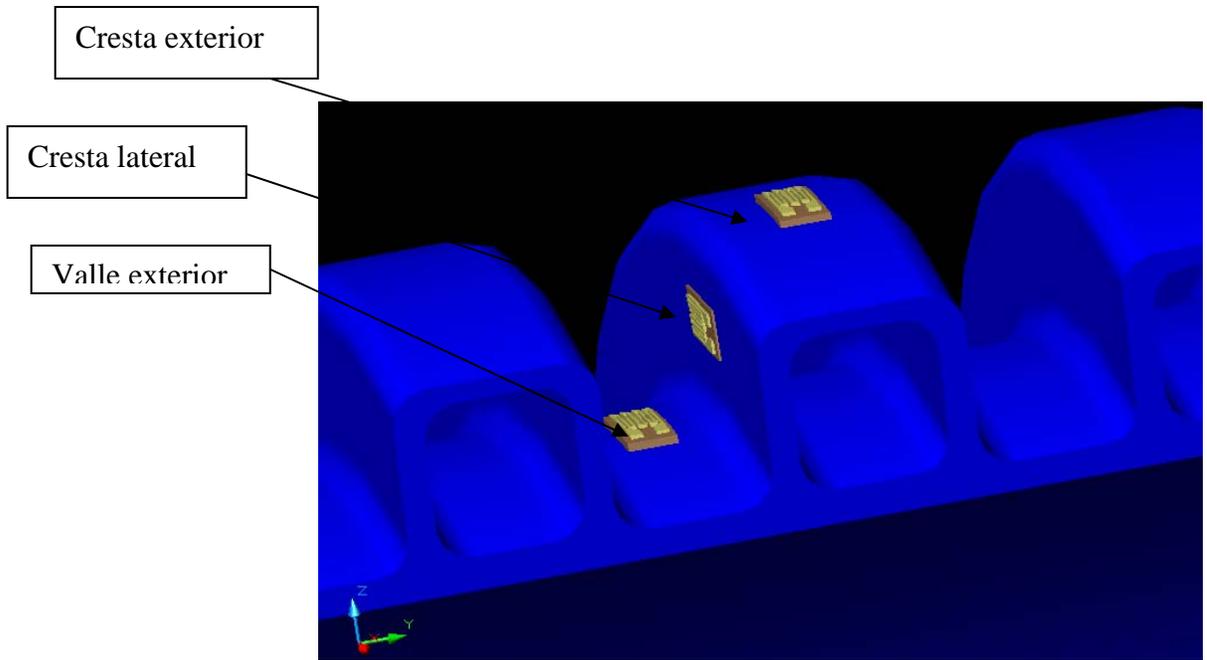


Figura 2.1.3. Diagrama que muestra la forma en que fueron colocados 5 extensómetro en la muestra PSL5 y PSL36E.

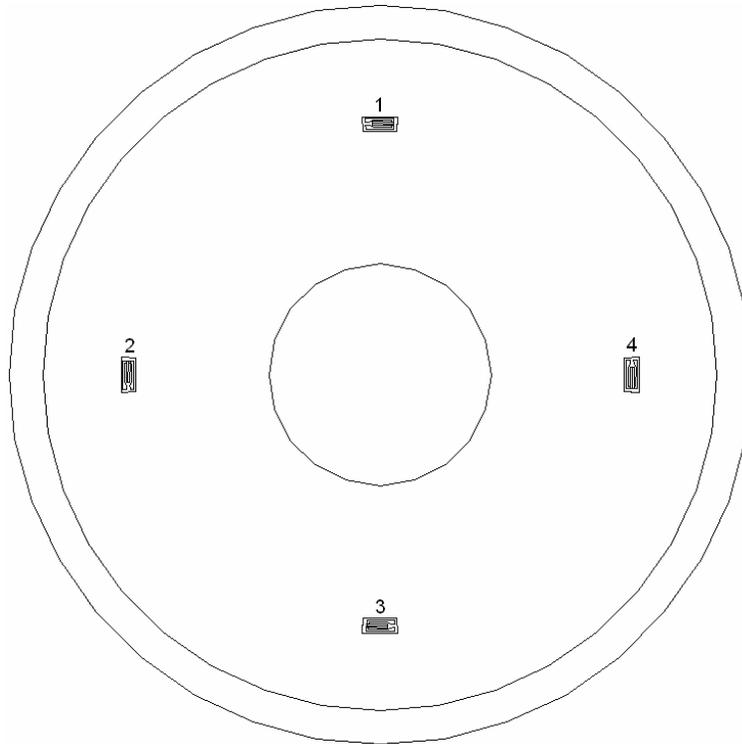


Figura 2.1.4 Diagrama que muestra la posición, en la pared interna, donde fueron colocados 4 extensómetros en la muestra PSL52.

El registro de las deformaciones en los tubos instrumentados con galgas extensométricas fue realizado empleando un equipo de adquisición de datos modelo 6200, un equipo P-3500 y un SB-10 de la marca Visahy.

En la tabla 1 se presenta un listado de las muestras ensayadas así como la instrumentación aplicada y la prueba practicada.

Tabla 1. Lista de muestras empleadas en el estudio

Muestra	Material	Diámetro interior del tubo (mm)	Prueba realizada
PS1	Polietileno	254	Compresión diametral libre
PS11	Polietileno	“	Compresión diametral libre
PS12	Polietileno	“	Compresión diametral libre
PS13	Polietileno	“	Compresión diametral libre
PS14	Polietileno	“	Compresión diametral libre

PS2	Polietileno	“	Compresión diametral con 40% de reducción de la pared interna
PS22	Polietileno	“	Compresión diametral con 40% de reducción de la pared interna
PS3	Polietileno	“	Compresión diametral con 20% de reducción de la pared interna.
PS33	Polietileno	“	Compresión diametral con 20% de reducción de la pared interna.
PS4	PVC	“	Compresión diametral con 13.3% de reducción de la pared interna.
PS44	PVC	“	Compresión diametral con 13.3% de reducción de la pared interna.
PVS1	PVC	“	Compresión diametral
PVS2	PVC	“	Compresión diametral con 20% de reducción de la pared interna.
PVS22	PVC	“	Compresión diametral con 20% de reducción de la pared interna.
PVS3	PVC	“	Compresión diametral con 30% de reducción de la pared interna.
PVS33	PVC	“	Compresión diametral con 30% de reducción de la pared interna.
PVS4	PVC	“	Compresión diametral con 10% de reducción de la pared interna.
PVS44	PVC	“	Compresión diametral con 10% de reducción de la pared interna.
PSC1	Polietileno	“	Compresión diametral
PSC5	Polietileno	“	Compresión a tubo confinado instrumentado con 5 extensómetros
PSL5	Polietileno	“	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros

PSL52	Polietileno	“	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros
PSC10	Polietileno	“	Compresión diametral a tubo confinado instrumentado con 10 extensómetros
PVC7	PVC	“	Compresión a tubo confinado instrumentado con 5 extensómetros
PP1	Polietileno	“	Segmento del perfil sujeto a compresión instrumentado con 3 extensómetros
PP2	Polietileno	“	Segmento del perfil sujeto a compresión instrumentado con 3 extensómetros
PP3	Polietileno	“	Segmento del perfil sujeto a compresión instrumentado con 3 extensómetros
PP4	Polietileno	“	Segmento del perfil sujeto a compresión instrumentado con 3 extensómetros
PSL36S	Polietileno	914.4	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros
PSL36E	Polietileno	“	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros
PSL36S	Polietileno	1524	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros
PSL36E	Polietileno	“	Compresión diametral libre instrumentado con 5 extensómetros

Compresión transmitida a tubos confinados.

Para realizar esta prueba fue construido un dispositivo como el que se muestra en la Figura 2.1.5 en el cual fue enterrado el tubo con suelo compactado manualmente. El arreglo que se muestra en la Figura 2.1.5 proporcionó al tubo una carga actuante compuesta por una carga muerta y una viva aplicada a través de la máquina universal como se muestra en la Figura 2.1.6. Las muestras sometidas a dicha prueba fueron:

- Dos tubos de PEAD, uno con 5 extensómetros colocados como en la Figura 2.1.3 mientras que el otro fue instrumentado con 10 extensómetros colocados como se muestra en la Figura 2.1.7.
- Un tubo de PVC con pared constante fue instrumentado con 7 extensómetros colocados como se muestra en la Figura 2.1.8.



Figura 2.1.5. Dispositivo construido para realizar las pruebas de compresión a tubo confinado

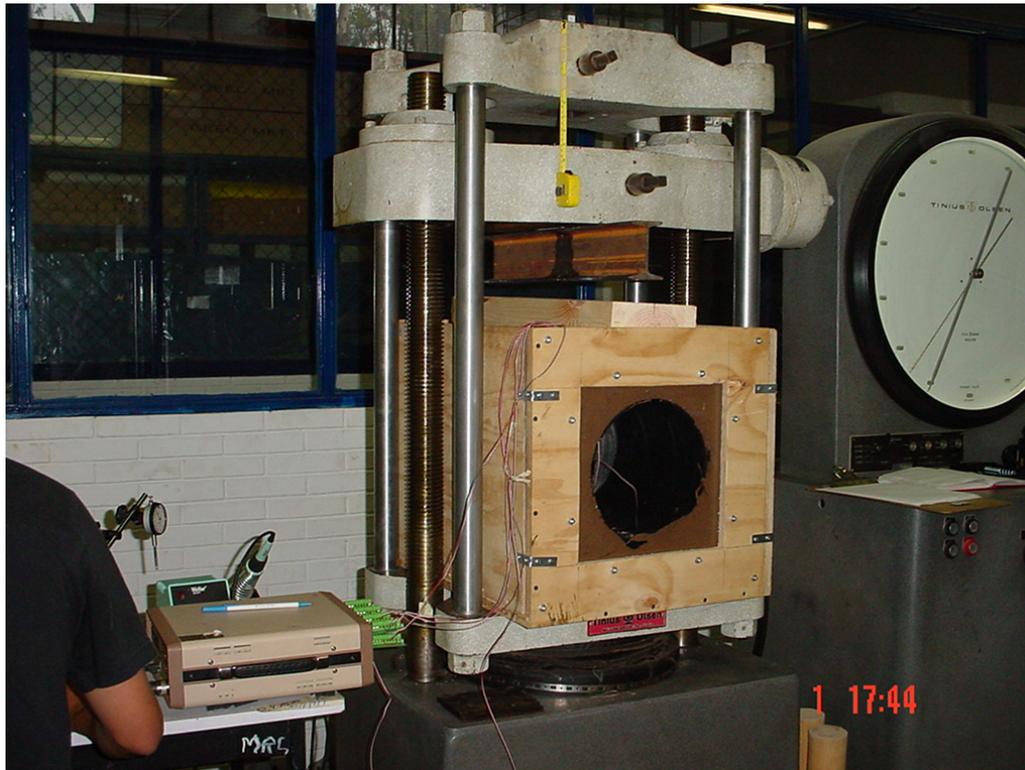


Figura 2.1.6. Arreglo del tubo enterrado colocado en la máquina universal

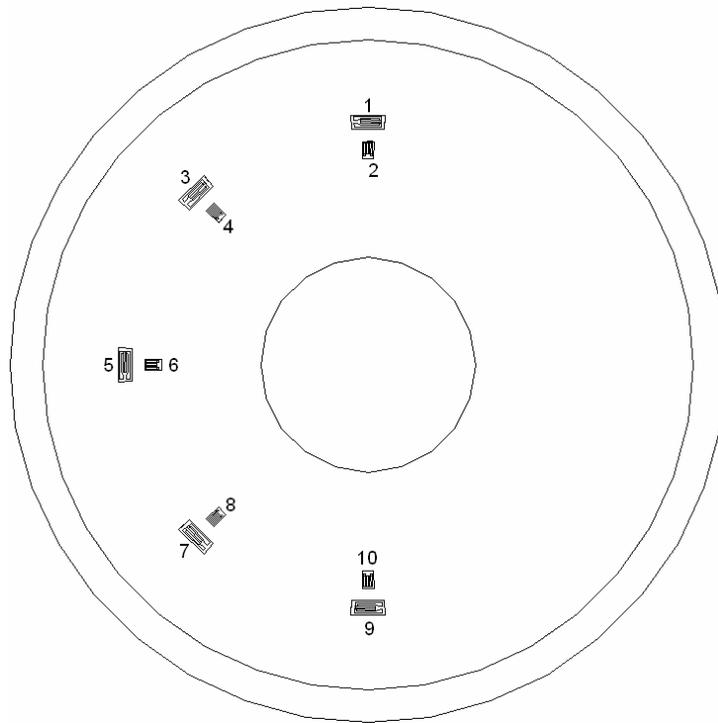


Figura 2.1.7. Diagrama que muestra la forma en que fue instrumentado un tubo de PEAD con 10 galgas.

