



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

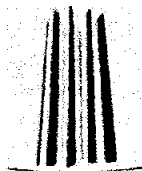
Estudio del comportamiento mecánico del polietileno de alta densidad empleado para la fabricación de tubos para drenaje NMX-E-241

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A:  
DAVID BECERRIL GARCÍA

ASESOR  
M. en I. JACINTO CORTÉS PÉREZ



MEXICO

2005

m352611



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres Julio y Bárbara, cuyo ejemplo, cariño y apoyo me han hecho mejorar en mi vida académica, personal y sentimental. Por que nunca me han dejado solo y por quererme tanto. Los adoro y no sería nada sin su existencia. Esto en realidad es de ustedes.

A Diana, por apoyarme y soportar mis malos ratos y rabietas. Por poner una sonrisa en mi rostro cada día y hacerme ver el mundo más sencillo. Por darme un futuro desde hoy, pero sobre todo, por hacerme tan feliz. Gracias por existir te amo.

A mi asesor, M. en I. Jacinto Cortés Pérez, por su confianza paciencia y gran apoyo para la realización de este trabajo, por creer en mi y por ayudarme a ser un mejor estudiante. Ha sido un verdadero maestro y amigo para mi.

A mis sinodales, Dr. Daniel Aldama, M. en I. Alberto Reyes Solís, Ing. Cassiodoro Domínguez y al M. en I. José Antonio Souza, por su gran ayuda y confianza en mi, y sobretodo por su comprensión en situaciones difíciles. No sólo son mis sinodales, también fueron y son grandes maestros en mi vida académica y fuera de ella, espero seguir aprendiendo de ustedes. Muchísimas gracias.

A Néstor, Toño, Higuera, Carlos, Raúl, Juan Pablo, Arturo, por su valiosa ayuda para la realización de las pruebas, por sus consejos, palabras de aliento, pero sobre todo por brindarme su amistad la cual valoro mucho.

A mi Abue, mi segunda madre. Me hubiera gustado mucho poder compartir esto contigo.

---

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1 Características físicas y químicas del PEAD</b>	
1.1 Materiales poliméricos.....	5
1.1.1 Enlace covalente.....	5
1.1.2 Fuerzas de Van der Waals.....	6
1.1.3 Fuerzas de dipolo a dipolo (dipolos permanentes).....	6
1.1.4 Enlaces de hidrógeno.....	6
1.1.5 Otros enlaces en polímeros.....	6
1.1.6 Clasificación de materiales poliméricos.....	7
1.1.7 Homopolímeros y copolímeros.....	8
1.1.8 Procesos de polimerización.....	9
1.1.9 Temperatura de transición vítrea.....	9
1.1.10 Polímeros cristalinos y amorfos.....	10
1.1.11 Polímero termoplásticos.....	12
1.1.12 Polímeros termofijos (resinas termofijas o termoestables).....	14
1.1.13 Elastómeros.....	16
1.2 Polietileno.....	16
1.2.1 Tipos de polietileno (densidad).....	18
1.2.2 Cristalinidad.....	20
1.2.3 Peso molecular.....	21
1.2.4 Polietileno de alta densidad.....	22
1.2.5 Polimerización del PEAD.....	23
1.2.6 Propiedades del PEAD.....	23
1.2.7 Aplicaciones del PEAD.....	24
1.2.8 Reciclabilidad del PEAD.....	25
1.2.9 Resistencia a la abrasión y ataque químico del PEAD.....	26
1.3 Viscoelasticidad lineal.....	26
1.3.1 Modelos viscoelásticos simples.....	26
1.3.2 Modelos generalizados.....	30
1.3.3 Fluencia lenta bajo carga constante (creep).....	31
1.3.4 Relajación de esfuerzos.....	34

---

## Capítulo 2 Normas aplicables a resinas de PEAD para tuberías

2.1 Tuberías plásticas.....	38
2.2 Prueba de resistencia a la ruptura por esfuerzo ambiental ESCR (Environmental Stress Crack Resistance).....	42
2.3 Prueba tensil con muesca para medir la resistencia del crecimiento lento de grietas en tubos de polietileno y resinas (Notch Tensile Test to Measure the Resistance to Slow Crack Growth of Polyethylene Pipes and Resins) .....	45
2.4 Prueba con muesca y esfuerzo constante en ligamento NCLS (Notched Constant Ligament-Stress).....	47
2.5 Prueba para bases de diseño hidrostático para tuberías de materiales termoplásticos HDB (Hydrostatic design Basis for Thermoplastic Pipe Materials).....	50
2.6 Caracterización de las resinas empleadas en los tubos.....	52
2.7 Tablas de propiedades del PEAD.....	57

## Capítulo 3 Método experimental

3.1 Preparación de muestras.....	61
3.2 Ensayos de fluencia lenta bajo carga constante (creep).....	63
3.3 Ensayos de relajación de esfuerzos.....	69

## Capítulo 4 Resultados y discusión

4.1 Fluencia lenta bajo carga constante (creep).....	77
4.2 Relajación de esfuerzos.....	88

Conclusiones.....	95
-------------------	----

Bibliografía y mesografía.....	97
--------------------------------	----

## Introducción

La importancia que adquirieron los materiales poliméricos el siglo pasado fue enorme, tanto que el siglo XX es conocido como el siglo de la basura debido al desarrollo en la producción y utilización de estos materiales. Los polímeros comenzaron a sustituir a materiales clásicos como metales, cerámicos, etc., debido a sus propiedades mecánicas y químicas, bajo costo, bajo peso, etc. Hoy en día, la vida no puede ser concebida sin la utilización de polímeros ya que están presentes en todos lados. Es por esto que el estudio de estos tiene tanta importancia en la actualidad.

Un ejemplo de la utilización de polímeros en la actualidad es en tuberías. La necesidad de transportar fluidos de un lugar a otro ha acompañado al ser humano desde el principio de su existencia, en casi todas las civilizaciones antiguas se han encontrado vestigios de este tipo de servicios, ya sea en forma de canales, tuberías, acueductos, etc. En la actualidad, las tuberías se han modificado, tanto de forma como de materiales con que se fabrican, debido a las necesidades y exigencias de los servicios que la sociedad de hoy en día requiere. Las tuberías tienen distintas aplicaciones como son: tuberías que trabajan por gravedad (en las cuales el fluido es conducido sin necesidad de ser bombeado), tuberías que trabajan con presión interna (en las cuales el fluido que transportan genera una presión dentro del tubo). A pesar de que las propiedades mecánicas de los polímeros son inferiores que las de los metales y los cerámicos, utilizados típicamente en tuberías de drenaje, los actuales desarrollos en la ingeniería han permitido que dichos materiales vengán a remplazar al acero y al concreto. Quizá el polímero que inicio su incursión en este terreno es el PVC (cloruro de polivinilo) debido a que resultaba más ligero y económico que los otros materiales. No obstante, hoy en día se han desarrollado tuberías de otros materiales poliméricos tales como el polietileno de alta densidad (PEAD) y el polipropileno (PP), que están desplazando a nivel mundial a las tuberías de PVC debido a que resultan más ligeros aún, son altamente resistentes a los ataques químicos y orgánicos, además de que son reciclables.

Recientemente, en México se han venido empleando tuberías de PEAD en aplicaciones tanto de agua potable como de alcantarillado y su impacto ha sido tal que están desplazando de manera importante a las de PVC que venían siendo utilizadas. Por tratarse de nuevos materiales existen severas dudas referente a la normatividad que deben cumplir. Esto es importante debido a que existe una buena cantidad de normas internacionales referentes a tuberías de este tipo, sin embargo, existen severas discrepancias entre ellas.

Por iniciativa de los fabricantes de tubería corrugada de PEAD se ha presentado un proyecto de norma denominado NMX-E-241 para regular la calidad de dichos productos. El proyecto se encuentra actualmente en la etapa de discusión pública durante la cual han surgido una serie de cuestionamientos sobre las especificaciones que propone dicho proyecto de norma. Cabe destacar que uno

de los cuestionamientos importantes se refiere al tipo de resina que debe ser empleada para fabricar los tubos. Al respecto se ha hecho constantemente referencia a las normas internacionales, en particular a las normas ASTM.

En particular, una de las discrepancias existentes se refiere al tipo de pruebas a las que debe someterse la materia prima empleada para fabricar las tuberías. Un análisis de dichas normas nos ha mostrado claramente que el punto de conflicto se origina por el tipo de comportamiento que presentan estos materiales el cual es bien sabido que es viscoelástico.

En general las normas existentes se concentran en realizar pruebas del comportamiento del material en el tiempo, lo cual es razonable considerando la naturaleza del mismo. No obstante, se encontró que las pruebas que sugieren dichas normas combinan varios de los efectos que presentan los materiales termoplásticos. Concretamente, las pruebas se concentran en medir el tiempo de falla del material sin embargo existen otros efectos que intervienen en dicho fenómeno, tales como la fluencia lenta, la relajación de esfuerzos o bien la transición dúctil-frágil.

Debido a lo anterior, consideramos que es necesario realizar una serie de estudios que permitan separar dichos efectos para cuantificarlos de manera apropiada. Sólo hasta que se haya comprendido lo anterior será posible calificar las pruebas sugeridas por las normas y poder tomar una decisión razonable sobre la conveniencia de alguna de ellas para su aplicación en las tuberías que se instalan en México.

En respuesta a lo anterior, en el presente trabajo se da inicio a una serie de estudios teniendo como fin específico realizar una caracterización mecánica de resinas de PEAD empleadas para fabricar tuberías tanto para agua potable como para drenajes. La caracterización consiste en someter diversas muestras a dos condiciones particulares: esfuerzo y deformación constante.

Este trabajo es desarrollado en 4 capítulos, de los cuales, en el primer capítulo se hace mención de las características químicas de los polímeros, las cuales explican las características mecánicas de estos, en particular, del PEAD. También se presentan modelos viscoelásticos con los cuales se comparará el comportamiento mecánico de las resinas estudiadas.