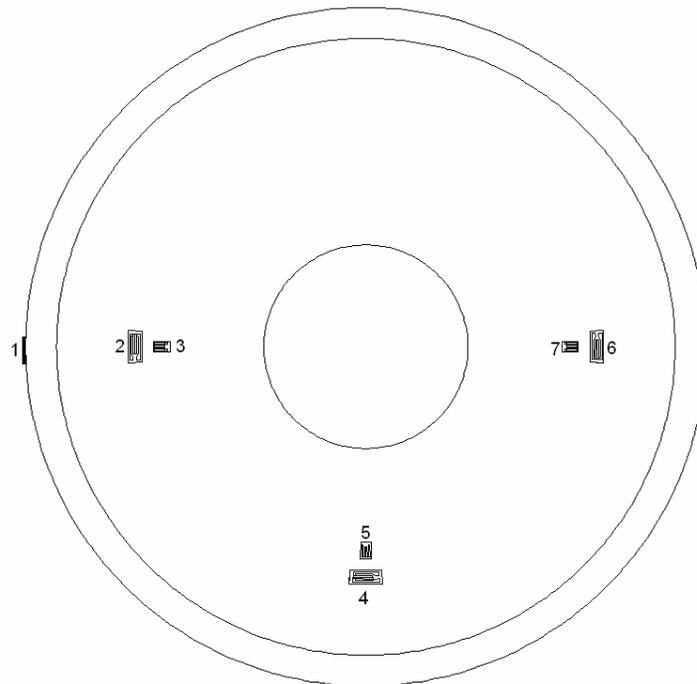


Figura 2.1.8. Diagrama que muestra la forma en que fue instrumentado un tubo de PVC con 7 galgas.

Deformación de la estructura de la pared de un tubo corrugado

Una sección de tubo de PEAD fue instrumentada con 3 extensómetros colocados a lo largo del eje longitudinal del tubo. Uno de los extensómetros fue colocado en la pared interior del tubo más delgada mientras que los otros dos fueron colocados en ambos costados de la cresta central del tramo del tubo en la dirección radial. Cada una de las muestras fueron montadas en un bloque de aluminio al cual le fue maquinada en la superficie superior la misma curvatura que la del diámetro interior del tubo. Así mismo, fue maquinado otro bloque al cual le fue maquina la misma curvatura que el diámetro exterior del tubo. Para realizar la prueba fue colocado cada tramo del tubo entre los dos bloques maquinados y el conjunto fue montado en una máquina universal mediante la cual fue aplicada una carga de aplastamiento al perfil a una rapidez de deformación de 50mm/min.

Estudios de desgaste

Para este estudio se prepararon cuatro muestras de 10 pulg. de diámetro interior, dos de PVC con pared constante y otros dos de PEAD con pared estructurada, cuya longitud fue de 30 cm. Para realizar la prueba [PPI,8], fue diseñado un dispositivo, como el que se muestra en la Figura 2.1.9 que permite sellar ambos extremos del tubo después de haber introducido en él aproximadamente 2 litros de una mezcla de grasas, aceites, sustancias activas al azul de metileno y disolventes orgánicos en una concentración mayor al promedio contenido en aguas residuales generadas en la Cd. De México, Guadalajara y Monterrey. Asimismo, se agregaron a cada tubo 300 gramos de cuarzo. Una vez sellado el tubo fue montado en un torno entre dos contrapuntos y sometido a rotación continua a una velocidad tangencial de 0.9 m/s en un caso durante 2 hrs y en el otro durante 10 hrs habiendo permanecido el tubo con la mezcla previamente durante 12 hrs. para que la disolución estuviera en contacto directo con la pared interior del tubo.

Una vez terminado el tiempo de la prueba se sometieron a compresión libre, en la que se disminuyó el diámetro en 5, 20 y 60%, con la finalidad de verificar la rigidez de las tuberías y posteriormente medir el espesor de la pared remanente.

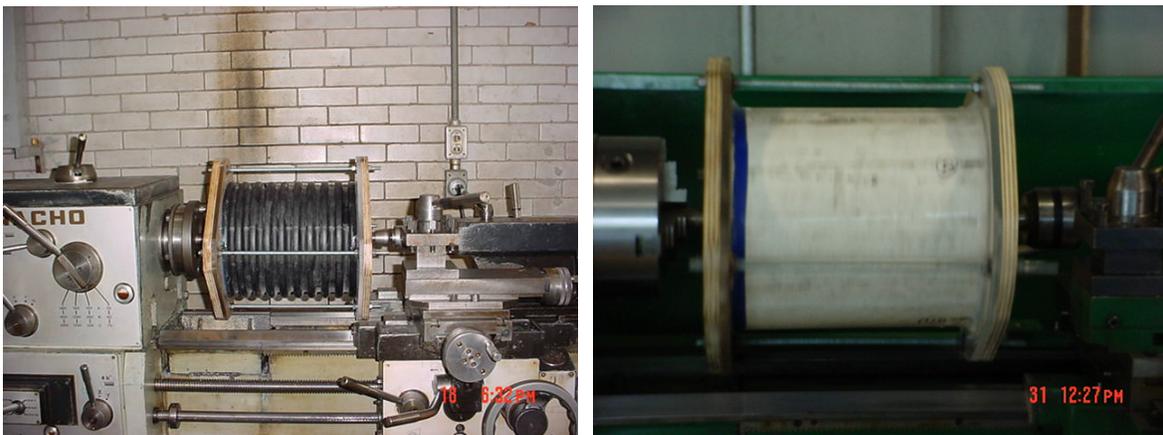


Figura. 2.1.9. Dispositivos utilizados para evaluar la abrasión y ataque químico en tubos corrugados de polietileno de alta densidad y de PVC de pared continua.

2.2 Estudios Teóricos

Análisis de la compresión diametral

Se realizó un análisis de la deflexión de un aro circular que toma la forma de una elipse. El modelo desarrollado considera que el semieje menor de la elipse se obtiene haciendo que el radio del círculo original se deflecte diametralmente en dirección de la vertical. El análisis permitió calcular la deformación circunferencial a lo largo del arco original. En la Figura 2.2.1 se muestra un diagrama del modo de deformación analizado en esta parte del estudio.

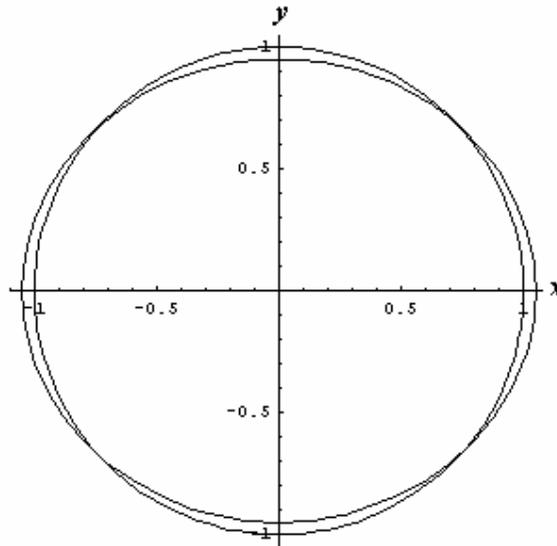


Figura 2.2.1. Diagrama que muestra la forma transformación de círculo a elipse usada en el estudio.

Análisis del momento de inercia de la sección longitudinal del tubo

Se elaboró un modelo que permite calcular el segundo momento de área de la sección tanto constante como de la estructura que presenta el tubo de PEAD corrugado. El modelo quedó expresado en términos de la pared del tubo de tal manera que fue posible calcular el segundo momento de área o momento de inercia en términos de la pared del tubo de pared constante y de la pared interior en el caso del corrugado. En la Figura 2.2.2 se muestra un diagrama que muestra las denominaciones geométricas tanto del tubo de pared constante como del de pared estructurada.

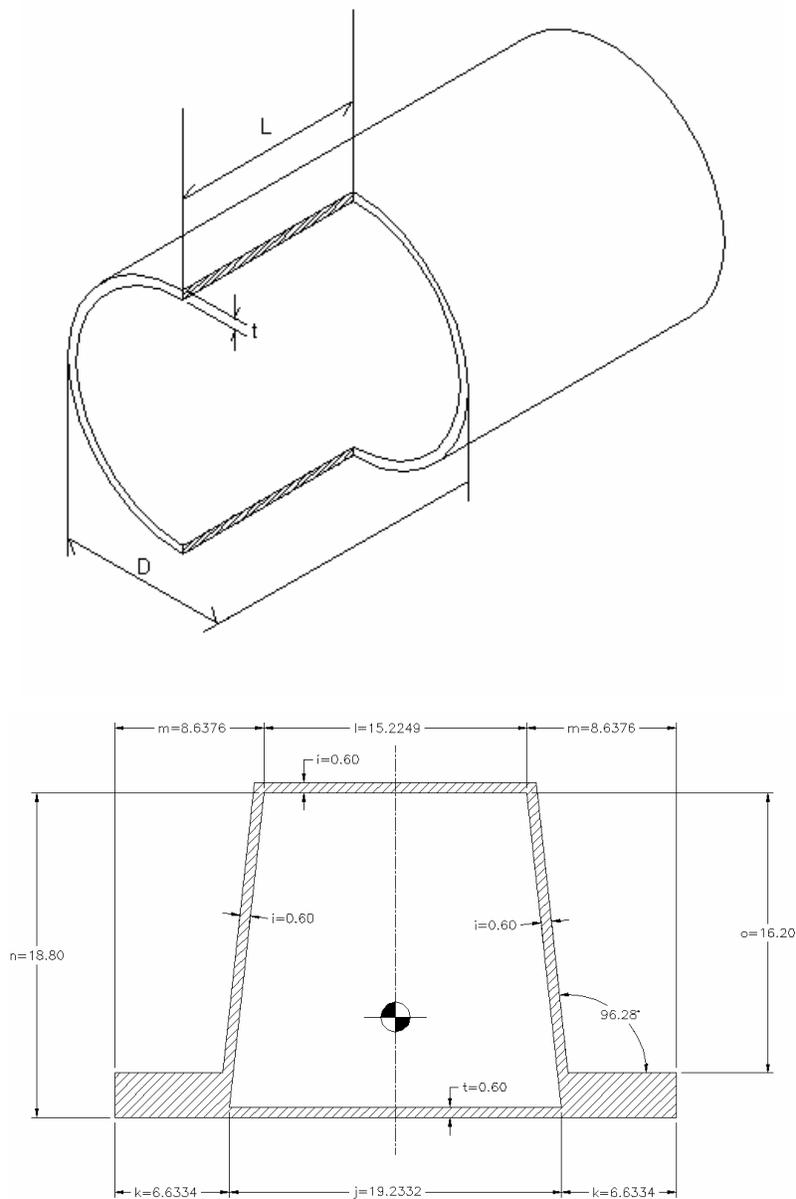
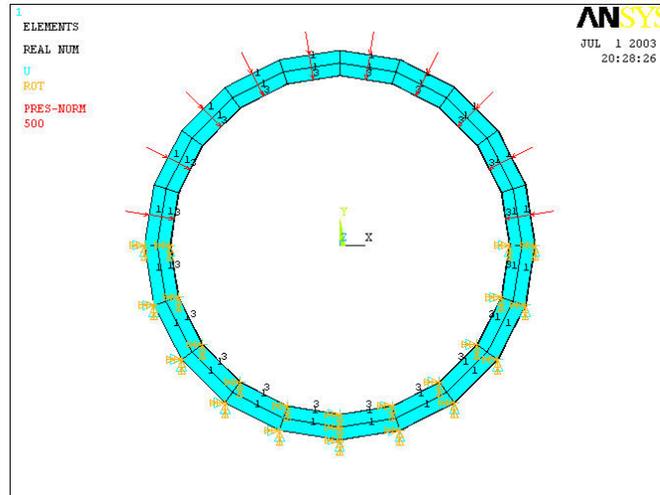


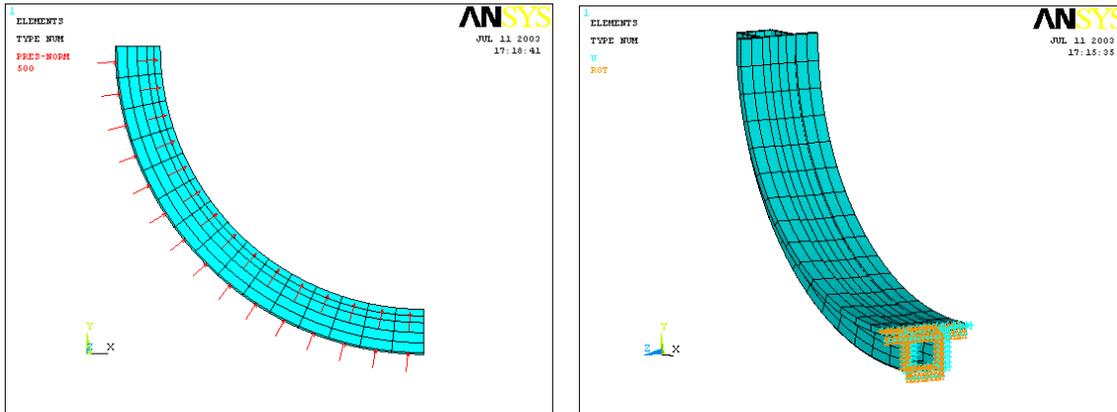
Figura 2.2.2. Diagrama que muestra (a) la geometría del tubo de pared constante y (b) de la pared del tubo corrugado. En análisis realizado se tomo L del tubo de pared constante como a del tubo corrugado.

Estudios numéricos

Fueron elaborados dos modelos numéricos, para un aro circular con cuya pared posee la geometría y las dimensiones del tubo corrugado de PEAD. Los modelos geométricos fueron discretizados empleando 1000 elementos finitos tipo placa. Los modelos fueron sometidos a cargas de presión externa y sujetos a diversas restricciones de desplazamientos como se muestra en la Figura 2.2.3.