Con la finalidad de observar los efectos del comportamiento que exhibe el PEAD, se presentan una serie de normas para tuberías plásticas, las cuales son aplicables a tuberías conformadas con el material estudiado en este trabajo y se definen algunos tipos de tuberías, esto en el capítulo dos. Así mismo, se muestran tablas con características de la resina virgen estudiada.



En el capítulo tres se explica la metodología empleada para la realización de las pruebas antes mencionadas para la caracterización, así como la instrumentación realizada y el equipo utilizado para llevar a cabo tales pruebas.

Por último, en el capítulo final, se presentan los resultados obtenidos de las pruebas antes mencionadas y se hace una discusión de estos, comparándolos con modelos viscoelásticos reportados en la literatura, así como otros fenómenos encontrados.

# Capítulo I

Características físicas y químicas del PEAD

## **1.1 Materiales poliméricos**

Como punto de partida en el estudio del comportamiento mecánico del polietileno de alta densidad (PEAD), es importante definir algunos conceptos fundamentales relativos a los materiales poliméricos sintéticos que faciliten la comprensión de los fenómenos estudiados en el presente trabajo.

La materia está formada por moléculas que pueden ser de tamaño normal o moléculas gigantes (sustancias macromoleculares) llamadas comúnmente en la literatura polímeros [1,3,4 y 5]. Dichos compuestos son de naturaleza orgánica, y en su composición intervienen fundamentalmente el Carbono y el Hidrógeno, además de otros elementos en menor proporción, como Oxígeno, Nitrógeno, Cloro, Azufre, Silicio, Fósforo, etc.

Como se sabe, un polímero (del griego *poly*, muchos; *meros*, parte, segmento) es una sustancia cuyas moléculas son, por lo menos aproximadamente, múltiplos de unidades de peso molecular bajo. La unidad de bajo peso molecular es el monómero, el cual mediante una reacción de polimerización, se repite un número elevado de veces formando la macromolécula. Estas unidades forman enormes cadenas de las formas más diversas. Las propiedades de los polímeros son completamente diferentes de la de los monómeros que los componen.

En general, los polímeros tienen una buena resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen [3]. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases, las más comunes son las uniones covalentes y las llamadas Fuerzas de Van der Waals. A continuación se presenta una breve descripción de los principales tipos de enlaces presentes en los polímeros.

### **1.1.1 Enlace covalente**

Los polímeros generalmente se encuentran formados por moléculas con uniones covalentes, mientras que las moléculas separadas, son atraídas cada una por fuerzas intermoleculares, secundarias o fuerzas de "Van der Waals" las cuales serán explicadas más adelante [1 y 2]. Las uniones covalentes son caracterizadas por altas energías (35 a 105 kcal/mol), cortas distancias interatómicas y ángulos relativamente constantes. En general, estos enlaces gobiernan la estabilidad térmica y fotoquímica de los polímeros, y estas fuerzas de unión pueden ser un indicativo para los mecanismos de degradación.

El arreglo de la estructura covalente en el espacio es una guía para explicar las propiedades de los polímeros. Existen, básicamente, dos tipos de arreglos; el polímero puede representarse como una molécula individual o como una red infinita. La distinción es importante ya que sólo las moléculas separadas pueden exhibir fluidez plástica y solubilidad, es decir, el arreglo de las moléculas determina el comportamiento del material.

### **1.1.2 Fuerzas de Van der Waals**

Según la literatura consultada [4] las fuerzas de Van der Waals, también llamadas fuerzas de dispersión, se presentan en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios: como resultado de los movimientos de electrones, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente. Así se forman dipolos no-permanentes. Estos dipolos producen atracciones electrostáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros, formados por miles de estas pequeñas moléculas, las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes, como en el caso del polietileno.

### **1.1.3 Fuerzas de dipolo a dipolo (dipolos permanentes)**

La presencia de un momento bipolar permanente aumenta las fuerzas de atracción entre moléculas y facilita su aproximación [2], como en el caso de los poliésteres [6]. Estas atracciones son mucho más potentes y a ellas se debe la gran resistencia tensil de las fibras de los poliésteres.

### **1.1.4 Enlaces de hidrógeno**

Este enlace está formado por hidrógeno entre dos átomos o grupos de átomos fuertemente electronegativos (oxígeno, nitrógeno, flúor), y parece ser esencial en la asociación de moléculas con altos valores de momento bipolar eléctrico [2]. Dichas interacciones son tan fuertes, que una fibra obtenida con estas poliamidas tiene resistencia tensil mayor que la de una fibra de acero de igual masa [4]. Como en las poliamidas (nylon).

### **1.1.5 Otros enlaces en polímeros**

Hay atracciones de tipo iónico que son las más intensas [6]. Este tipo de enlace surge de la atracción electrostática entre los iones con cargas opuestas [2]. Un ejemplo sería el copolímero etileno-ácido acrílico, que al ser neutralizado con la base  $M(OH)_2$ , producirá la estructura indicada. Estos materiales se llaman ionómeros y se usan, por ejemplo, para hacer películas transparentes de alta resistencia.

Tabla 1.1 Energía requerida para romper cada enlace

Tipo de enlace	Kcal / mol
Van der Waals en CH <sub>4</sub>	2.4
Dipolos permanentes	3 a 5
Enlaces hidrógeno	5 a 12
Enlace covalente	35 a 105
Iónicos	mayores a 100

La fuerza total de atracción entre las moléculas del polímero, dependería del número de las interacciones. Como máximo, sería igual a la energía de enlace, multiplicada por el número de átomos de carbono en el caso del polietileno o por el número de carbonílicos C = O en los poliésteres, etc. Rara vez se alcanza este valor máximo, porque las cadenas de los polímeros no pueden, por lo general, acomodarse con la perfección que sería requerida.

### 1.1.6 Clasificación de materiales poliméricos

Existen distintas maneras de clasificar a los polímeros. Dichas clasificaciones se basan en la necesidad de agrupar ciertas características para poder particularizar y describir brevemente un polímero. A continuación se presenta una clasificación general de ellos [7], la cual satisface las necesidades de este trabajo.

Los polímeros se pueden clasificar bajo los siguientes criterios:

a) Por el tipo de monómeros que los forman: se distinguen los homopolímeros (monómeros iguales) y los copolímeros (más de un monómero distinto).

b) por el número de moléculas de monómero que constituyen la molécula: oligómeros y polímeros propiamente dichos. Los oligómeros, caracterizados por moléculas que contienen un número pequeño de monómeros, se nombran anteponiendo al nombre del compuesto el prefijo numeral griego correspondiente (dímeros, trímeros, tetrámeros, etc.).

c) por su elasticidad a distintas temperaturas: se distinguen los elastómeros, termoplásticos y termofijos. Los primeros son muy elásticos a temperatura ambiente, mientras que los termoplásticos lo son a temperaturas moderadas y los termofijos son rígidos.

d) por la estructura de su cadena: los polímeros son *lineales* o de *cadena ramificada* (Figura 1.1). Los primeros presentan una cadena lineal y forman, en general, polímeros elastómeros o termoplásticos. Los polímeros de cadena ramificada se caracterizan por poseer enlaces no sólo en la dirección de la estructura lineal, sino que tienen cadenas laterales que a su vez están enlazadas a otras cadenas. Estos enlaces en varias direcciones proporcionan mayor compacidad al polímero que, en general, es termofijo.

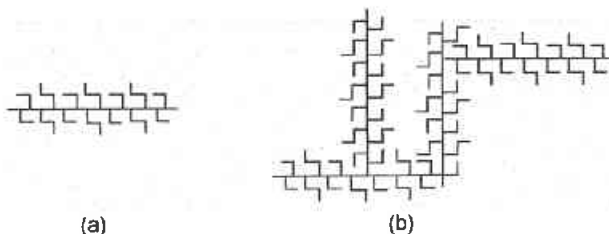


Figura 1.1 Estructura de la cadena a) Cadena lineal b) Cadena ramificada

e) por su procedencia: los polímeros se pueden dividir en *naturales* y *sintéticos*.

Una vez definida esta clasificación, se explicarán con más detalles algunos de los distintos puntos de ésta así como otros puntos importantes que no están contemplados en ella.

### 1.1.7 Homopolímeros y copolímeros

Los materiales como el polietileno, el PVC, el polipropileno, y otros que contienen una sola unidad estructural, se llaman homopolímeros [3,4 y 5]. Los homopolímeros, además, contienen cantidades menores de irregularidades en los extremos de la cadena o en ramificaciones.

Por otro lado los copolímeros contienen varias unidades estructurales, como es el caso de algunos muy importantes en los que participa el estireno. Estas combinaciones de monómeros se realizan para modificar las propiedades de los polímeros y lograr nuevas aplicaciones. Lo que se busca es que cada monómero imparta una de sus propiedades al material. Son el equivalente a las aleaciones metálicas.

### 1.1.8 Procesos de polimerización

Estos procesos son los que dan vida a los polímeros uniendo sus unidades elementales (monómeros) y son de gran relevancia debido a que proporcionan a los polímeros distintas características físicas y químicas. Existen diversos procesos para unir moléculas pequeñas con otras para formar moléculas grandes [3,4 y 5]. Su clasificación se basa en el mecanismo por el cual se unen estructuras monómeras o en las condiciones experimentales de reacción.

A continuación se mencionan los principales mecanismos de polimerización

- Polimerización por adición
- Polimerización por condensación
- Polimerización en suspensión, emulsión y masa

### 1.1.9 Temperatura de transición vítrea

Una característica importante que distingue a los polímeros de otros materiales es la temperatura de transición vítrea. Este fenómeno es consecuencia de la estructura interna del polímero como será explicado con más detalle en el siguiente inciso.

A temperaturas altas, los polímeros se vuelven líquidos muy viscosos en los que las cadenas están constantemente en movimiento cambiando su forma y deslizándose unas sobre las otras. A temperaturas muy bajas, el mismo polímero cambia a un sólido duro, rígido y frágil [3 y 6].

El fenómeno de la *transición vítrea* es algo que sólo le ocurre a los polímeros, el cual es uno de los aspectos que los hacen diferentes. Hay una cierta temperatura (distinta para cada polímero) llamada *temperatura de transición vítrea*, o *T<sub>g</sub>*. Cuando el polímero es enfriado por debajo de esta temperatura, se vuelve rígido y quebradizo, igual que el vidrio.

Debemos aclarar algo en este punto, la transición vítrea no es lo mismo que el fundido. La fusión es una transición que se manifiesta en los polímeros cristalinos. Ocurre cuando las cadenas poliméricas abandonan sus estructuras cristalinas y se transforman en un líquido desordenado. La transición vítrea es una transición que se manifiesta en los polímeros *amorfos*; es decir, polímeros cuyas cadenas no están dispuestas según un ordenamiento cristalino, sino que están esparcidas en cualquier ordenamiento, aún en estado sólido.

Pero incluso los polímeros cristalinos tienen alguna porción amorfa [10]. Esta porción generalmente constituye el 40-70% de la muestra polimérica. Esto explica por qué una misma muestra de un polímero puede tener tanto una temperatura de transición vítrea *como* una temperatura de fusión. Pero lo importante es saber que la porción amorfa *sólo* experimentará la transición vítrea (Figura 1.2b), y la porción cristalina *sólo* la fusión (Figura 1.2a).

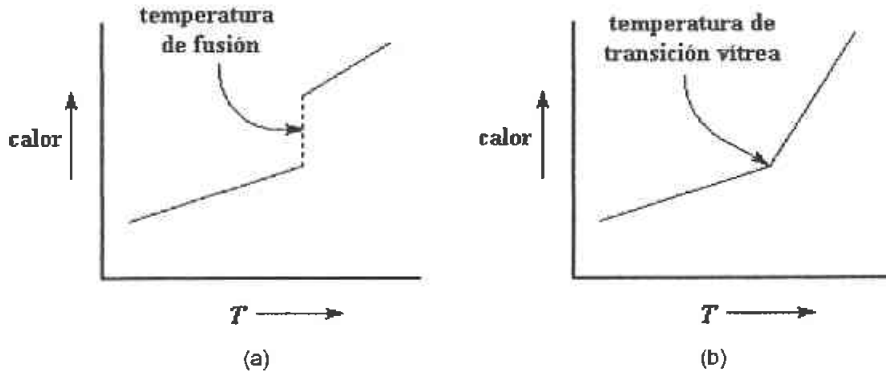


Figura 1.2 Temperatura de fusión y de transición vítrea a)Material cristalino b) material amorfo

### 1.1.10 Polímeros cristalinos y amorfos

Todos los materiales sólidos pueden clasificarse de acuerdo a su estructura molecular en *cristalinos* y *amorfos*, y es debido a este acomodo que los materiales presentan distintos tipos de propiedades mecánicas siendo los polímeros considerados como materiales semi-cristalinos debido a que presentan ambos tipos de estructura [18]. Es por ello que presentan un comportamiento viscoelástico, el cual se explica en la sección 1.3 de este trabajo.

En los sólidos cristalinos, las moléculas se encuentran ordenadas en las tres dimensiones. Esto es lo que se llama ordenamiento periódico y lo pueden tener los sólidos cristalinos constituidos por moléculas pequeñas [3,4 y 5]. En el caso de los polímeros, las cadenas son muy largas y fácilmente se enmarañan y además, en el estado fundido se mueven en un medio muy viscoso, así que no puede esperarse en ellos un orden tan perfecto, a pesar de ello, algunos polímeros exhiben ordenamiento parcial en regiones llamadas *cristalinas*.

Se distinguen regiones de dos clases: las cristalinas (Figura 1.3), en la que las cadenas dobladas varias veces en zigzag están alineadas formando las agrupaciones llamadas *cristalitos*; y otras regiones amorfas (Figura 1.4), en la que las cadenas se enmarañan en un completo desorden.



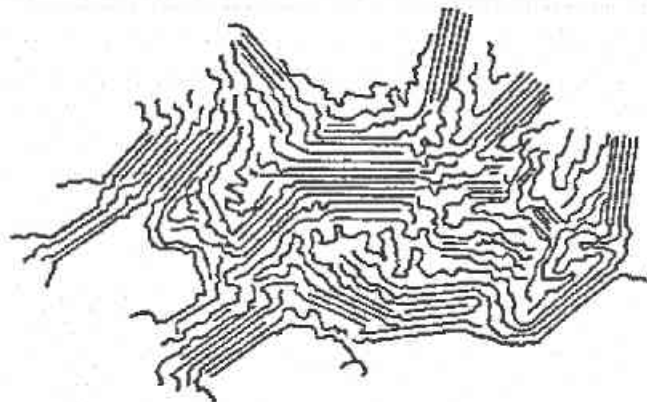


Figura 1.3 Polímero de estructura cristalina

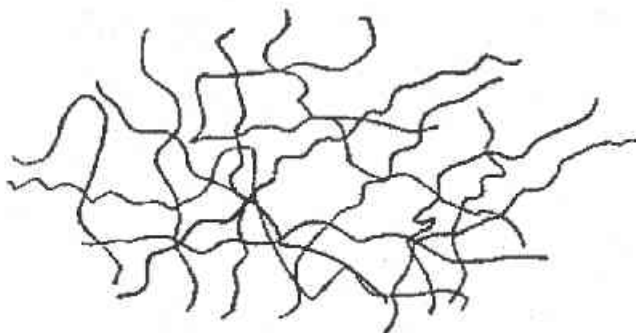


Figura 1.4 Polímero de estructura amorfa

El grado de cristalinidad de los polímeros, que por su estructura *regular* y por la flexibilidad de sus cadenas tienen mayor tendencia a cristalizar, depende de las condiciones de la cristalización. Si el polímero cristaliza a partir del material fundido, habrá más imperfecciones porque las cadenas se enredan y el medio es muy viscoso, lo cual dificulta el ordenamiento de ellas. En cambio, si el polímero cristaliza de una solución diluida, es posible obtener cristales aislados, con estructuras bien definidas como en el caso del polietileno, de donde se distinguen las llamadas *lamelas* formada por cadenas dobladas muchas veces sobre sí mismas.

La cristalización a partir del polímero fundido conduce a la situación descrita anteriormente, en la que se tendrán dos fases: cristalina y amorfa, con algunas cadenas participando en varios cristalitas, actuando como *moléculas conectoras*.

También es frecuente que los cristalitas mismos se agrupen radicalmente a partir de un punto de *nucleación* y crezcan en él en forma radical, formando *esferulitos*. Un enfriamiento muy rápido puede reducir considerablemente el grado de cristalinidad.

### 1.1.11 Polímero termoplásticos

Una de las clasificaciones más importantes para los polímeros es debida a su comportamiento a distintas temperaturas. Dentro de esta clasificación encontramos los polímeros termoplásticos, los polímeros termoestables (temofijos) y los elastómeros. Las características de cada uno son descritas a continuación así como algunos ejemplos de cada uno.

Los polímeros termoplásticos son polímeros de cadenas largas que tienen como característica esencial que se ablandan por acción del calor, llegando a fluir, y cuando baja la temperatura vuelven a ser sólidos y rígidos [3,4,8 y 9]. Por esta razón pueden ser moldeados (a presión) un elevado número de veces, lo que favorece su reciclabilidad.

Esta propiedad se debe a que están formados por cadenas macromoleculares que se encuentran desordenadas, enrolladas sobre sí mismas, pero independientes unas de otras, unidas sólo por fuerzas de Van der Waals. Este tipo de polímeros representan el 78-80% de consumo total y son los más usados en la industria del envase y el embalaje.

Entre los polímeros termoplásticos principales se encuentran :

- Poliiolefinas. Divididas a su vez en:

- PEBD (polietileno de baja densidad).
- PEAD (polietileno de alta densidad).
- PP (polipropileno).

- PVC (cloruro de polivinilo).

- PS (poliestireno).

- SAN (Estireno-acrilonitrilo)

- ABS (Copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno)

- PET (politereftalato de etileno)

### Polietileno

Éste es el termoplástico más usado en nuestra sociedad. Los productos hechos de polietileno van desde materiales de construcción y aislantes eléctricos hasta material de empaque. Es barato y puede moldearse a casi cualquier forma, extruírse para hacer fibras o soplarse para formar películas delgadas. Según la tecnología que se emplee se pueden obtener dos tipos de polietileno: el de *baja*

*densidad* y el de *alta densidad*. Debido a la importancia del polietileno en este trabajo, se ampliará más sobre él en la sección 1.2 de este capítulo.

### Polipropileno

El *polipropileno* se produce desde hace más de veinte años, pero su aplicación data de los últimos diez, debido a la falta de producción directa pues siempre fue un subproducto de las refinerías o de la desintegración del *etano* o *etileno*.

Como el *polipropileno* tiene un grupo metilo (CH<sub>3</sub>) más que el etileno en su molécula, cuando se polimeriza, las cadenas formadas dependiendo de la posición del grupo metilo pueden tomar cualquiera de las tres estructuras siguientes:

1. Isotáctico, cuando los grupos metilo unidos a la cadena están en un mismo lado del plano.
2. Sindiotáctico, cuando los metilos están distribuidos en forma alternada en la cadena.
3. Atáctico, cuando los metilos se distribuyen al azar.

Posee una alta cristalinidad, por lo que sus cadenas quedan bien empacadas y producen resinas de alta calidad.

### Cloruro de polivinilo (PVC)

Este polímero se obtiene polimerizando el *cloruro de vinilo*. Existen dos tipos de *cloruro de polivinilo*, el *flexible* y el *rígido*. Ambos tienen alta resistencia a la abrasión y a los productos químicos. Pueden estirarse hasta 4 veces y se suele copolimerizar con otros monómeros para modificar y mejorar la calidad de la resina. Las resinas de PVC casi nunca se usan solas, sino que se mezclan con diferentes aditivos.