(a)



(b)

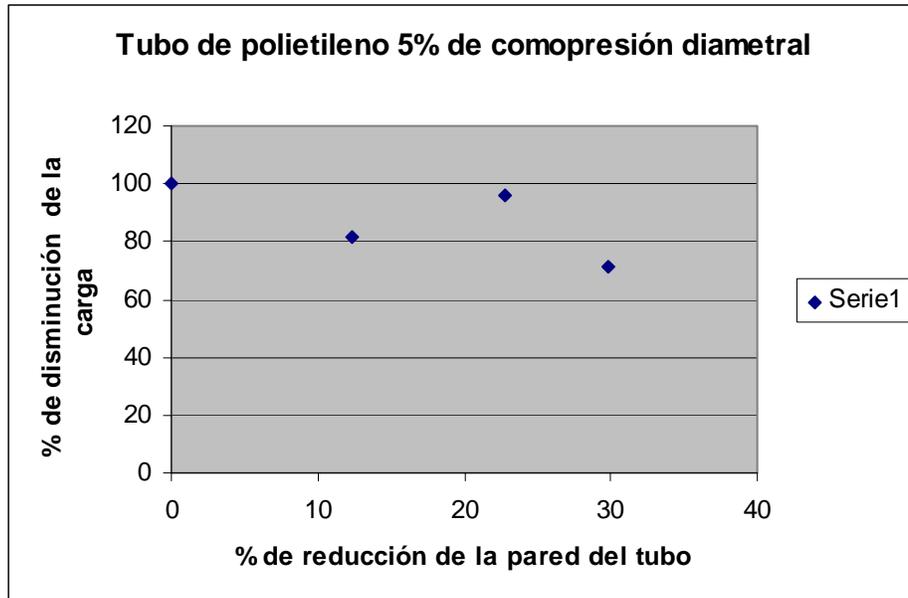
Figura 2.2.3. Condiciones de frontera aplicados a: (a) restricción de la mitad inferior y aplicación de presión constante en la mitad superior y (b) Restricción en una línea longitudinal inferior y presión constante aplicada en el resto del tubo.

3 Resultados y discusión

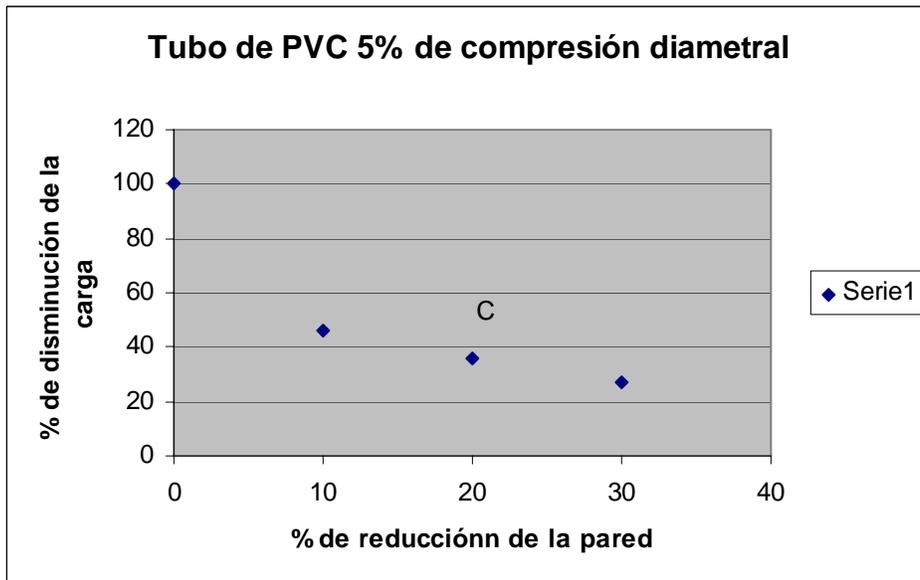
3.1 Tubos desgastados

En la Figura 3.1.1 se muestra dos gráficas donde se muestra la disminución de la carga, requerida para lograr un 5% de compresión diametral, que experimentaron tanto tubos de PEAD como de PVC al reducir el espesor de la pared para el caso.

Así mismo, en la Figura 3.1.2 se muestran las mismas gráficas correspondientes a una compresión diametral de 20%.

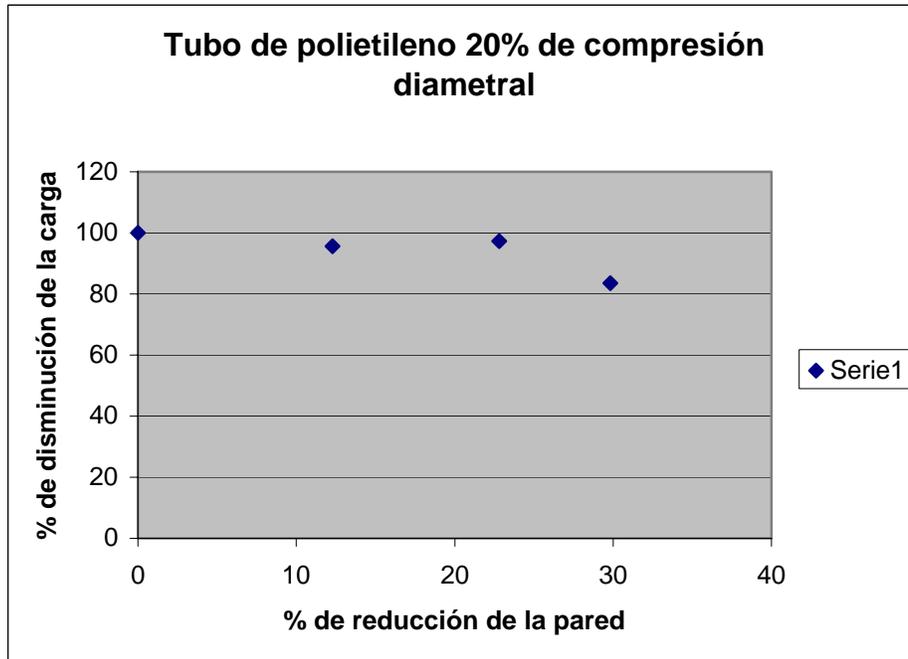


(a)

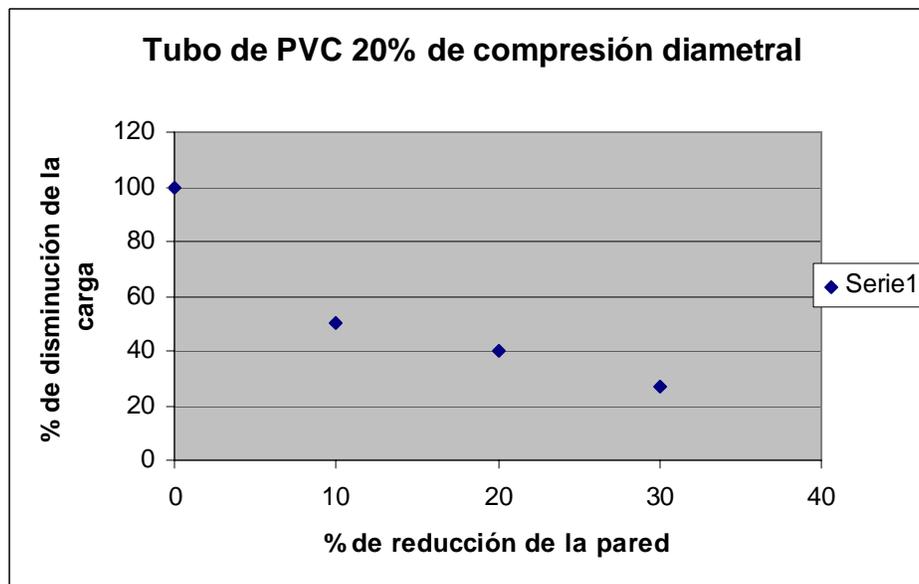


(b)

Figura 3.1.1. Gráfica % de disminución de carga- % de disminución de pared interior correspondiente a una compresión diametral del 5%: (a) tubo de PVC con pared constante y (B) tubo de PEAD con pared estructurada.



(a)



(b)

Figura 3.1.2. Gráfica % de disminución de carga- % de disminución de pared interior correspondiente a una compresión diametral del 5%: (a) tubo de PVC con pared constante y (b) tubo de PEAD con pared estructurada.

Los resultados que presentados en las gráficas anteriores muestran claramente que el tubo de PVC, que posee una pared constante, es mucho más sensible a la disminución de pared interna que en el caso del polietileno.

Como se sabe, la rigidez del aro depende de dos parámetros fundamentales: el módulo elástico del material y la geometría del mismo [Moser,5]. El claro que en el experimento, las propiedades del material se mantuvieron constantes por lo que la variación observada se

asocia a la geometría. Debido a lo anterior, es evidente que la diferencia en el comportamiento entre el tubo de PVC y el de polietileno se origina en las distintas geometrías de la pared de ambos tubos.

Como se mencionó en la sección 1.1 la rigidez de un aro circular esta dada por la expresión:

$$\frac{F}{\Delta} = B \frac{EI}{D^3}$$

Es claro que una disminución del cociente $\frac{I}{D^3}$ provocará una disminución en la carga necesaria para lograr una compresión diametral determinada. Debido a lo anterior es que un análisis de la variación que sufre I al disminuir la pared cada uno de los tubos puede explicar claramente el fenómeno observado.

Considerando los parámetros geométricos definidos en la Figura 2.2.2 se calculó I en términos de la pared del tubo, aplicando la definición matemática del momento de inercia de la sección y empleando el teorema de los ejes paralelos, y se obtuvo para el caso de pared constante:

$$I = \frac{a \cdot t^3}{12} \tag{3.1.1}$$

Así mismo, considerando la sección del tubo corrugado como un área compuesta, I está dado por:

$$A = di + 2oi + 2ki + jt$$

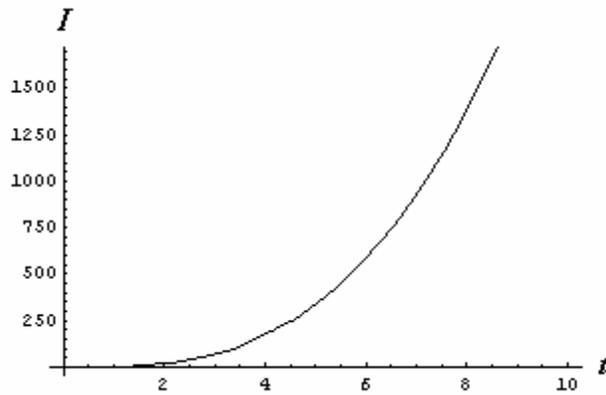
$$\bar{y} = \frac{di\left(f - \frac{i}{2}\right) + 2io\left(h + \frac{o}{2}\right) + 2k\frac{h^2}{2} + j\frac{t^2}{2}}{A}$$

$$I = \frac{di^3}{12} + di\left(\left(f - \frac{i}{2}\right) - \bar{y}\right)^2 + 2\frac{io^3}{12} + 2io\left(\left(h + \frac{o}{2}\right) - \bar{y}\right)^2 + 2\frac{kh^3}{12} + 2kh\left(\frac{h}{2} - \bar{y}\right)^2 + \frac{jt^3}{12} + jt\left(\frac{t}{2} - \bar{y}\right)^2 \tag{3.1.2}$$

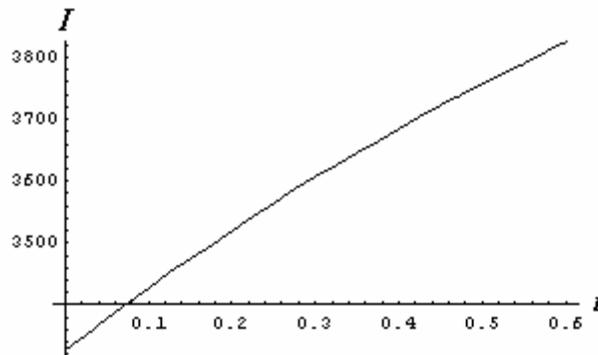
donde: A es el área de la sección y \bar{y} es la coordenada en y del centroide.

En la Figura 3.1.3 se muestran dos gráficas donde se aprecia la forma en que varía I al disminuir la pared del tubo en cada caso y claramente se ve que en el caso de la pared constante la disminución de I es más rápido que en el caso del tubo corrugado. Dicho comportamiento explica claramente la variación en la carga de pandeo observada en los experimentos.

Los resultados obtenidos muestran claramente que la rigidez estructural del tubo de PEAD corrugado es menos sensible al desgaste que uno de sección constante por lo que la resistencia al desgaste es un parámetro más crítico para un tubo de pared constante que para el corrugado.



(a)



(b)

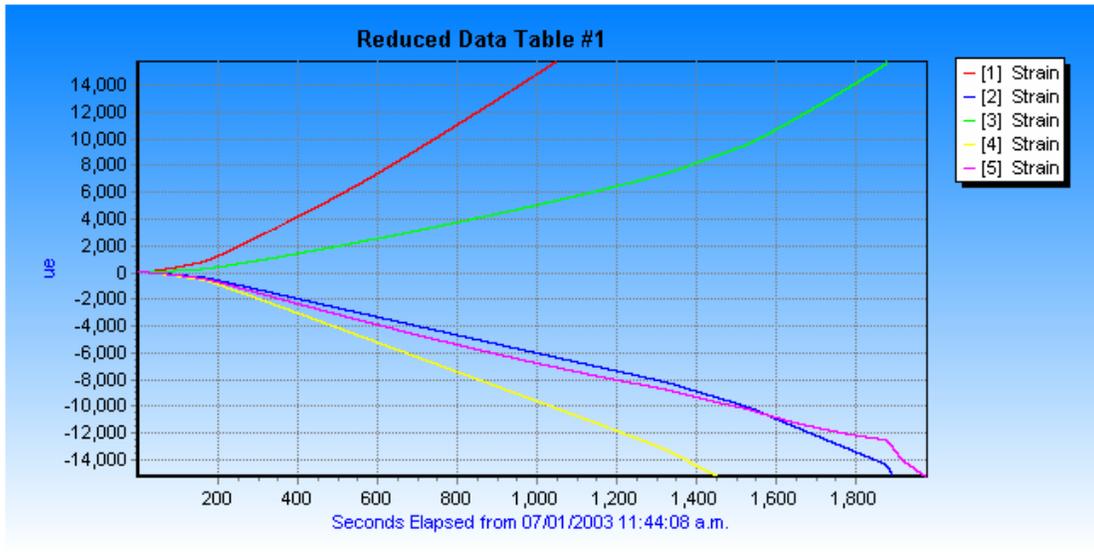
Figura 3.1.3. Gráficas que muestran la disminución de I en función de la pared (a) tubo de pared constante y (b) tubo con pared estructurada.