### Poliestireno (PS)

El *poliestireno* es el tercer termoplástico de mayor uso debido a sus propiedades y a la facilidad de su fabricación. Posee baja densidad, estabilidad térmica y bajo costo. El hecho de ser rígido y quebradizo lo desfavorecen. Estas desventajas pueden remediarse copolimerizándolo con el acrilonitrilo (más resistencia a la tensión).

### Estireno-acrilonitrilo (SAN)

Este copolímero tiene mejor resistencia química y térmica, así como mayor rigidez que el poliestireno. Sin embargo no es transparente por lo que se usa en artículos que no requieren claridad óptica. Algunas de sus aplicaciones son la fabricación de artículos para el hogar.

### Copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno (ABS)

Estos polímeros son plásticos duros con alta resistencia mecánica, de los pocos termoplásticos que combinan la resistencia con la dureza. Se pueden usar en aleaciones con otros plásticos. Así por ejemplo, el ABS con el PVC nos da un plástico de alta resistencia a la flama que le permite encontrar amplio uso en la construcción de televisores. Sus cualidades son una baja temperatura de ablandamiento, baja resistencia ambiental y baja resistencia a los agentes químicos.

#### **1.1.12 Polímeros termofijos (resinas termofijas o termoestables)**

Acorde con distintas fuentes consultadas [3,4,8 y 9] estos materiales se caracterizan por tener cadenas poliméricas entrecruzadas (unidas entre sí por fuertes enlaces covalentes), formando una resina con una estructura tridimensional que no se funde, llegando a descomponer si la temperatura sigue subiendo. Por ello no se pueden moldear repetidas veces. Polimerizan irreversiblemente bajo calor o presión formando una masa rígida y dura. Las uniones cruzadas se pueden obtener mediante agentes que las provoquen, como en el caso de la producción de las resinas epóxicas.

Los *polímeros termofijos* pueden reforzarse para aumentar su calidad, dureza y resistencia a la corrosión. El material de refuerzo más usado es la fibra de vidrio (la proporción varía entre 20-30%) El 90% de las resinas reforzadas son de poliéster.

Cuando se hace reaccionar un glicol y un isocianato con más de dos grupos funcionales, se forma un polímero termofijo.

Entre los polímeros termofijos encontramos:

- Poliuretanos.
- Amino-resinas.
- Resinas fenólicas.
- Resinas epóxicas.
- Resinas de poliéster.

#### Poliuretanos

Los *poliuretanos* pueden ser de dos tipos, *flexibles* o *rígidos*, dependiendo del poliál usado. Los *flexibles* se obtienen cuando el di-isocianato se hace reaccionar con diglicol, triglicol, poliglicol, o una mezcla de éstos; Los poliuretanos *rígidos* se consiguen utilizando trioles obtenidos a partir del glicerol y el óxido de propileno.

### Urea, resinas y melamina

La *urea* se produce con amoníaco y bióxido de carbono; La *melamina* está constituida por tres moléculas de urea. Tanto la *urea* como la *melamina* tienen propiedades generales muy similares, aunque existe mucha diferencia en sus aplicaciones. A ambas resinas se les conoce como *aminoresinas*. Estos artículos son claros como el agua, fuertes y duros, pero se pueden romper. Tienen buenas propiedades eléctricas.

### Resinas fenólicas

La reacción entre el *fenol* y el *formaldehído* tiene como resultado las resinas *fenólicas* o *fenoplast*. Existen dos tipos de *resinas fenólicas*, los *resols* y el *novolac*.

Los *resols* se obtienen cuando se usa un catalizador básico en la polimerización. El producto tiene uniones cruzadas entre las cadenas que permiten redes tridimensionales termofijas. El *novolac* se hace usando catalizadores ácidos, aquí las cadenas no tienen uniones cruzadas por lo que el producto es permanentemente soluble y fundible.

Las propiedades más importantes de los *termofijos fenólicos* son su dureza, su rigidez y su resistencia a los ácidos. Tienen excelentes propiedades aislantes y se pueden usar continuamente hasta temperaturas de 150°C.

### Resinas epóxicas

Casi todas las *resinas epóxicas* comerciales se hacen a partir del *bisfenol A* (obtenido a partir del fenol y la acetona), y la *epiclorhidrina* (producida a partir del alcohol alílico).

Sus propiedades más importantes son: alta resistencia a temperaturas hasta de 500°C, elevada adherencia a superficies metálicas y excelente resistencia a los productos químicos.

### Resinas poliéster

Estas resinas se hacen principalmente a partir de los anhídridos *maleico* y *ftálico* con *propilenglicol* y uniones cruzadas con *estireno*. El uso de estas resinas con refuerzo de fibra de vidrio han reemplazado a materiales como los termoplásticos de alta resistencia, madera, acero al carbón, vidrio y acrílico, lámina, cemento, yeso, etc.

### **1.1.13 Elastómeros**

El último elemento de esta clasificación es el elastómero en el que su estructura puede ser representada del siguiente modo. Las cadenas están unidas entre sí mediante enlaces químicos verdaderos y no meras interacciones estéricas como en el caso de los polímeros termoplásticos. Un elastómero debe poseer, para ser aplicado, una temperatura de transición vítrea inferior a la ambiente [5]. Es decir, la interacción estérica de las cadenas no debe estar presente y el único vínculo de unión entre estas cadenas debe ser suministrado por los puentes. Esta estructura peculiar es la que proporciona elasticidad al material. Las cadenas pueden ser deformadas ante un esfuerzo externo pero tenderán a volver a su estado inicial por acción de los cross-linkers. En los polímeros termoplásticos, al no existir estas uniones entre cadenas por encima de  $T_g$  el comportamiento es más bien plástico o viscoso.

Los elastómeros tienen sus cadenas enlazadas por fuertes enlaces covalentes. Su estructura les da gran facilidad de deformación por acción de una fuerza externa, y de recuperar inmediatamente el tamaño original al cesar ésta.

Entre los elastómeros más comunes se encuentran:

- NR (caucho natural).
- SBR (caucho sintético de butadieno-estireno).
- EPM-EPDM (cauchos saturados de estireno-propileno).
- CR (cauchos de cloropreno).

No se profundizará mucho en las propiedades de estos materiales ya que nos son importantes para los fines del presente trabajo.

## **1.2 Polietileno**

Una vez definido lo que es el polímero nos enfocaremos a describir al polietileno y sus distintas clasificaciones y propiedades, siendo la densidad una de las más importantes para el desarrollo de este trabajo.

Como se mencionó anteriormente, el monómero para producir polietileno es el etileno, un gas incoloro compuesto de dos átomos de carbono con doble enlace y cuatro átomos de hidrógeno [14]. El arreglo atómico del etileno y el polietileno se puede apreciar en la Figura 1.5.

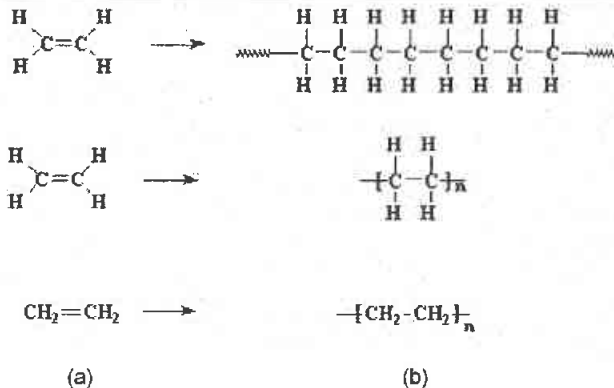


Figura 1.5 Estructura del polietileno a)etileno b)polietileno

Actualmente, son tres los métodos más importantes para producir polietileno: en fase de gas, en solución, en lechada (fase líquida) [11]. 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.

Sin tomar en cuenta el tipo polimerización, 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 Figura 1.5. 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. Enseguida se explicará las variaciones en la densidad del polietileno así como sus diferencias.

### 1.2.1 Tipos de polietileno (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 [11 y 12]. 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. 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*.

Tabla 1.2 Tipos de polietileno

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.



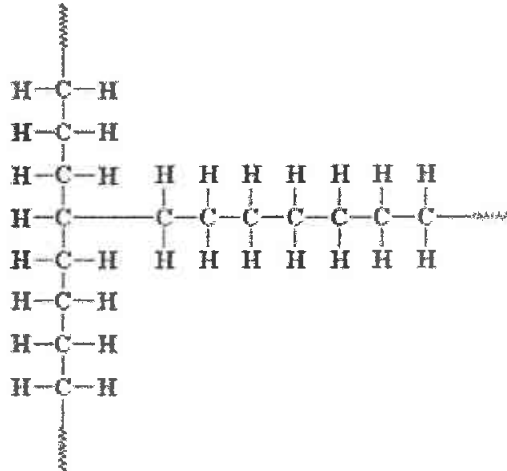


Figura 1.6 Estructura del polietileno de baja densidad

El tipo II es una resina de densidad media producida, ya sea por procesos de baja o alta presión, y los tipos 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 1.7 describe varias estructuras moleculares asociadas a cada tipo de polietileno.

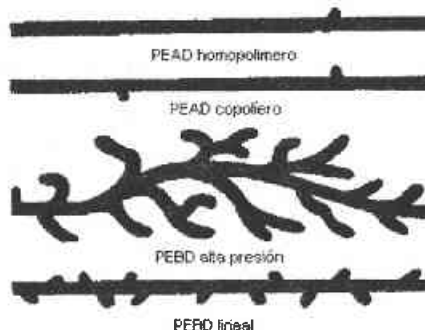


Figura. 1.7 Estructuras de las cadenas de polietileno

### 1.2.2 Cristalinidad

Como ya ha sido explicado, la cristalinidad imparte distintas características mecánicas a los polímeros. A continuación se explica esta característica en el polietileno para entender la diferencia que la densidad imparte a este importante parámetro.