Por otro lado, los resultados reportados sobre desgaste en tubos de concreto con pared constante, PVC también con pared constante y PEAD corrugado, mostraron que la resistencia del tubo de PVC y el de PEAD son esencialmente equivalentes. No obstante lo anterior, si se considera la discusión anterior, es claro que las exigencias de resistencia al desgaste deben ser mayores para un tubo con pared constante que para uno de pared con estructura, como es el caso del PEAD.

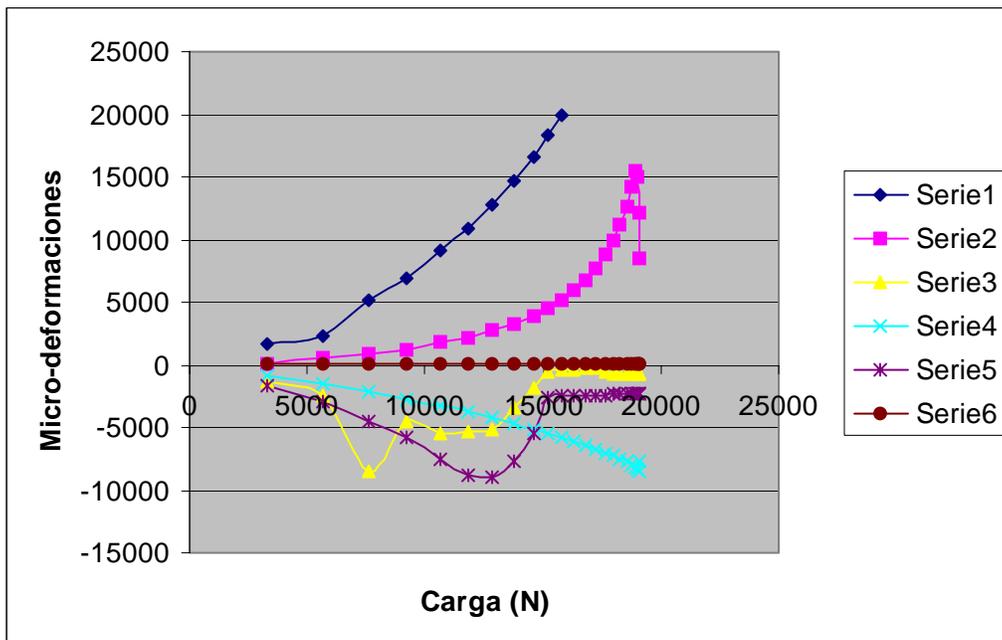
3.2 Compresión diametral libre

Por otro lado en la Figura 3.2.1 se muestra una gráfica que aprecia la variación de la deformación que presentaron cada uno de los extensómetros colocados en las muestras PSL5 y PSL36E. Claramente se aprecia en ambos casos, tanto para el tubo de 10 como el de 36 pulg. de diámetro interior, que los extensómetros que presentaron deformación en tensión fueron los que se encuentran colocados en la cresta del tubo, en la parte externa, mientras que los que fueron colocados en la parte interna y el que se colocó en la parte externa pero en el valle. Es claro también que los extensómetros que sufrieron mayor deformación, y por tanto los que se encuentran sujetos a mayores esfuerzos, fueron los

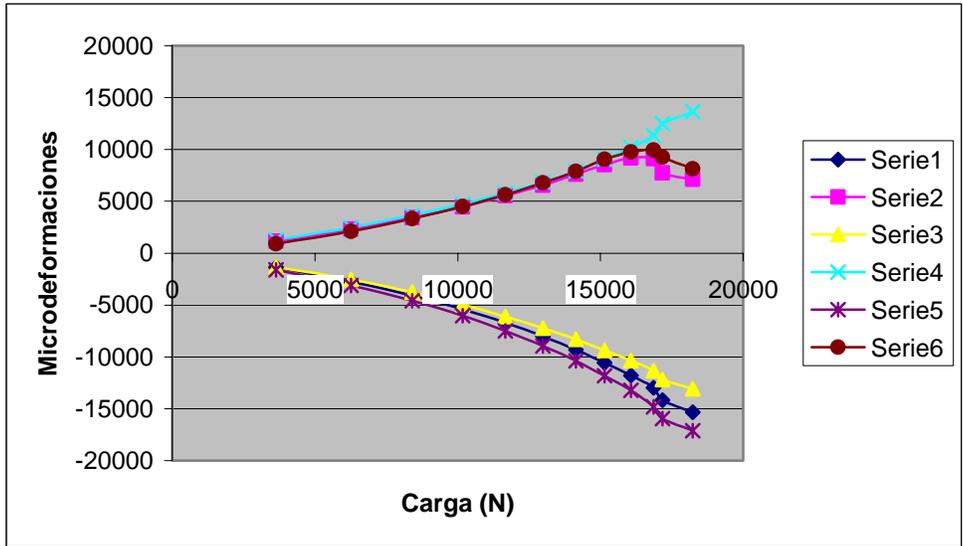
colocados en la cresta del tubo lo que indica que si existen factores que alteren el estado de esfuerzos en el tubo, de ocurrir alguna falla del material será en dicha región y no en la parte interna. La distribución de deformaciones observada es consistente con la prevista en la literatura para un aprueba de compresión diametral [14]. Así mismo en la gráfica de la Figura 3.2.1© muestra la distribución de las deformaciones observada en el tubo de PEAD tipo D, que fue instrumentado con 3 extensómetros en la pared interior y 2 en la pared exterior alrededor de la región identificada como las 9. Claramente se observa en dicha gráfica que la distribución de deformaciones a través de la pared del tubo es simétrica debido a que en este caso la estructura de la pared también lo es.



(a)



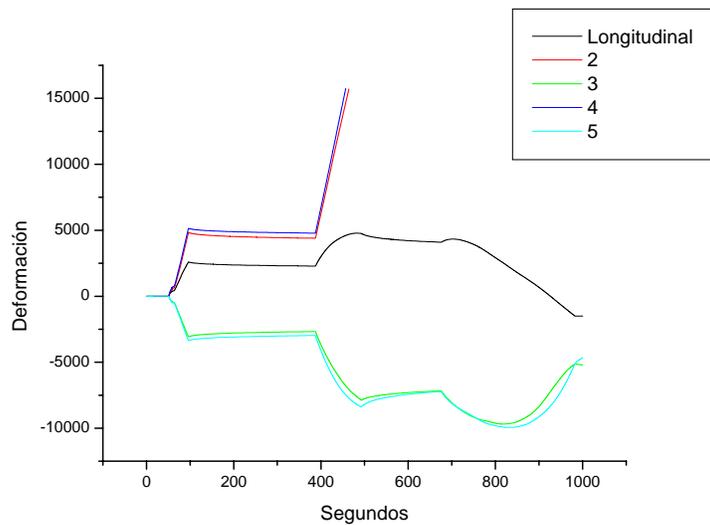
(b)



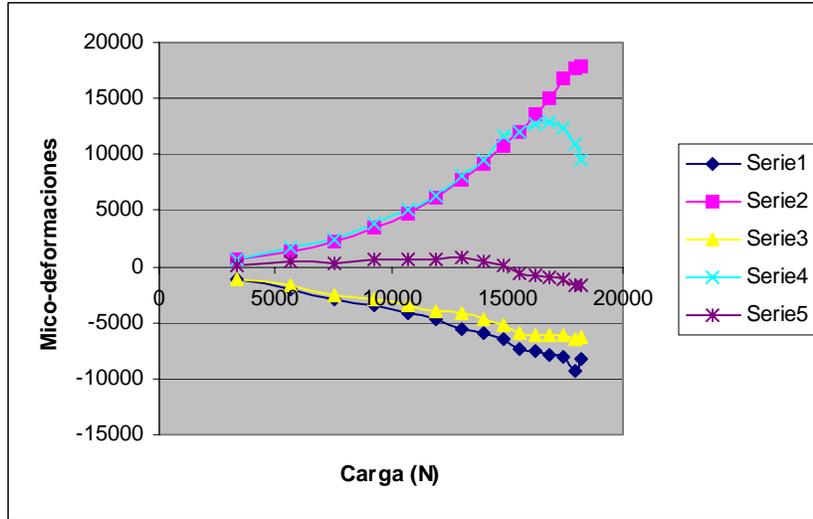
©

Figura 3.2.1. Gráficas que muestran las deformaciones que presentaron cada uno de los 5 extensómetros colocados en las muestras (a) PSL5, (b) PCL36E y (c) PCL60E.

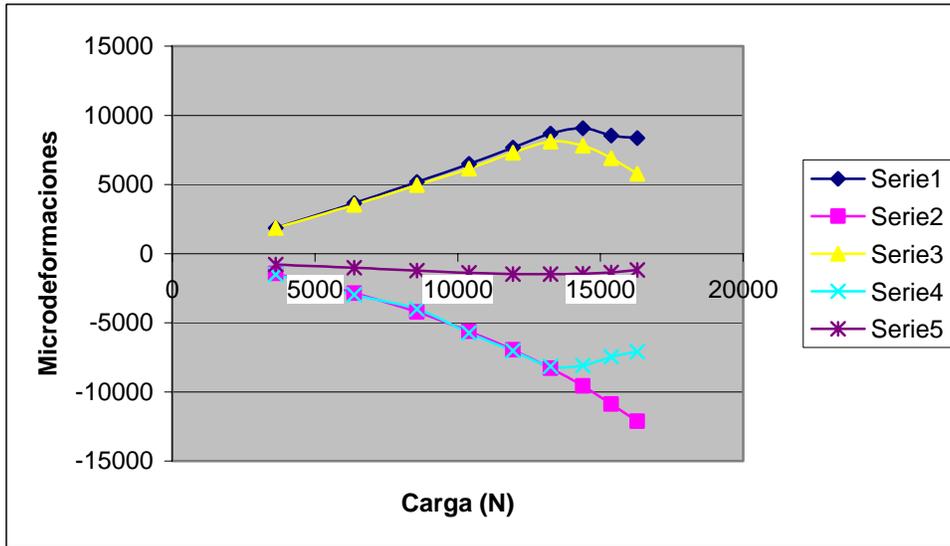
Por otro lado, en Figura 3.2.2 se muestra una gráfica en la que se muestra la deformación que presentaron los extensómetros colocados en las muestras las muestras PSL52, PSL36S y PSL60S. En la Figura 3.2.2(a) se ve claramente que la deformación que presentaron los extensómetros 2 y 4, así como la que presenta el 3 y 5 son prácticamente la misma en cada caso, así mismo en la Figura 3.2.2(b) y (c) ocurre con los extensómetros 1 - 3, 2 - 4. Es importante destacar que la magnitud de la deformación en todos los casos es directamente proporcional al porcentaje de compresión diametral del tubo y que dicha condición persiste hasta aproximadamente el 10%.



(a)



(b)



©

Figura 3.2.2. Gráficas que muestran la variación de la deformación que sufrieron los extensómetros colocados a las muestras: (a) PSL52, (b) PSL36S y (c) PSL60S.

Los resultados obtenidos en esta parte de las pruebas pueden ser explicados realizando un análisis de la deformación perimetral que sufre un aro circular que se transforma en una elipse cuyos semiejes menores (a) y menor (b) varían según la relación:

$$a = r(1 - s)$$

$$b = r(1 + s)$$

donde s el porcentaje de compresión diametral que sufre el aro durante la carga.

La deformación circunferencial que sufre el arco original puede ser calculada comparando la longitud inicial de un segmento de arco con la longitud final del mismo, es decir:

$$e_c = \frac{L_f - L_i}{L_i} \quad (3.2.1)$$

$$L_i = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{x(t)^2 + y(t)^2} dt$$

$$L_i = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{\bar{x}(t)^2 + \bar{y}(t)^2} dt$$

$$t_1 = t_0 - k$$

$$t_2 = t_0 + k$$

donde: $x(t)$ e $y(t)$ son las ecuaciones paramétricas del círculo, $\bar{x}(t)$ e $\bar{y}(t)$ las de la elipse.

En la Figura 3.2.3 se muestra una gráfica en la que se muestra la variación de la deformación circunferencial en función de t_0 donde se ve claramente que la deformación máxima y mínima ocurre en $t_0 = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2}$, que corresponden con los puntos donde fueron colocados los extensómetros en las muestras PSL52 y PSL36S. Por otro lado en la Figura 3.2.4 se muestra una gráfica en la que se aprecia la relación existente entre s y la deformación máxima y claramente se ve que en límite, cuando $k \rightarrow 0$, es decir, cuando la magnitud del arco tiende a ser muy pequeño $e \rightarrow A s$ donde A es una constante que según las pruebas que realizamos es aproximadamente 1.