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 1.8. Esta distinción, como ya se mencionó, afecta el comportamiento mecánico del polietileno dándole características muy particulares. Cuando las moléculas se encuentran juntas y en una formación estrecha, el espacio intermolecular es reducido [11 y 12].

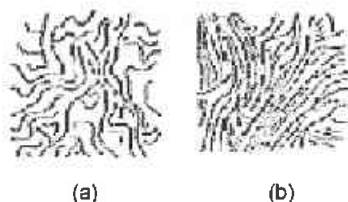


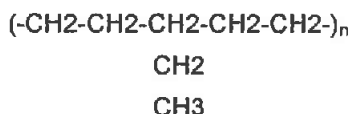
Figura 1.8 Cristalinidad del polietileno (a) región amorfa (b) región cristalina

El polietileno es uno de los numerosos polímeros en el cual, en ciertas regiones la alineación de sus 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 tipos de PEAD pueden contener más del 90% de regiones cristalinas, comparado con el 50% 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 (Tabla 1.3).

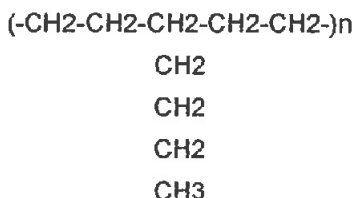
Tabla 1.3 Cristalinidad del polietileno

Polietileno	Cristalinidad %	Densidad gramos/cm <sup>3</sup>	Punto de fusión °C
Alta densidad	80 — 95	0,94 a 0,97	hasta 135
Baja densidad	50 — 75	0,91 a 0,93	105 — 110
Lineal de baja Densidad	70 — 90	0,92 — 0,95	110 — 125

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 conómero 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 [11 y 12]. 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

Esta característica se relaciona con el índice de fluidez del material el cual es un parámetro importante a considerar en su procesamiento. 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 [11 y 12]. 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:

$M_n$  = Peso total de todas las moléculas ÷ Número total de moléculas

$M_w$  = (Peso total de cada tamaño) (respectivo peso) ÷ Peso total de todas las moléculas

El peso molecular es el principal factor que determina las propiedades de durabilidad relativa de un polímero. La resistencia a largo plazo, ductilidad y fatiga (el incremento del peso molecular mejora la resistencia). Los actuales grados de los materiales altamente durables son resultado del alto peso molecular del polímero [11 y 12].

El peso molecular afecta la viscosidad del polímero o su habilidad de fluir en estado fundido. El término "índice de fusión" es la velocidad del flujo medido bajo condiciones particulares estándar – 190°C/2.16 kg. Este término es comúnmente utilizado en la industria del polietileno. El índice del flujo fundido es una guía aproximada del peso molecular y de la procesabilidad del polímero. Este número es inversamente proporcional al peso molecular [11 y 12].

#### 1.2.4 Polietileno de alta densidad

Con los conceptos anteriormente explicados, podemos particularizar al PEAD, el cual es un material termoplástico parcialmente amorfo y parcialmente cristalino (semi-cristalino). El grado de cristalinidad depende del peso molecular, de la cantidad de conómero 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 [12]. 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 difícilmente 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 Polimerización del PEAD

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 [11]. 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.

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 combamiento. 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.

### 1.2.6 Propiedades del PEAD

Una vez descrita la estructura, el procesamiento y otras características del PEAD, hablaremos de algunas de las propiedades que imparten los parámetros antes mencionados a este material, así como sus aplicaciones.

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 [11 y 12]. 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. 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.

Como ya se dijo, 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.

### 1.2.7 Aplicaciones del PEAD

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 [12]. 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, pero puede presentar cierta tendencia a resquebrajarse por intemperización, comúnmente por agentes como detergentes y tensoactivos.

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 desfogues.

### **1.2.8 Reciclabilidad 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 [12]. 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.

### **1.2.9 Resistencia a la abrasión y ataque químico del PEAD**

Una característica importante del PEAD (y de los polímeros en general) es su resistencia a la abrasión así como al ataque químico. Dicha propiedad le permite ser utilizado en distintas aplicaciones siendo una de ellas el uso en tuberías, como es el caso de la resina utilizada en este trabajo.

Los plásticos no presentan corrosión galvánica como los metales, ya que no son conductores [11 y 12]. 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.

Una vez definido el comportamiento interno del PEAD así como algunas de sus características físicas y químicas, explicaremos el comportamiento mecánico que este material debe presentar debido al acomodo en su estructura.

### **1.3 Viscoelasticidad lineal**

El estudio de la viscoelasticidad es esencial en este trabajo ya que el polietileno de alta densidad presenta este comportamiento [18]. Se estudiarán y desarrollarán modelos que describen este fenómeno para después ser aplicados a los resultados obtenidos experimentalmente.

Este tipo de comportamiento se debe a la forma en las que las cadenas del material se acomodan. Como se mencionó en apartados anteriores, el polietileno se considera un material semi-cristalino, ya que contiene zonas amorfas y zonas cristalinas. Las zonas amorfas son cadenas entrelazadas que al aplicarles un esfuerzo, se desenredan provocando que el material fluya. Es debido a esto que se presenta el comportamiento viscoelástico en el PEAD. La relación que existe entre la cantidad de material amorfo y el comportamiento mecánico es directamente proporcional [18, 19 y 20]. Entre mayor índice de material amorfo, se presentará un menor flujo en las cadenas y determinará que tanto crecen las deformaciones con un esfuerzo impuesto, así como la relajación de esfuerzos al someterse a una deformación constante .

Los sólidos elásticos y los fluidos viscosos difieren ampliamente en sus características de deformación. Los cuerpos deformados elásticamente regresan a un estado natural o no-deformado después de remover las cargas aplicadas. Los fluidos viscosos, por el contrario, no poseen dicha recuperación de deformación. También, el esfuerzo elástico está relacionado directamente con la deformación, mientras que el esfuerzo en un fluido viscoso depende (excepto para la componente hidrostática) de la tasa de deformación.

El comportamiento de un material que incorpora una mezcla de las características elásticas y viscosas es conocido como un comportamiento viscoelástico [17,18,19 y 20]. El sólido elástico (Hook) y el fluido viscoso (newtoniano) representan extremos opuestos de un amplio espectro del comportamiento viscoelástico. Estos tipos de materiales son sensibles a la temperatura, pero la siguiente discusión está restringida a condiciones isotérmicas y la temperatura no se incluirá en las ecuaciones.

#### **1.3.1 Modelos viscoelásticos simples**

La viscoelasticidad lineal puede ser convenientemente introducida, como indican ciertos autores [17,19 y 20], desde un punto de vista unidimensional a través de la discusión de modelos mecánicos que retratan la respuesta a la deformación de varios materiales viscoelásticos. Los elementos mecánicos de tales modelos son el resorte lineal de masa despreciable con una constante del resorte  $E$ , y un amortiguador viscoso que tiene una constante viscosa  $\eta$ . Con estos se tratará de modelar el comportamiento del polietileno de alta densidad.



Como se muestra en la Figura 1.9a, la fuerza  $\sigma$  que actúa en el resorte está relacionada con su elongación  $\varepsilon$  por

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1.1)$$

y la ecuación análoga para el amortiguador (Figura 1.9b) esta dada por

$$\sigma = \eta \varepsilon' \quad (1.2)$$

donde

$$\varepsilon' = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Los modelos son más generalizados y los efectos dimensionales despreciables refiriéndose a  $\sigma$  como *esfuerzo* y  $\varepsilon$  como *deformación*, dejando estas cantidades en base a una sola unidad.

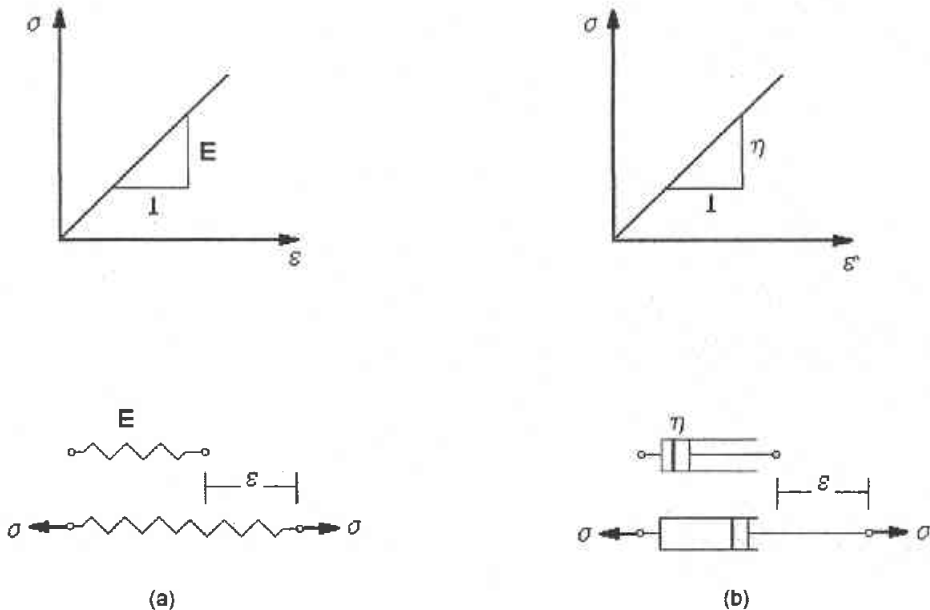


Figura 1.9 (a) Resorte lineal (b) Amortiguador viscoso

El modelo de viscoelasticidad de *Maxwell* es la combinación de un resorte y un amortiguador en serie como se muestra en la Figura 1.10a [17, 19 y 20].