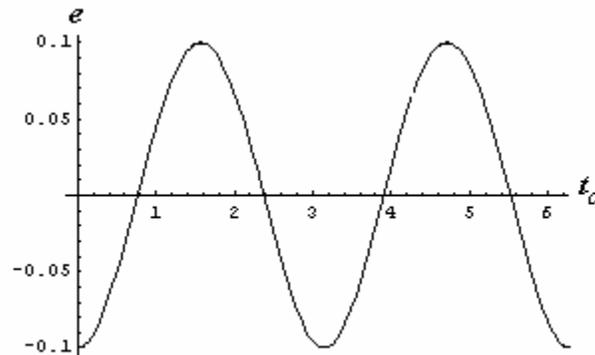


Figura 3.2.3. Gráfica que muestra la variación de la deformación circunferencial al variar t_0 .

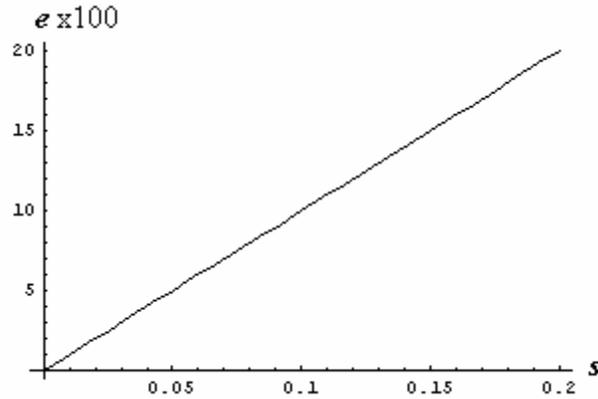


Figura 3.2.4. Gráfica que muestra la relación entre la deformación circunferencial ϵ y el porcentaje de compresión diametral (s).

En la Tabla 2 se muestra un listado donde se presenta la compresión vertical y la expansión horizontal que experimentaron las muestras PS11, PS12, PS13, PS4 y PS15 al ser sujetas a una compresión diametral de hasta aproximadamente un 60 % del diámetro interior. En la tercera columna, donde se presenta una comparación entre la compresión vertical y la horizontal, se ve claramente que para la compresión vertical menor o igual al 20% aproximadamente, la diferencia entre ésta y la expansión horizontal es moderada mientras que para el caso de alrededor de 60% la dispersión es de más del doble, e incluso la elipse esperada se ve prácticamente degenerada. Los resultados obtenidos revelan claramente que la relación geométrica obtenida analíticamente al comparar el aro circular con la elipse se cumple solo para valores de compresión diametral de alrededor de 20% lo cual difiere un tanto de lo reportado en la literatura que establece que se cumple para valores menores de 10% [Moser,5].

Tabla 2. Compresión vertical y expansión horizontal que sufrieron las muestras PS11, PS12, PS13, PS14, PS15

Muestra	Diámetro interno original (mm)	% de compresión diametral	% de expansión horizontal	% de compresión diametral
				% de expansión Horizontal
PS11	248	3.024	3.38	0.89
		17.05	12.74	1.33
		-	-	-
PS12	248.6	3.45	4.58	0.75
		17.53	14.64	1.19
		63.79	33.54	1.9

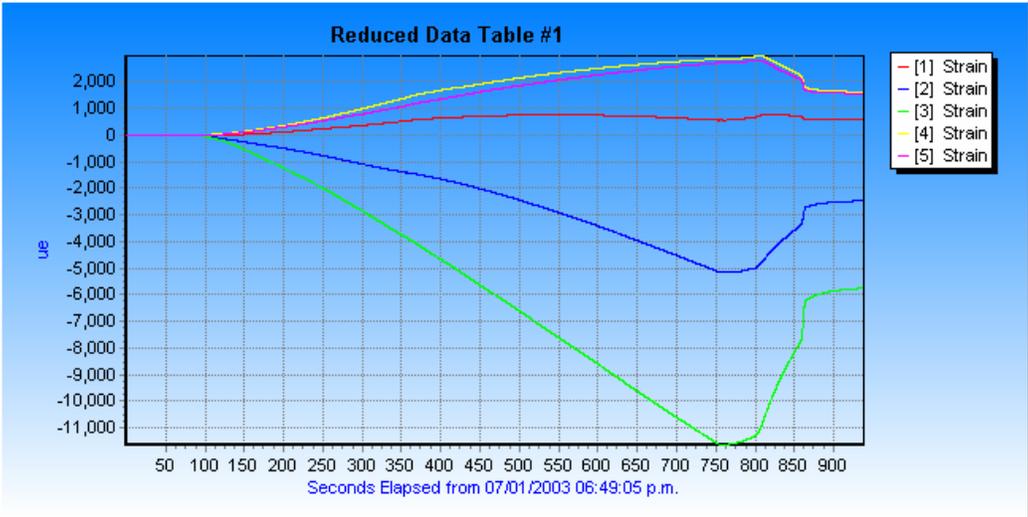
PS13	250	2.64	2.88	0.91
		16.88	13.76	1.22
		58	40	1.22
PS14	254	3.34	2.75	1.28
		18.5	14.96	1.23
		60.94	39.37	1.54
PS15	255.5	4.11	2.93	1.4
		18.59	13.5	1.37
		62.81	37.37	1.68
PSL36E		4.99	3.56	1.4
		19.97	13.53	1.47
		36.8	24.82	1.48
PSL36S		5.0	3.38	1.48
		20	13.23	1.51
		24.3	14.76	1.64

Debido a lo anterior, se puede establecer que la prueba de compresión diametral permite evaluar tanto la rigidez del aro como, en el caso del 5% de compresión diametral, como la mínima recuperabilidad elástica que se exige a un material polimérico como lo son el PVC o el PEAD cuando la prueba llega al 20%. Por otro lado consideramos que llevar la prueba hasta un 60% de compresión diametral no brinda información que pueda ser cuantificada ya que se pierde la correlación entre la deformación circunferencial máxima que se presenta en la pared interior del tubo y la compresión diametral.

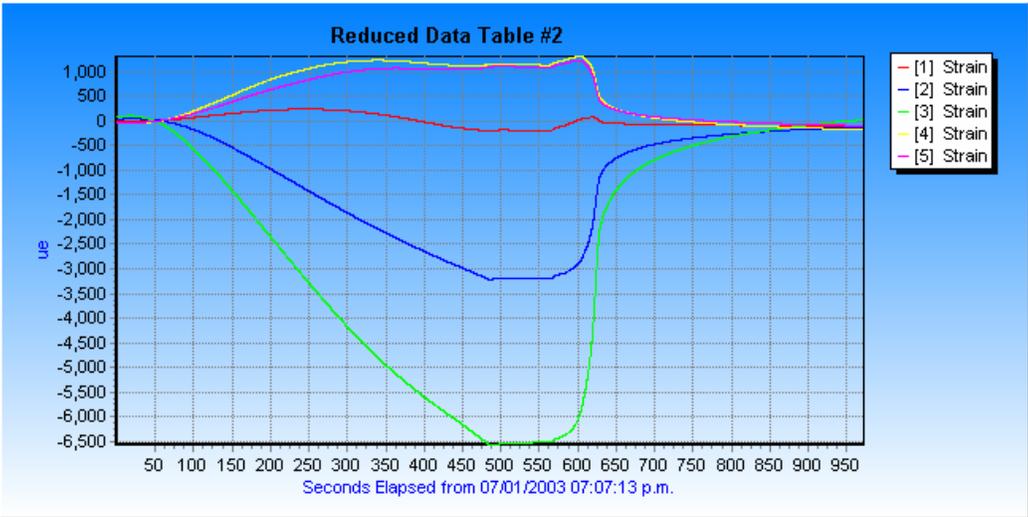
3.3 Compresión transmitida a tubos confinados.

En la Figura 3.3.1 se presentan dos gráficas que muestran la variación que sufrió cada uno de los extensómetros colocados a la muestra PSC1 durante la aplicación de una carga viva que alcanzó un valor de 2500 Kg. Es claro que las deformaciones cambiaron considerablemente respecto a las observadas en el caso de compresión diametral. Claramente se ve en la gráfica, que los extensómetros colocados en la cresta presentaron

ahora deformaciones de compresión mientras que los otros fue de tensión lo cual indica que para esta condición de carga el estado de esfuerzos es considerablemente diferente. No obstante es claro en las gráficas que nuevamente las mayores deformaciones ocurrieron en la parte de las crestas del tubo, las cuales fueron de compresión.



(a)



(b)

Figura 3.3.1. Gráficas que muestran la deformación que presentaron cada uno de los extensómetros colocados a la muestra PSC1. (a) primera aplicación de carga y descarga (b) segundo ciclo de carga.

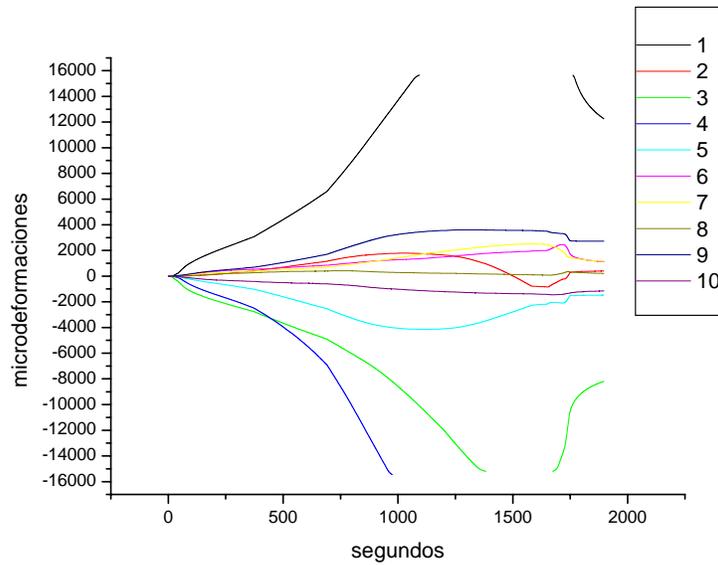
En la Figura 3.3.2 se muestra una fotografía que muestra el cambio geométrico que sufrió la muestra PSC1 cuando tenía aplicada la carga de 2500 Kg. Es claro que la forma no corresponde con un círculo o una elipse como en el caso de las pruebas en compresión diametral. Lo anterior es un indicativo importante de que el estado de esfuerzos en el tubo enterrado difiere considerablemente del que se presenta en el caso de compresión diametral.



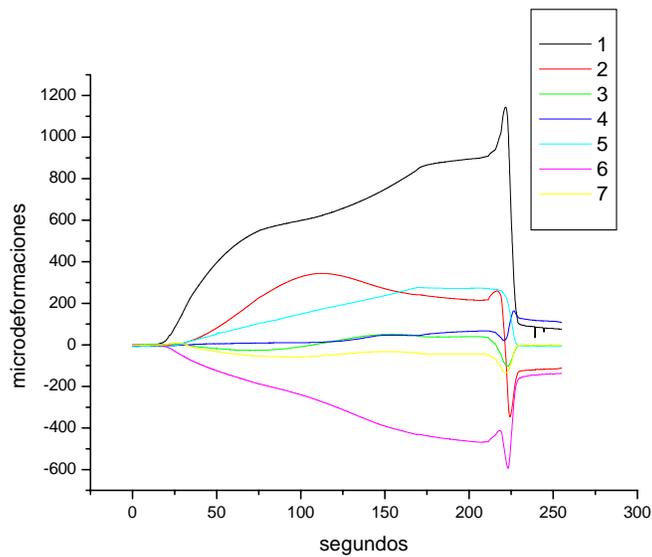
Figura 3.3.2. Fotografía tomada cuando la muestra PSC1 se encontraba soportando la carga máxima aplicada.

Por otro lado, es importante destacar que en la gráfica de la Figura 3.3.1(a), que corresponde con una primera carga y descarga, se aprecia que se presentó cierta deformación que parece ser permanente mientras que en la gráfica de la Figura 3.3.1(b), correspondiente a un segundo ciclo de carga y descarga, la deformación fue totalmente recuperada. Lo anterior indica claramente que el tubo se encuentra trabajando elásticamente.

En la Figura 3.3.3, se presenta un conjunto de gráficas que muestran la deformación que presentaron cada uno de los extensómetros colocados a la muestra PSC10, así como las correspondientes a la muestra PVC7. Es claro que en la distribución de deformaciones circunferenciales es compleja lo cual es debido a la forma en que el suelo transmite la carga al tubo. Es particularmente importante destacar que en ambos casos, se presentan deformaciones longitudinales que no pueden ser asociadas al efecto de Poisson, las cuales aunque en general son pequeñas indican que muy probablemente se presentan algunas componentes de flexión asociadas a una transmisión de carga no uniforme a lo largo del eje del tubo. Obsérvese en la Figura 3.3.3(a) los valores de las deformaciones correspondientes a los extensómetros 2, 4, 6, 8, 10 y en la Figura 3.3.3 (b) las deformaciones correspondientes a los extensómetros 3, 5 y 7.



(a)



(b)

Figura 3.3.3 Gráficas que muestran las deformaciones que sufrieron cada uno de los extensómetros colocados en las muestras: (a) PSC10 y (b) PVC7.

Cabe mencionar que el confinamiento del tubo fue pobre y la profundidad del mismo fue pequeña por lo que la transmisión de carga viva muy grande, como lo predice la teoría. Dicha condición es importante porque permite llevar el tubo a condiciones extremas donde las deformaciones son un tanto exageradas. Esta condición permite evaluar las deformaciones, y los esfuerzos, más críticos que pueden presentarse pero no debe tomarse como una condición en la cual trabajará el tubo.