El modelo de *Kelvin* o *Voigt* es un arreglo en paralelo de los elementos antes mencionados y se muestra en la Figura 1.10b [17,19 y 20]. La relación esfuerzo-deformación para el modelo de *Maxwell* es

$$\frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \varepsilon' \quad (1.3)$$

Y para el modelo de *Kelvin* es

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \varepsilon' \quad (1.4)$$

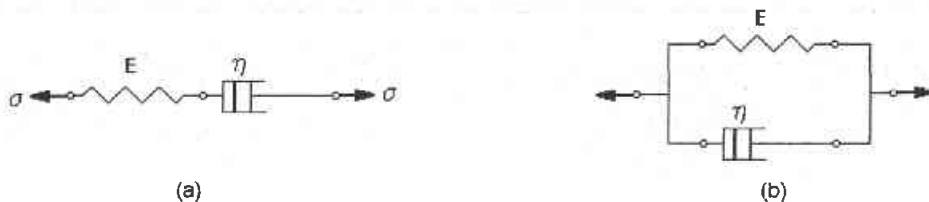


Figura 1.10 Modelos viscoelásticos simples a)Maxwell b)Kelvin

Las ecuaciones para los modelos de *Maxwell* y de *Kelvin* se obtienen a partir de los diagramas mostrados en la Figura 1.10, desarrollando la suma de las deformaciones y los esfuerzos en cada elemento (según sea el caso).

Para obtener resultados más semejantes a la realidad, los modelos simples de *Maxwell* y de *Kelvin* pueden no ser suficientes. Existen modelos más complejos que permiten describir la respuesta de materiales estos de una forma más aproximada a la realidad.

Por ejemplo, un modelo de tres parámetros construido a partir de dos resortes y de un amortiguador, representa la *forma estándar de un sólido lineal* (Figura 1.11a) [17]. Un *modelo viscoso de tres parámetros* formado de 2 amortiguadores y un resorte es mostrado en la Figura 1.11b [17]. Debe recalcar que desde el punto de vista de la forma de las ecuaciones consecutivas, una unidad de *Maxwell* en paralelo con un resorte es análoga a la *forma estándar de un sólido lineal* (Figura 1.11a), y una unidad de *Maxwell* en paralelo con un amortiguador es análoga al *modelo viscoso de tres parámetros* (Figura 1.11b).

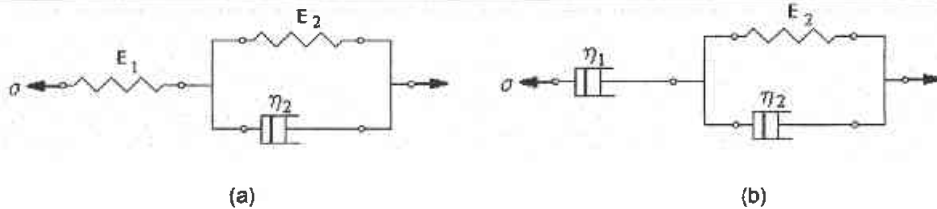


Figura 1.11 a) forma estándar de un sólido lineal b) modelo viscoso de tres parámetros

Como podemos observar un sólido lineal tiene una componente viscosa la cual por cuestiones prácticas se puede despreciar, al igual que la componente elástica de un modelo viscoso y cuando se consideran es debido a que se tiene un efecto viscoelástico [17,19 y 20]. Haciendo un análisis semejante, un nuevo modelo viscoelástico consta de una unidad de *Maxwell* conectada con una unidad de *Kelvin* en serie. Dicho modelo consta de cuatro parámetros formado por dos resortes y por dos amortiguadores (Figura 1.12). En este modelo se puede despreciar el efecto de cualquiera de las dos unidades (*Maxwell* o *Kelvin*) si su efecto es muy pequeño. Existen muchas formas equivalentes para este modelo. El modelo de cuatro parámetros es capaz de responder con los tres patrones de viscoelasticidad básicos. Incorpora una "respuesta elástica instantánea" debido al resorte libre  $E_1$ , "flujo viscoso" causado por el amortiguador libre  $\eta_1$ , y finalmente, "respuesta elástica retrasada" de la unidad de *Kelvin*.

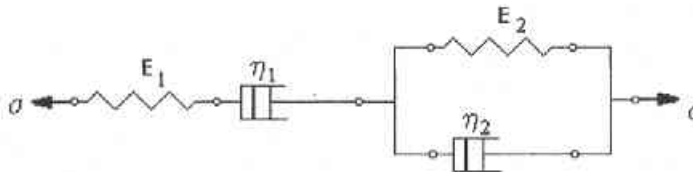


Figura 1.12 Modelo de cuatro parámetros

La ecuación esfuerzo deformación para cualquiera de los dos modelos (de tres o cuatro parámetros) es de la forma general

$$p_2\sigma'' + p_1\sigma' + p_0\sigma = q_2\varepsilon'' + q_1\varepsilon' + q_0\varepsilon \quad (1.5)$$

donde las  $p$ 's y las  $q$ 's son coeficientes obtenidos de la combinación de las constantes de los resortes y de los amortiguadores ( $E$ 's y  $\eta$ 's), y dependen del arreglo específico de los elementos del modelo.

### 1.3.2 Modelos generalizados

El *modelo generalizado de Kelvin* consiste de una secuencia de unidades de *Kelvin*, en un arreglo en serie como se muestra en la Figura 1.13 [17]. La deformación total de este modelo es igual a la suma de la deformación individual de cada una de las unidades de *Kelvin*. En forma de operador la ecuación resultante es

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{\{E_1 + \eta_1 \partial t\}} + \frac{\sigma}{\{E_2 + \eta_2 \partial t\}} + \dots + \frac{\sigma}{\{E_n + \eta_n \partial t\}} \quad (1.6)$$

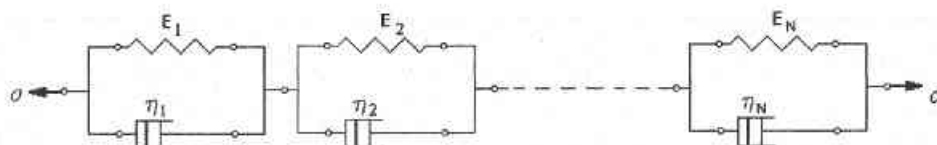


Figura 1.13 Modelo generalizado de Kelvin

De manera similar, una secuencia de unidades de *Maxwell* en paralelo (Figura 1.14) es llamada *modelo generalizado de Maxwell* [17]. Aquí el esfuerzo total es el resultante de los esfuerzos que actúan a través de cada unidad, de lo que se obtiene

$$\sigma = \frac{\varepsilon'}{\{\partial t / E_1 + 1 / \eta_1\}} + \frac{\varepsilon'}{\{\partial t / E_2 + 1 / \eta_2\}} + \dots + \frac{\varepsilon'}{\{\partial t / E_n + 1 / \eta_n\}} \quad (1.7)$$

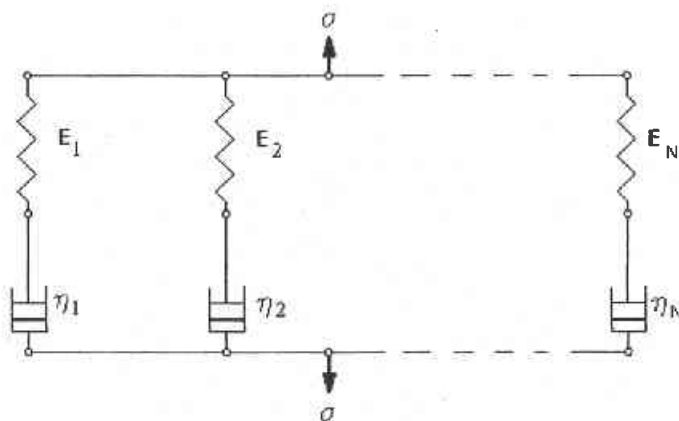


Figura 1.14 Modelo generalizado de Maxwell

Para modelos específicos, las ecuaciones (1.6) y (1.7) resultan ecuaciones de la forma

$$p_0 \sigma + p_1 \sigma' + p_2 \sigma'' + \dots = q_0 \varepsilon + q_1 \varepsilon' + q_2 \varepsilon'' + \dots \quad (1.8)$$

expresada en forma compacta

$$\sum_{i=0}^m p_i \frac{\partial^i \sigma}{\partial t^i} = \sum_{i=0}^m q_i \frac{\partial^i \varepsilon}{\partial t^i} \quad (1.9)$$

### 1.3.3 Fluencia lenta bajo carga constante (creep)

De acuerdo a la bibliografía consultada [17, 19 y 20], los dos experimentos básicos para el comportamiento viscoelástico son, pruebas de *fluencia lenta bajo carga constante* y prueba de *relajación de esfuerzos*. Estas pruebas pueden ser realizadas en tensión (compresión) unidimensional o mediante una prueba de cortante simple. El experimento de *fluencia lenta bajo carga constante* consiste en someter instantáneamente a un muestra de material viscoelástico a un esfuerzo  $\sigma_0$  y mantenerlo constante mientras se miden las deformaciones como función del tiempo (respuesta de *fluencia lenta bajo carga constante*).

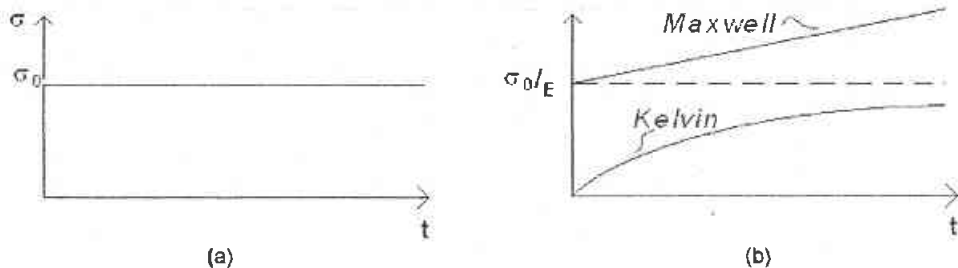


Figura 1.15 Fluencia lenta bajo carga constante a) carga para fluencia lenta b) respuesta para fluencia lenta

#### Modelo de Maxwell

Al desarrollar la ecuación del modelo de *Maxwell* con esfuerzo constante se obtiene lo siguiente

$$\frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \varepsilon' = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{modelo de Maxwell}) \quad (1.10)$$

como

$$\sigma = \text{cte}$$

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} = 0$$

Y la ecuación 1.10 se reduce a

$$\frac{\sigma_0}{\eta} = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

al resolver esta ecuación [21]

$$\varepsilon(t) = \int \frac{\sigma_0}{\eta} dt = \frac{\sigma_0}{\eta} t + C_1 \quad (1.11)$$

Como se ve en la Figura 1.15b cuando el tiempo es igual a cero, la deformación está dada por  $\sigma_0 / E$  lo cual nos sirve de valor inicial para la ecuación 1.11. Al definir este valor inicial la constante  $C_1$  tiene un valor de

$$C_1 = \frac{\sigma_0}{E}$$

Y la ecuación del modelo de Maxwell para esfuerzo constante resulta

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \frac{\sigma_0}{E} \quad (1.12)$$

Se puede ver que la ecuación 1.12 es la ecuación de una recta que interseca al eje "y" en  $\sigma_0 / E$  y tienen una pendiente de  $\sigma_0 / \eta$ .

### Modelo de Kelvin

Por otro lado, el modelo de *Kelvin* tiene un comportamiento distinto en la prueba de fluencia lenta bajo carga constante. Al desarrollar este modelo con esfuerzo constante se obtiene

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \varepsilon' = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (1.13)$$

como

$$\sigma = cte.$$

la ecuación 1.13 queda

$$\sigma_0 = E \cdot \varepsilon + \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad \frac{\sigma_0}{\eta} = \frac{E \cdot \varepsilon}{\eta} + \frac{d\varepsilon}{dt}$$

$$= \frac{1}{\tau} \varepsilon + \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} \quad (1.14)$$

donde

$$\tau = \frac{\eta}{E}$$

Como la ecuación es de la forma "y' + p(t) y = g(t)" [21], el factor integrante se obtiene

$$\mu(t) = \exp \int p(t) \cdot dt$$

En la ecuación 1.14 se observa que "p(t) = 1/τ" y "g(t) = σ<sub>0</sub> / η", por lo que el factor integrante es

$$\mu(t) = \exp \int p(t) \cdot dt = \exp \int \frac{1}{\tau} \cdot dt = \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.15)$$

Se multiplica la ecuación 1.14 por el factor integrante para encontrar la solución de la ecuación diferencial

$$\frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon + \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.16)$$

Se simplifica el lado izquierdo de la ecuación de la siguiente manera

$$\frac{1}{\tau} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon + \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) = \frac{d}{dt} \left( \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon \right) \quad (1.17)$$

y se sustituye en la ecuación 1.16

$$\frac{d}{dt} \left( \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon \right) = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.18)$$

desarrollando se obtiene

$$\begin{aligned} \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon &= \frac{\sigma_0}{\eta} \int \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot dt = \frac{\sigma_0}{\eta} \cdot \tau \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) + C_2 = \frac{\sigma_0 \eta}{\eta E} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) + C_2 \\ &= \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) \cdot \varepsilon = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \exp\left(\frac{t}{\tau}\right) + C_2 \end{aligned}$$

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} + C_2 \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (1.19)$$

Con la condición inicial

$$\varepsilon(0) = 0$$

$$C_2 = -\frac{\sigma_0}{E}$$

Y la ecuación 1.19 queda

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right) \quad (1.20)$$

Esta ecuación representa una función exponencial donde la pendiente decrece

### 1.3.4 Relajación de esfuerzos

Este es el segundo experimento básico para un material viscoelástico marcada en las fuentes consultadas [17, 19 y 20]. En el experimento de *relajación de esfuerzos* una deformación instantánea  $\varepsilon_0$  es impuesta y mantenida a una muestra de material viscoelástico mientras se miden los esfuerzos (*relajación de esfuerzos*) como función del tiempo. Como ya se mencionó, este experimento puede realizarse en una prueba de tensión (compresión) unidimensional o mediante una prueba de cortante simple.

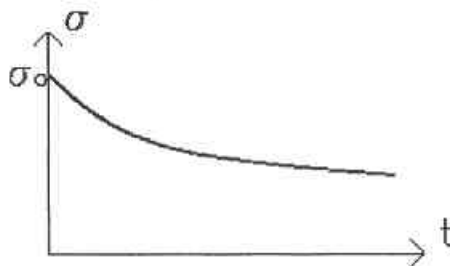


Figura 1.16 Relajación de esfuerzos para el modelo de *Maxwell*



### Modelo de Maxwell

Si desarrollamos la ecuación del modelo de Maxwell con deformación constante obtenemos

$$\frac{\sigma'}{E} + \frac{\sigma}{\eta} = \varepsilon' = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{modelo de Maxwell}) \quad (1.21)$$

como

$$\varepsilon = cte$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$$

por lo que la ecuación (1.21) queda

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} = 0$$

$$\frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\tau} = 0 \quad (1.22)$$

recordemos que

$$\tau = \frac{\eta}{E}$$

Al separar las variables [21] para integrar la ecuación 1.22 se obtiene

$$\int \frac{d\sigma}{\sigma} = -\frac{1}{\tau} \int dt =$$

$$\ln |\sigma| = -\frac{1}{\tau} t + C_3$$

$$\sigma(t) = C_3 \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau} t\right) \quad (1.23)$$

cuando

$$\sigma(0) = \varepsilon_0 \cdot E$$

por lo que  $C_3 = \varepsilon_0 \cdot E$

Con esta condición inicial la ecuación 1.23 queda

$$\sigma(t) = \varepsilon_0 \cdot E \cdot \exp\left(-\frac{1}{\tau} t\right) \quad (1.24)$$

Se observa que la ecuación 1.24 es una función exponencial decreciente

### Modelo de Kelvin

En el caso de la ecuación del modelo de Kelvin para deformación constante, el desarrollo para esta condición es más sencillo y se muestra a continuación.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \varepsilon' = E \cdot \varepsilon + \eta \cdot \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (\text{modelo de Kelvin}) \quad (1.25)$$

como

$$\varepsilon = cte$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$$

con lo que la ecuación 1.25 se reduce

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_0 \quad (1.26)$$

En este caso, la ecuación 1.26 representa un valor constante que no cambiará cuando el tiempo aumente.

Estos modelos serán utilizados en el capítulo cuatro para analizar los resultados obtenidos en el método experimental y determinar si algunos de los modelos presentados puede ser utilizado para modelar el comportamiento del polietileno de alta densidad.

# Capítulo II

Normas aplicables a resinas de PEAD para tuberías

## **2.1 Tuberías plásticas**

Antes de abordar el tema de las normas aplicables a resinas de PEAD para tuberías, es importante dar una breve descripción de cómo se clasifican las tuberías, en base al tipo de servicio que prestan, a los materiales con las que son fabricadas y de más información importante para este trabajo.

En la actualidad, la importancia que tienen las tuberías en nuestra sociedad es infinita. Gracias a éstas, podemos transportar agua, residuos, líneas telefónicas y eléctricas, combustibles, etc. A pesar de ello, suelen darse por sentado este tipo de servicios, "no sabemos que están ahí si no es porque fallan". La utilización de tuberías no es algo nuevo, en Europa, Asia e incluso en Centro y Sudamérica, se han encontrado vestigios de este tipo de servicios utilizados por civilizaciones antiguas.

Las tuberías por lo general están enterradas, lo cual genera esfuerzos en ellas, esto depende de la carga que aplica el material con el que se entierran. Esta variación depende del tipo de material con que se confinan. Algunos ejemplos se estos materiales son: grava, arena, materiales orgánicos, etc [23 y 24]. Parámetros como el tipo de material, densidad del material, humedad contenida, son utilizados por los ingenieros para determinar los efectos que se tendrán sobre las tuberías.

Con respecto a las tuberías, según los materiales con las que se fabrican suelen clasificarse en dos tipos: rígidas y flexibles [23 y 24]. Una tubería flexible es aquella en la que se espera una deformación de por lo menos 2%. Si no se cumple con este criterio las tuberías se consideran rígidas. Tuberías de concreto son ejemplos de tuberías rígidas, mientras que las tuberías de materiales termoplásticos se consideran flexibles, como es el caso de la resina de PEAD que se estudia en este trabajo. Como es de esperarse, cada uno de estos tipos de materiales, tiene distintas limitaciones las cuales deben ser consideradas por el ingeniero de diseño.

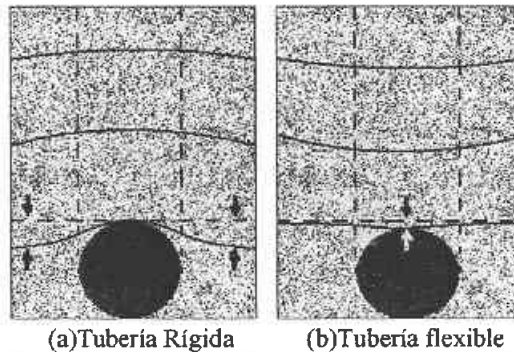


Figura 2.1 Diferencia entre tuberías rígidas y flexibles

De acuerdo con las fuentes consultadas [23 y 24], los cuatro principales termoplásticos usados en tuberías son los siguientes:

- PVC (cloruro de polivinilo)
- PE (polietileno)
- ABS (Copolímero acrilonitrilo-butadieno-estireno)
- PB (polibutileno)

Existen otros termoplásticos utilizados para tuberías, pero su uso es muy reducido y en general son para aplicaciones especiales.

También las tuberías de materiales termofijos son consideradas flexibles. Este tipo de tuberías generalmente son reforzadas con fibras, y el tipo de fibra es normalmente de vidrio tipo E. Algunos termofijos usados para tuberías son:

- Resinas epóxicas
- Resinas fenólicas
- Poliéster

Las tuberías plásticas son consideradas flexibles como se mencionó antes, y tienen una relación favorable con el material donde son enterradas reduciendo concentraciones de esfuerzos.