Cabe mencionar que el estado de distribución de deformaciones que prevé un cambio geométrico en el que la circunferencia interior cambie por una elipse, como es el caso de la fórmula de Iowa, donde obviamente la expansión horizontal sea menor que la deflexión vertical sería completamente diferente al que se observó. Asimismo, la distribución de deformaciones que se presentaría si existe una flexión vertical acompañada de una contracción horizontal, como ha sido también observado en tubos donde el porcentaje de compactación de la tierra mayor al 80% en la escala proctor, cambiaría considerablemente. La distribución de deformaciones tangenciales para ambos casos pueden ser calculadas empleando la ecuación 3.21 y se muestra en la siguiente Figura 3.3.3'

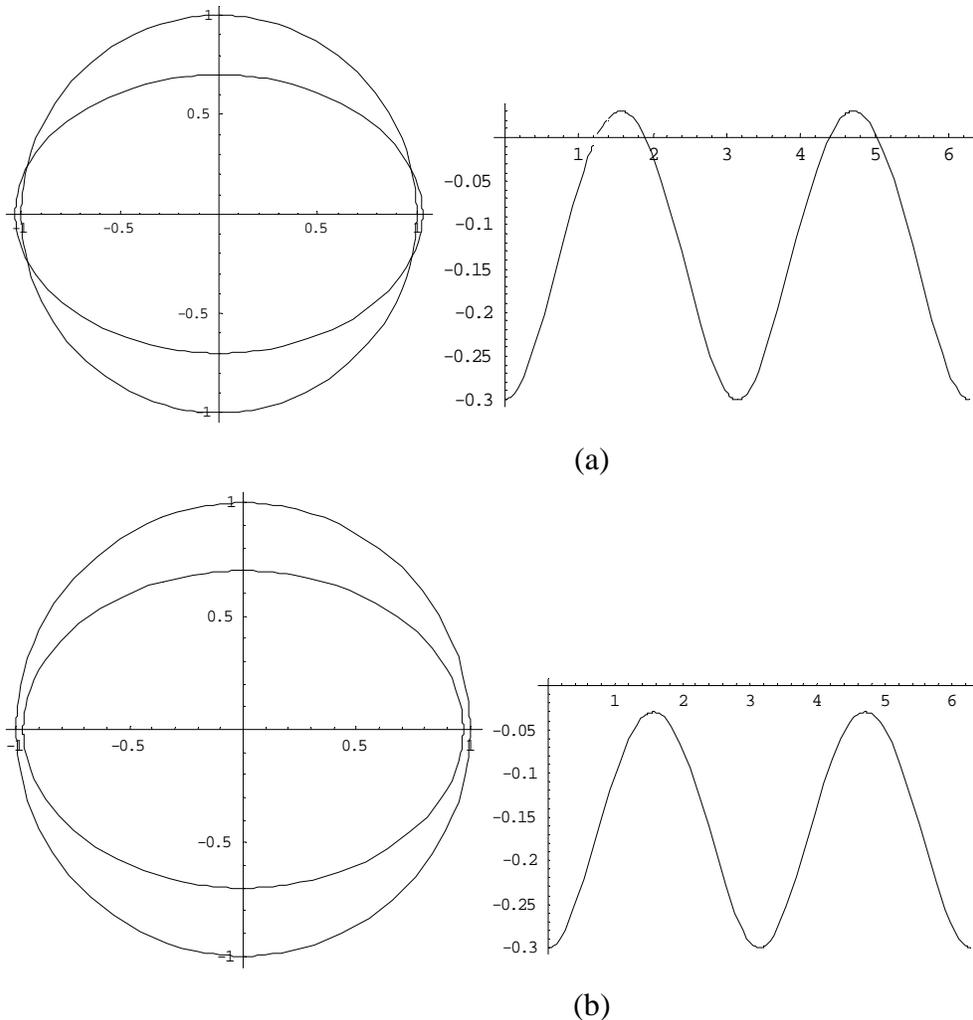
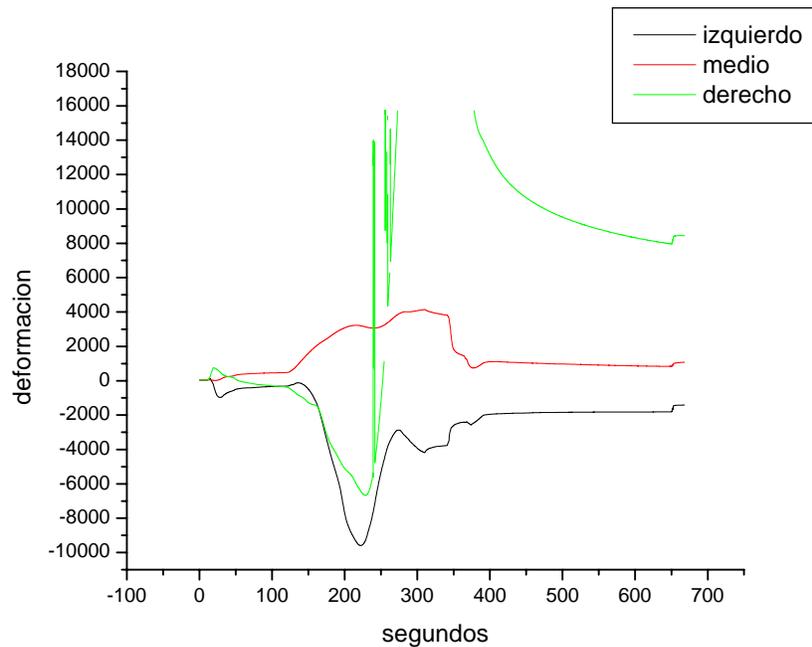


Figura 3.3.3'. Distribución de deformaciones calcula empleando la ecuación 3.21 para: a) Un caso de deflexión vertical y expansión horizontal de 10% la deflexión vertical y b) Un caso en el que la el aro sufre deflexión vertical y contracción horizontal de 10% la deflexión vertical. Las gráficas corresponden con un 3% de deflexión vertical.

Es claro que en ambos casos la ecuación 3.21 predice una variación periódica de la deformación tangencial sin embargo en el caso graficado en (a) se presentan deformaciones en tensión en $t_0 = \pi/2$ y $3\pi/2$ mientras que en (b) aunque varía la deformación siempre es de compresión. Estos resultados divergen de los observados en las pruebas realizadas a los tubos confinados pero son de esperarse debido al cambio geométrico que presento el

diámetro interior del tubo. En realidad, consideramos que dicha relación debe ser estudiada con mayor detalle ya que representa una alternativa importante para evaluar la eficiencia con la que trabajará un tubo al estar confinado. En particular un cambio geométrico similar al presentado en (b) fue encontrado por Moser [5] en el caso de un tubo que soportó confinamiento a gran profundidad. Así mismo, el caso (a) es aproximado al que supone Iowa.

Por otro lado, considerando que el aplastamiento de la pared corrugada del tubo de PEAD estudiado puede favorecer la aparición de esfuerzos axiales se realizaron pruebas de aplastamiento del perfil. Los resultados obtenidos en dichas pruebas se muestran en la Figura 3.3.4. Dichos resultados indican que efectivamente en este tipo de tuberías pueden ser inducidos esfuerzos axiales por el efecto de aplastamiento de la pared debida a la presión externa sin embargo no fueron son de gran magnitud. Cabe mencionar que las gráficas de la Figura 3.3.4 muestran claramente de las deformaciones alcanzadas no superan el 20% a pesar de que la estructura de la pared fue prácticamente destruida.



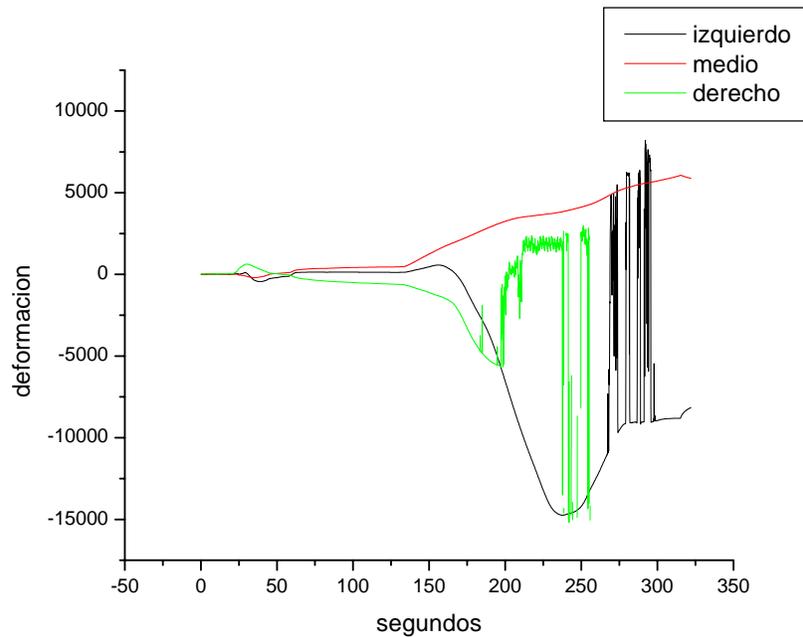
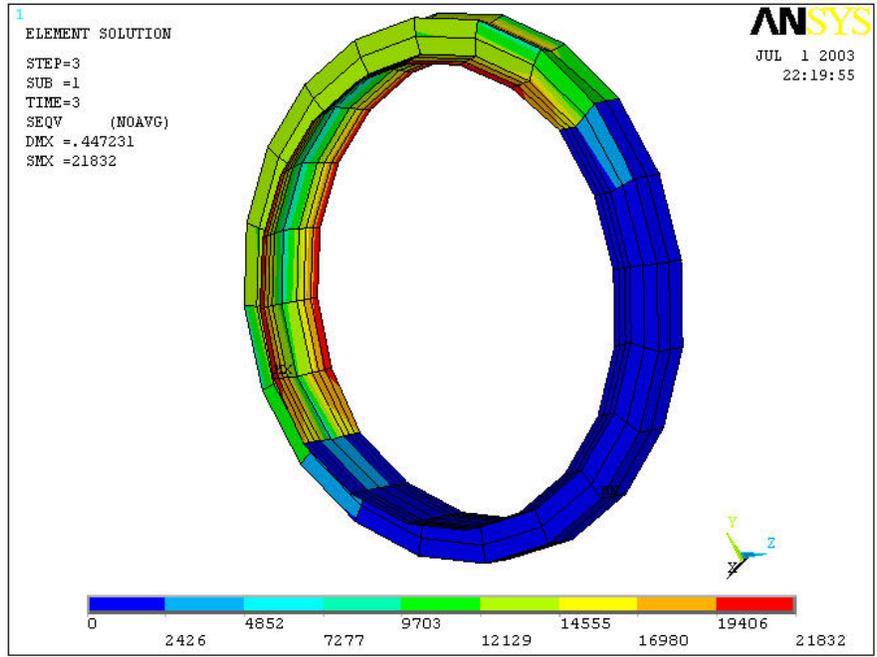


Figura 3.3.4. Gráficas que muestran la deformación experimentalada por los extensómetros que fueron colocados a las muestras: (a) PP1 y (b) PP2.

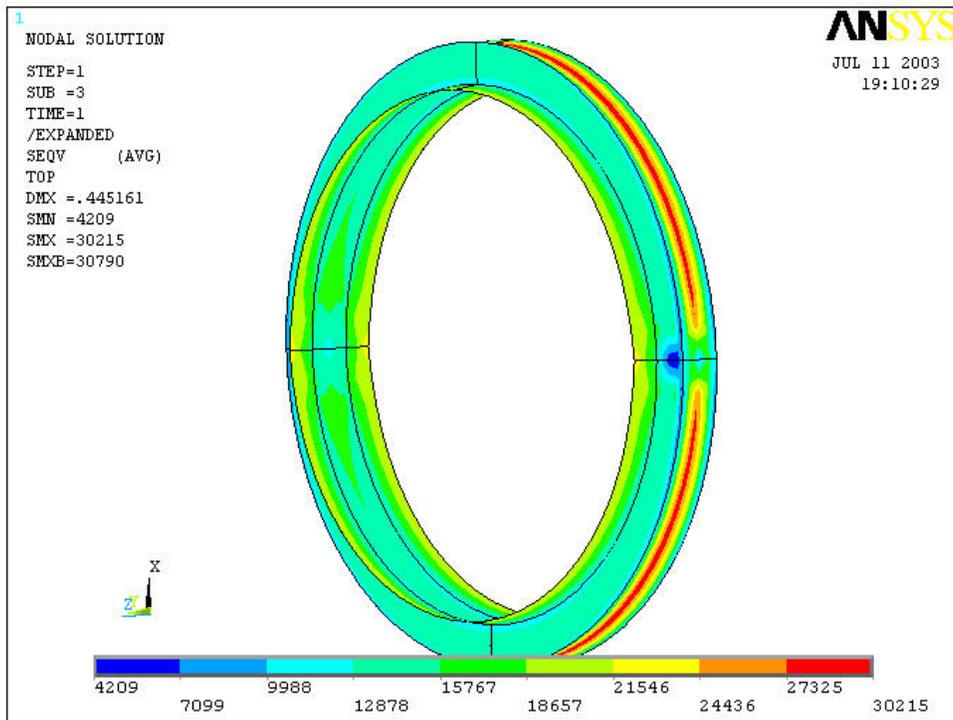
Es claro en la Figura 3.3.4 que las deformaciones más importantes fueron presentadas en los extensómetros colocados lateralmente en la cresta, lo que indica que el aplastamiento de la pared estructurada induce esfuerzos radiales considerablemente más importantes en magnitud que los axiales.

Por otro lado, considerando la discusión presentada en el apartado 1.1 del presente estudio y los resultados obtenidos, es claro que el tubo enterrado se encuentra sujeto a una presión externa que no es uniforme. Predecir el estado de esfuerzos bajo dichas condiciones, como fue mencionado anteriormente, es una tarea compleja que requiere una modelación conveniente de la distribución de la presión externa real que actúa sobre el tubo.

En referencia a lo anterior, en el presente estudio fueron realizados dos análisis por elemento finito a un aro circular que posee la estructura que presentan los tubos de PEAD. En dichos análisis fueron impuestas dos condiciones de frontera (hipotéticas) diferentes que fueron presentadas en la Figura 2.2.3 de la sección anterior. La primera condición de frontera fue definida suponiendo que el aro se encuentra imposibilitado para desplazarse en la mitad inferior del arco y que soporta en la mitad superior una presión constante. La segunda condición de frontera, fue establecida como una restricción de desplazamiento vertical en una línea axial localizada en la parte inferior del tubo y sujeto a una presión externa constante. En la Figura 3.3.5 se presentan dos gráficas que se obtuvieron como resultado del análisis mencionado mostrando la distribución de esfuerzos efectivos correspondientes a cada caso y claramente se observa que en ambos casos los máximos esfuerzos se ubican en la cresta exterior del tubo, aunque en el primer caso también se observan en el valle. Cabe mencionar que los valores de presión aplicada fueron exagerados a fin de evidenciar los sitios de mayor concentración de esfuerzos.



(a)



(b)

Figura 3.3.5. Gráficas que muestran la distribución de los esfuerzos efectivos obtenidos, mediante un análisis por elemento finito con las condiciones de frontera, descritos en la Figura 2.2.3. Con las condiciones de frontera: (a) restricción de la mitad inferior (b) Con la línea inferior restringida.

Es claro que las condiciones de frontera impuestas en los estudios numéricos realizados pueden no corresponder con las que presentan en un tubo real sin embargo se muestran algunos aspectos importantes como lo son: la presencia de esfuerzos axiales y que los esfuerzos máximos ocurren en la pared exterior del tubo. Lo anterior es importante por que constituye una evidencia de que en el tubo de PEAD la pared interior, no soporta los esfuerzos mayores por lo que no hay razón para pensar que deba ser incrementada su espesor.

Es claro que para un tubo, sea de pared constante o con pared estructurada, funcione adecuadamente desde el punto de vista mecánico, el confinamiento del tubo debe ser el adecuado. Obviamente, considerar adecuado el confinamiento requiere contar con un modelo matemático confiable que permita estimar la presión externa que el confinamiento genere sobre el tubo. Dicho modelo puede ser desarrollado por cada fabricante o bien tomar alguno disponible en la literatura plenamente validado. Es por ello que estamos de acuerdo en que se deben seguir las recomendaciones sobre el procedimiento de instalación que establezca un fabricante en especial. Evaluar la conveniencia del modelo matemático empleado por cada fabricante para calcular la presión sobre el tubo es una práctica que se recomienda, sin embargo el no cumplimiento de sus recomendaciones puede ser considerado como un error del usuario.

Cabe mencionar que ha sido reportado por Moser un estudio en el cual fue analizado el efecto de la compactación de la tierra sobre la compresión diametral y el pandeo local que presentan tubos de PEAD con pared estructura, similares a los estudiados en el presente trabajo. En su estudio, Moser[5] encontró que una compactación de la tierra de alrededor de 96.5 en la escala Próctor es el más adecuado. Así mismo, en los estudios realizados para elaborar el reporte 429 de la NCHRP [Hsuan,10] se menciona claramente que una instalación no adecuada puede inducir la presencia de esfuerzos axiales en la pared interna los cuales promueven las fallas típicas en tubos de PEAD corrugados.

Cabe destacar que en los tubos ensayados en esta parte del estudio, no fueron apreciadas a simple vista agrietamientos ni antes de realizar las pruebas ni posterior a ello por lo que el comportamiento observado podría cambiar considerablemente si dicha condición estuviera presente. Obviamente dicha condición debe ser prevista, ya que puede ser el caso en que existieran grietas que no son percibidas a simple vista o bien que se generara durante el servicio por algún cuerpo extraño, debe tenerse en cuenta que éstas actuarían como concentradores de esfuerzos y entonces aun cuando los esfuerzos fueran pequeños estos se incrementarían considerablemente.

Es claro que la prevención de fallas en el material depende fuertemente de dos aspectos: la intensidad el esfuerzo aplicado y el comportamiento mecánico del material. Como se mencionó anteriormente, el PEAD puede presentar una transición de dúctil a frágil, inducido principalmente por el incremento de temperatura, por lo que las pruebas que se practiquen para prevenir las fallas deben considerar ambos aspectos. En este sentido estamos de acuerdo en que se debe tener la seguridad de que la materia prima, con la cual serán fabricados los tubos, debe presentar buena resistencia al crecimiento de grietas sin embargo, coincidimos con diversos autores en que durante el proceso las propiedades mecánicas del material pueden haber sufrido alteraciones que induzcan la transición mencionada [Hsuan,10].

Así mismo, coincidimos con diversos autores en el sentido en que consideramos que para un tubo que no estará sujeto a presión interna la prueba HDB no modela ningún estadio del estado de esfuerzos del tubo en condición de servicio o instalación y que definitivamente la ESCR no es una prueba confiable [Hsuan,10 y Moser,5]. No obstante consideramos que es conveniente aplicar una prueba rápida para evaluar el crecimiento lento de grieta a muestras procedentes de los tubos. Una revisión de las normas internacionales muestra que existe una prueba diseñada específicamente para PEAD que puede aplicar tanto para materia prima como para el tubo la cual consideramos que sería conveniente aplicar. Dicha norma es denominada NCLS y es identificada como ASTM F2136. Lo anterior es debido a que no estamos convencidos de que la prueba NCTL sea la más conveniente ya que es una prueba originalmente diseñada para otro tipo de aplicación y ha sido adaptada para sólo a la materia prima de PEAD como lo muestran los trabajos realizados al respecto [Hsuan,10 y Hsuan,11].

Cabe destacar que consideramos que un tubo que trabaja por gravedad tiene muy pocas posibilidades de encontrarse sujeto a un estado de esfuerzos constante si se encuentra bien confinado, he incluso a que se presenten esfuerzos de tensión por lo que consideramos que debe pensarse en estudiar con mayor detenimiento la posibilidad de desarrollar alguna prueba más conveniente.

3.4 Abrasión y ataque químico

Los resultados obtenidos correspondientes a la prueba de dos horas de desgaste y ataque químico y 12 de ataque químico en reposo y 10 hrs. de desgaste y ataque, para los tubos de PVC y PEAD con pared estructurada, son presentados en las tablas 3.4.1 y 3.4.2 respectivamente.

Cabe destacar que debido a que el tiempo de exposición al ataque químico y abrasión, de 2 horas en una muestra y de 10 horas en la otra, resultaron ser pequeños para generar un desgaste apreciable en la pared de cada tubo.

Tabla 3.4.1. Comportamiento que mostraron los tubos sometidos a 2 hrs de ataque químico y desgaste.

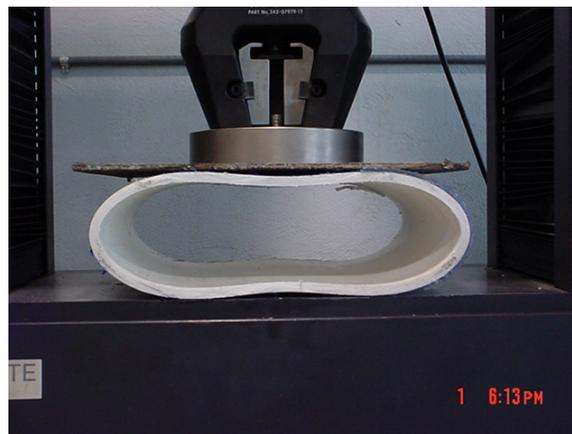
Compresión Diametral (%)	Carga soportada (kN)	Expansión horizontal (%)	Observaciones
Tubo de PVC			
5	2.35	1.26	Forma elíptica
20	7.59	11.22	Forma elíptica
60	14.16	-	Forma de ocho
Tubo de PEAD			
5	1.67	1.26	Forma elíptica
20	3.31	11	Forma elíptica
60	5.66	40	Forma de ocho

Tabla 3.4.2. Comportamiento que mostraron los tubos sometidos a 12 hrs. de ataque químico en reposo y 10 hrs. de ataque químico y desgaste.

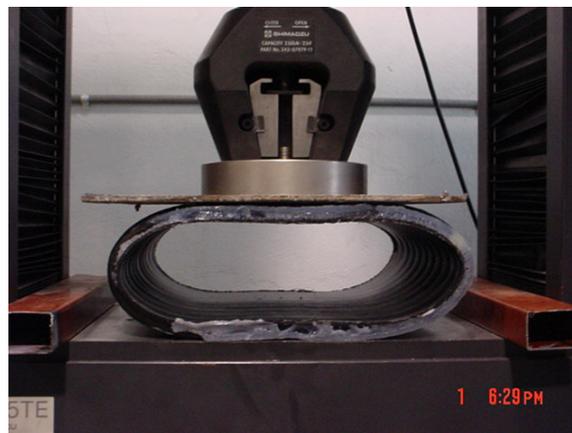
Compresión Diametral (%)	Carga soportada (kN)	Expansión horizontal (%)	Observaciones
Tubo de PVC			
5	1.96	3.3	Forma elíptica
20	8.2	18.1	Forma elíptica
60	13.55	38.6	Forma de ocho
Tubo de PEAD			
5	1.28	0.8	Forma elíptica
20	3.61	14.5	Forma elíptica
60	4.96	36.6	Forma elíptica

Comparando los valores medidos en ambas tablas para cada tipo de tubo estudiado se aprecia claramente que el comportamiento es aproximadamente el mismo en ambos casos. Sin embargo es importante destacar que el tubo de PVC sometido a 12 hrs de desgaste y abrasión presentó un crujido a aproximadamente un 40 % de compresión diametral y al 60 % presentó la forma de ocho (inversión de curvatura) mientras que la muestra correspondiente de PEAD no ocurrió como se puede apreciar en la Figura 3.4.1. Asimismo, es importante destacar que en general la expansión horizontal del tubo, resultó en todos los casos, menor que la que presentan los tubos sometidos a la misma prueba que no fueron sometidos a desgaste.

Es importante mencionar que en lo que se refiere a la adhesión entre la pared interna y la pared corrugada de los tubos de PEAD, no se detectaron desprendimientos de estas dos paredes aún cuando el tubo fue llevado a un 60% de disminución del diámetro.



(a)



(b)

Figura 3.4.1. Fotografías que muestran el pandeo observado en los tubos sometidos a una compresión diametral del 60% después de ser expuestos durante 10 hrs. a ataque químico y posteriormente a 12 hrs de ataque químico y abrasión simultánea: (a) Tubo de PVC y (b) Tubo de PEAD

Con esta información se verifican los resultados que se han reportado por el Dr. Lester Gabriel [PPI,7] y otros investigadores [PPI,12], en el sentido de que los compuestos como el aceite comestible, los detergentes y otros tensoactivos, no ocasionaron alteraciones importantes en la rigidez de los tubos en los tiempos de desgaste y ataque químico ensayados. Debido a lo anterior se puede decir que al menos a corto plazo se espera que las condiciones químicas y de abrasión a las que estarán expuestas ambos tubos no representan una amenaza real.

De las tablas presentadas en la sección 1.2, referentes a los contenidos de contaminantes presentes en las aguas residuales de la Cd. De México se pueden conocer los valores máximos y mínimos de diversos contaminantes. Esto explica claramente el hecho de que la composición de las grasas y aceites, sustancias activas al azul de metileno (detergentes), entre otras, son poco propensas a ocasionar algún daño en las propiedades mecánicas de un tubo.

Otro de los puntos interesantes es el hecho de que el oxígeno está considerado como un compuesto que puede en determinado momento ocasionar daños químicos en el tubo, pero el oxígeno disuelto en el agua no va a ocasionar ningún daño, ya que en la atmósfera se tiene una composición de 21 mg/L y en el agua a nivel del mar se tiene 8 mg/L y en un agua limpia en la Cd. de México se tiene alrededor de 5 y 6 mg/L, mientras que en un agua residual entre más altos sean los valores de DBO total, el agua contiene menos oxígeno disuelto y si no hace ningún daño en el aire, menos lo va a hacer en el agua.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en nuestro estudio nos permitieron concluir lo siguiente:

La prueba de compresión diametral brinda información confiable si se lleva hasta aproximadamente un 30%. Al 5 % de compresión diametral permite medir la rigidez del anillo y al 20% la capacidad de deformar elásticamente el material. Más allá de estas compresiones diametrales la relación entre compresión diametral y deformación máxima en el tubo se vuelve no lineal y sería necesario desarrollar un modelo matemático que permita interpretar verazmente la información que arroja.

El tubo de pared constante es considerablemente más sensible a sufrir una pérdida de rigidez del anillo al presentarse desgaste de su pared interna que el tubo de pared estructurada. Esto se debe a que en el tubo de pared estructurada la pared interna es sólo una parte de la estructura mucho menos significativa que la del tubo de pared constante.

La distribución de esfuerzos que se presenta en los tubos de PEAD es tal que los máximos esfuerzos encontrados son esfuerzos tangenciales de compresión y se localizan en la cresta, lo que convierte a la pared interior en un elemento de relativa poca participación estructural y cuya función es la contención del líquido que transporta. La capacidad mecánica de la pared interior se encontró suficiente incluyendo el desgaste por abrasión por lo que no se recomiendan mayores espesores.

La rigidez del anillo de un tubo no es un el único parámetro que asegura el buen funcionamiento del tubo enterrado. Un adecuado control de las deformaciones que se presentan durante la instalación y el confinamiento pueden permitir que un tubo con rigidez baja trabaje sin presentar fallas. Si se asegura que el tubo trabajará bajo un estado de deformación constante, los esfuerzos tenderán a relajarse y las posibilidades de falla disminuyen considerablemente. Es preciso revisar las normas de instalación para evitar los riesgos de falla en tubos flexibles.

En los tubos de PEAD con pared estructurada, a diferencia de los de pared constante, se presentan esfuerzos de tensión axiales los cuales en general son pequeños y se asocian dos factores principalmente:

Al aplastamiento de la pared estructurada inducida por un presión externa excesiva.

Al flexionamiento del tubo debido a hundimientos de la tierra de confinamiento.

Si el tubo es confinado correctamente no se encontró alguna razón para que se pueda inducir en un tubo que trabaja por gravedad un esfuerzo constante. Encontrar posibles factores que generen estados de esfuerzos constantes tendrá que ser a través de estudios específicos sobre tubos instalados en distintas regiones donde las condiciones climáticas, características de suelos y variaciones en la forma de instalación puedan ser evaluadas.

Dado que el tubo bien instalado es poco propenso a presentar esfuerzos constantes y a que fueron encontrados en la literatura cuestionamientos al respecto, se puede asegurar que una prueba como la HDB resulta extrema para un tubo que trabaja sin presión interna. Así mismo, por razones prácticas y metodológicas podemos asegurar que una prueba rápida de propagación lenta de grietas como la NCLS es conveniente para ser aplicada a la materia prima y al producto terminado. No obstante consideramos que deben realizarse esfuerzos

para desarrollar una prueba rápida de propagación lenta de grieta que aproxime mejor las condiciones bajo las que trabajará un tubo por gravedad

La presencia de agentes químicos y abrasivos no representa un riesgo severo en las tuberías de PEAD y PVC en el corto tiempo. Los agentes más agresivos para el PEAD son los hidrocarburos, la temperatura y la luz, siendo poco probables en el drenaje. Para poder determinar que los antioxidantes se agoten y que no cumplan con su función protectora, consistente principalmente en impedir la degradación de la resina, es necesario que se tengan altas temperaturas y luz solar, siendo que en un drenaje no se tienen ni altas temperaturas ni se está expuesto a la luz. Los detergentes, grasas y aceites, no son responsables de causar grietas.

No se encontraron razones de peso para hacer una distinción muy rigurosa entre drenaje carretero y sanitario. Desde el punto de vista mecánico las sollicitaciones mecánicas son muy similares. Químicamente, aunque podría pensarse que los agentes químicos presentes en drenajes sanitarios sean más agresivos, tampoco se encontró evidencia de que sean fatales en el corto plazo.

En general no encontramos una razón poderosa para pensar que los tubos de PEAD con las características que poseen actualmente no trabajen eficientemente tanto en drenaje carretero como en el sanitario.

Bibliografía

1. M. E. Gurtin. An Introduction to Continuum Mechanics. Academic Press.(1981).
2. G. E. Dieter. Mechanical Metallurgy. Mc Graw-Hill. 2ª Ed.
3. A. C. Ugural, S. K. Fenster. Advanced Strength and Applied Elasticity. Edward Arnold England. (1981).
4. J. W. Dally and W. F. Riley. Experimental Stress Analysis. Mc Graw-Hill. 3er ed. (1991)
5. A. P. Moser. Burried Pipe Desing. 2da ed. Mc Graw-Hill. (2001)
6. I. Rubin. “Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones”. Noriega Editores. México. (2002).
7. Plastics Pipe Institute, Inc. “Engineering Properties of Polyethylene”.
8. Plastics Pipe Institute, Inc. “Chemical & Abrasion Resistance of Corrugated Polyethylene Pipe”. (1997).
9. M. Ratajska y S. Boryniec, Stefan. “Biodegradation of some natural polymers in blends with polyolefines”. Polymers for advanced technologies. Volumen 10, pág. 625 - 633 (1999).
10. Y. G. Hsuan, T. J. McGrath. National Academic Press (Report 429 National Cooperative Highway Research Program). (1999).
11. Y. G. Hsuan. Evaluation of Stress Crack Resistance of Polyethylene Pipe Resins via the Noched Constan Tensile Load (NCTL), Test. (1996).

12. Plastics Pipe Institute, Inc. "Design Service Life of Corrugated HDPE Pipe. Technical Report: TR- 43/2003". (2003).
13. A. Pytel and F. L. Singer. Resistencia de Materiales (Introducción a la mecánica de sólidos). Oxford University Press. 4ta. Ed. (1987).
14. R. K. Watkins and L. R. Anderson. Structural Mechanics of Buried Pipes. CRC Press. (1999).
15. Mc Grath, T. J., Schafer. B. W. Parallel Plate Testing and Simulation of Corrugate Plastic Pipe. 2003 Transportation Research Board Annual Meeting.
16. T. L. Anderson. Fracture Mechanics. 2da ed. CRC Press. (1995).
17. R. W. Hertzberg. Deformation and fracture Mechanics of Engineering Materials. 3ra ed. John Wiley and Sons. (1989).
18. C. Bernal; Et al. "Failure prediction analysis for polyethylene flawed pipes". Engineering Fracture Mechanics. Volumen 70, pág. 2149 – 2162 (2003).
19. Plastics Pipe Institute, Inc. "Structural Integrity of Non-Pressure Corrugated Polyethylene Pipe". (2000).
20. Plastics Pipe Institute, Inc. "Structural Design Method For Corrugated Polyethylene Pipe". (2000).
21. Plastics Pipe Institute, Inc. "Hydraulic Considerations For Corrugated Polyethylene Pipe". (2000).

Reflexión

Debe quedar bien claro que existen dos formas genéricas de clasificar a las tuberías para drenaje, existentes en la literatura, las cuales se basan en: el material del cual fueron fabricada y la otra en el estado de esfuerzos dominante durante el servicio. La primera clasificación considera dos tipos de tuberías: rígidas y flexibles. Por su parte la segunda clasificación hace referencia a tuberías de presión y por gravedad.

Hablar de drenaje sanitario, pluvial, municipal, etc., se refiere a aplicaciones de los tubos por gravedad y no una clasificación especial. Establecer una clase especial de tubería requiere una definición rigurosa basada en el análisis de las condiciones excepcionales o claramente distinguibles. Asegurar que las condiciones físico-químicas bajo las cuales trabaja un tubo instalado en un drenaje sanitario son totalmente diferentes a las de uno que trabaja en un drenaje pluvial, debe ser demostrado con rigor científico no con sospechas ni con interpretaciones de conclusiones de trabajos realizados de los cuales no se dispone de la información completa.

El establecimiento de una norma nacional requiere un estudio minucioso de las condiciones climáticas, tipos de suelo, tipo de población, materias primas disponibles, ubicación geográfica, etc., existentes en las diferentes regiones de una localidad y/o de un país. Asimismo, debe tenerse en cuenta otras normas existentes tales como las de construcción, mantenimiento, etc., que se relacionan íntimamente con la norma que se promueve. Es claro que este es un trabajo que tomará años y que supeditar la aprobación de una norma a la conclusión de dichos estudios sería un error que podría generar consecuencias negativas para la economía nacional. Es entonces sensato considerar normas análogas procedentes de otro país bajo la condición de que debe ser revisada constantemente para optimizarla.

Si existe al menos una norma que aprueba la aplicación de tubos en drenaje sanitario es suficiente para considerar, por el momento, que es apropiada. El hecho de que existen pocas o muchas aplicaciones reales es irrelevante en tanto no exista una descalificación comprobada. Asimismo, no se puede descalificar un tipo de tubería por opiniones personales, se deben realizar estudios sobre el rendimiento a través del tiempo, aplicando técnicas estadísticas, y realizar una investigación rigurosa de los casos de falla en la cual se pueda diferenciar las causas imputable al tubo si las hubiera y no a la instalación, el manejo o bien a la mala selección durante el diseño del sistema de drenaje.

Consideramos que para decidir sobre el tipo de especificaciones que debe cumplir un tubo deben ser tomados en cuenta los siguientes aspectos:

- a) Las cargas mecánicas a las que estará sujeto durante el servicio, considerando la aplicación particular si es el caso.

La determinación apropiada de las cargas permitirá a su vez determinar el estado de esfuerzos que se generan en el tubo. Lo anterior brindará la información necesaria para realizar una evaluación de la conveniencia de las dimensiones del mismo criterio de resistencia que debe ser tomado en cuenta para asegurar su eficiencia durante el servicio. En el caso de los tubos estudiados es claro, tanto en las pruebas experimentales como en las numéricas, que la distribución de esfuerzos que genera la carga aplicada, la cual para un tubo que trabaja por gravedad corresponde con una presión externa, indica que los esfuerzos mayores se presentan en la pared exterior y son de compresión. Para definir el

criterio de resistencia que debe ser aplicado debe tomarse en cuenta el estado de esfuerzos y la relación esfuerzo-deformación que rige el comportamiento del material del cual está fabricado el tubo.

La rigidez del anillo debe ser considerada no sólo como un parámetro de resistencia a la carga de confinamiento. Dicho parámetro puede ser más crítico durante la instalación. Si el tubo queda bien instalado, es decir, si no sufre deformaciones severas durante la instalación y el confinamiento promueve la formación de un arco de carga no hay razón para que el tubo trabaje deficientemente. Es preciso regular los procedimientos de instalación ya que las fallas asociadas a tubos flexibles se asocian principalmente a la mala instalación.

Debe quedar claro que la relación entre la compresión diametral de un aro circular y la deformación tangencial máxima es directamente proporcional solo en un intervalo de deformaciones reducido que no excede del 30%. Considerando lo anterior es claro que la compresión al 5 % permite medir la rigidez del aro mientras que la deformación al 20% es una medida de la capacidad elástica del material. Una prueba llevada al 60% de compresión no brindará información fidedigna sobre la máxima deformación (plástica) que es capaz de soportar el material debido a que se pierde por completo la proporcionalidad mencionada anteriormente. Es decir no se puede asegurar que un 60% de compresión diametral equivale a un 60% de deformación tangencial.

b) Las propiedades mecánicas del material del cual fue fabricado

Es bien sabido que el comportamiento mecánico del polietileno es del tipo viscoelástico el cual se caracteriza por una variación en el tiempo de las propiedades mecánicas. Asimismo, se sabe que dichas variaciones en el tiempo son críticas cuando el estado de esfuerzos es constante ya que se presenta un fenómeno de deformación progresiva que induce en el material una disminución del esfuerzo de cedencia y por tanto la presencia de deformación plástica. Debe quedar claro que dicha situación sólo se puede asegurar que se presenta en tubos sujetos a presión interna.

Por otro lado, es claro que cuando la deformación del elemento es constante, a través del tiempo se presenta una relajación de los esfuerzos aplicados. Dicha condición corresponde con la de un tubo que no se encuentra sujeto a presión interna y que es instalado de manera tal que se puede asegurar que no sufrirá deformaciones continuas en el tiempo.

De la discusión anterior se puede deducir inmediatamente que una prueba de pérdida de resistencia en el tiempo a esfuerzo constante, como es el caso de la prueba HDB, no puede ser considerada como indispensable para un tubo que trabajará por gravedad. Se debe considerar una prueba rápida de propagación lenta de grietas lo suficientemente confiable.

c) Propagación lenta de grietas

Es evidente que la prueba HDB es poco conveniente para tubos que trabajan por gravedad y que se han realizado estudios para definir una prueba rápida que resulte conveniente. Al respecto, lo más sensato es adoptar la prueba de propagación lenta de grietas que ofrezca mayor reproducibilidad y la norma más reciente debe ser tomada como la más adecuada. Bajo este criterio consideramos que deben ser descartadas la prueba ESCR por su poca reproducibilidad y la NCTL debido a no se puede asegurar que muestra la contundencia requerida. Consideramos que la prueba de este tipo más confiable es la NCLS debido a que es la más reciente. Debe quedar claro que no existe contundencia en las pruebas existentes por lo que deben realizarse esfuerzos para desarrollar pruebas efectivas que reproduzcan de manera más conveniente las condiciones bajo las que trabajará el tubo.

No se puede asegurar que el hecho de que un material cumpla con una norma de propagación de grietas garantice que no ocurrirán fallas, existen casos en los que ha sucedido lo contrario.

d) Las sustancias químicas a las que estarán expuesto

Es necesario definir convenientemente lo que se entiende por vida útil de una tubería. No se debe confundir el desgaste con la propagación de grietas. Debe quedar claro que una grieta que no existía, aparece y crece sólo si el esfuerzo es excesivo o bien debido al efecto de disminución de las propiedades mecánicas, asociado al comportamiento viscoelástico. El desgaste de la pared puede ser crítico si se perfora la pared del tubo pero también pueden presentarse fugas si el desgaste ocasiona una disminución importante de la rigidez del anillo; un hundimiento puede generar una deflexión que ocasione un desprendimiento de la campana.

Predecir con gran precisión el tiempo que tardará en crecer una grieta no es algo trivial. Si se considera dicha estimación como tiempo de vida se está incurriendo en errores severos.

Debe quedar claro que los agentes más agresivos para el polietileno son los hidrocarburos, la temperatura y la luz. En un tubo enterrado, de color negro que es para evitar el ataque de luz U.V. y que transporta fluidos en los que por normatividad se regula la concentración de contaminantes de ese tipo que se permite arrojar, los riesgos no pueden ser tomados como graves.