Para el desempeño estructural de las tuberías se clasifican de acuerdo al tipo de cargas a las que estarán sometidas durante el servicio. Una de estas clasificaciones son las tuberías que trabajan por gravedad, esto quiere decir que una pendiente en la tubería provocará que el material que conduce fluya sin necesidad de ser bombeado. El otro tipo de tubería es aquella que trabaja con presión interna. Si el tubo no está 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, por lo cual, las cargas a las que estará sujeto el tubo serán aquellas provenientes del suelo que lo confina así como a las cargas provenientes de vehículos que transitan sobre la superficie libre. Muchas tuberías de diámetro pequeño para transportar gas son plásticas, mientras que tuberías plásticas corrugadas son utilizadas extensamente para drenaje.

Otra forma de clasificar a las tuberías es por su resistencia al ataque químico y a la abrasión [23 y 24]. Debido a que esta clasificación no tienen relación con este trabajo no se ampliará más su descripción. Las tuberías plásticas suelen utilizarse en ambientes agresivos debido a que presentan una buena resistencia a la abrasión causada por sedimentos en el flujo y a la corrosión ocasionada por químicos agresivos.

A continuación, se enlistan algunas de las ventajas que presentan las tuberías plásticas:

- Son ligeras
- Baja resistencia al flujo
- Larga vida de servicio
- Fácil fabricación
- Se pueden unir fácilmente en las obras
- Pueden ser fabricadas de varias formas (corrugaciones, filetes, costillas, etc.)

Las tuberías plásticas, como es de esperarse, también presentan desventajas las cuales se mencionan a continuación:

- Baja resistencia mecánica
- Bajos módulos de elasticidad
- Son sensibles a la temperatura (altas y bajas)
- Razón de Poisson alta
- Altos coeficientes de expansión térmica

Las tuberías plásticas presentan propiedades mecánicas únicas como es la *fluencia lenta bajo carga constante* y *relajación de esfuerzos*, propiedades de las cuales se habló en el capítulo uno. La *fluencia lenta bajo carga constante* se presenta hasta la fractura o el equilibrio, reduciendo las propiedades mecánicas del material. En el fenómeno de la *relajación de esfuerzos*, se presenta hasta un esfuerzo de equilibrio menor al esfuerzo inicial, sin afectar las propiedades mecánicas del material.

En este trabajo, se analizará el comportamiento mecánico de los dos tipos de resinas utilizados en tuberías plásticas de PEAD antes mencionados. Una resina pertenece a tubos que trabajan por gravedad y la otra pertenece a tubos que trabajan con presión interna.

Debido a la importancia del PEAD en tuberías para drenajes hoy en día existe una buena cantidad de normas internacionales que especifican características y pruebas que deben cumplir las resinas que se emplean para fabricar dichas tuberías. Entre las normas más referidas se encuentran las de la American Society for Testing of Materials (ASTM).

Cabe destacar que las normas ASTM son aceptadas en México de manera prácticamente dogmática lo cual resulta poco conveniente debido a que existen normas provenientes de otros países (tales como Canadá, Inglaterra, Alemania, etc) que no coinciden con las ASTM. En particular lo que se refiere a drenajes por gravedad se han identificado severas discrepancias entre las normas ASTM, CSA, WIS. Dichas discrepancias han motivado en buena medida el presente

trabajo ya que se considera que aceptar una u otra norma implica la realización de estudios específicos que permitan determinar los diversos fenómenos involucrados en las pruebas que recomienda cada norma.

A pesar de las discrepancias encontradas entre las normas canadienses, inglesas y las ASTM, es claro que son éstas últimas las más abundantes y más accesibles en México, en particular para la caracterización de PEAD para tuberías existen una gran cantidad de normas ASTM que merecen ser revisadas.

Las siguientes normas ASTM explican las características que deben cumplir los distintos tipos de resinas utilizadas en tuberías, dependiendo de su uso. Es importante mencionar que dichas normas sólo cuantifican las consecuencias de ciertos fenómenos presentados en estos materiales y no explican tales fenómenos.

## **2.2 Prueba de resistencia a la ruptura por esfuerzo ambiental ESCR (Environmental Stress Crack Resistance)**

Designación ASTM: F1248-96

Esta prueba determina la resistencia al esfuerzo de falla (grieta) de muestras de tubos de polietileno sometidas a compresión y deformación bajo la presencia de un agente activo a temperatura elevada en la superficie. El valor ESCR es un número en horas de falla indicando la resistencia de los tubos de polietileno a agrietarse bajo un esfuerzo. Se produce la falla cuando se presenta una grieta en la superficie la cual se puede observar a simple vista (el crecimiento de una muesca controlada no es una falla).

Para esta prueba, una anillo muestra de la tubería de polietileno con una imperfección localizada es expuesto a un agente activo a temperatura elevada mientras se comprime y se deforma entre placas paralelas. El tiempo en que se produce la falla por agrietamiento debe ser tomado. El sujetador debe de constar de placas paralelas de cuando menos 1.2 veces el diámetro nominal del tubo. Debido a las condiciones debe de ser de un metal resistente a la corrosión (acero inoxidable por ejemplo). Las placas deben de tener un espaciamiento suficiente entre los orificios donde pasaran espárragos para comprimir el tubo con tuercas. La siguiente Figura 2.2 ilustra la forma del sujetador. Las dimensiones del sujetador varían de acuerdo al tubo que será probado.

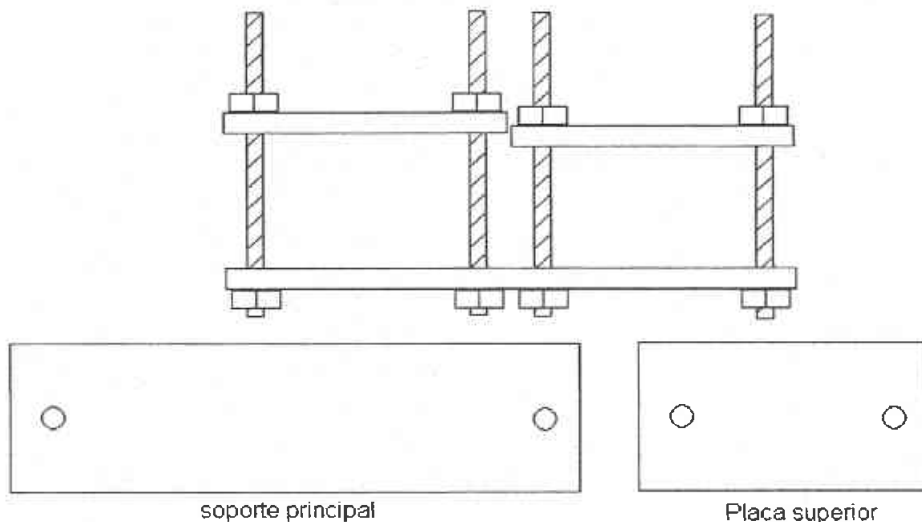


Figura 2.2 Sujetador ESCR



El agente activo debe de ser una solución de nonylphenoxy poly(ethyleneoxy) al  $25 \pm 5\%$  y agua destilada al  $75 \pm 5\%$ . La temperatura del baño debe de mantenerse a  $122 \pm 3.6$  °F.

El anillo para comprimir debe de tener una longitud del 30 % del diámetro nominal exterior del tubo con una tolerancia de  $+0.125$  in. Con la muestra lista se hace una muesca una hora antes de la prueba en la parte donde la pared es más delgada. Esta muesca debe de ser en el centro del anillo paralela a las caras del tubo como se ilustra en la Figura 2.3. La profundidad de la muesca depende del tamaño nominal del tubo (20% del espesor de la pared).

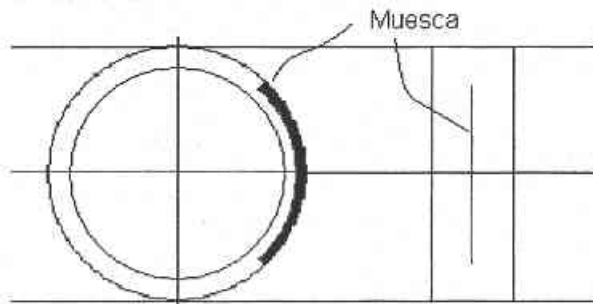


Figura 2.3 Ubicación de la muesca en el anillo

Se coloca el anillo en las placas paralelas con la muesca centrada en un lado y se comprime hasta que la distancia entre las placas paralelas sea de tres veces el espesor más delgado de la pared del tubo (Figura 2.4). Se coloca en el agente activo  $30 \pm 5$  min. después de haberse iniciado la compresión.

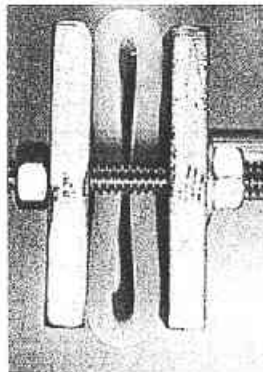


Figura 2.4 Compresión prueba ESCR

El instante de la inmersión es el tiempo cero para determinar la falla. Cuando se presente la falla se debe registrar el tiempo así como la ubicación de ésta (en la muesca, entre la muesca y la cara, del lado opuesto a la muesca, etc. Figura 2.5). El tiempo indica el valor ESCR como ya se mencionó. Se recomienda hacer más de una prueba por cuestiones estadísticas.

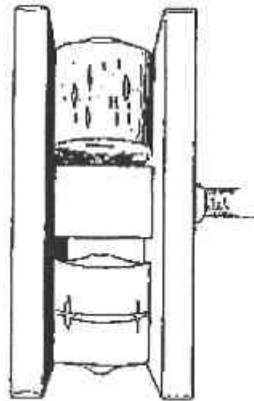


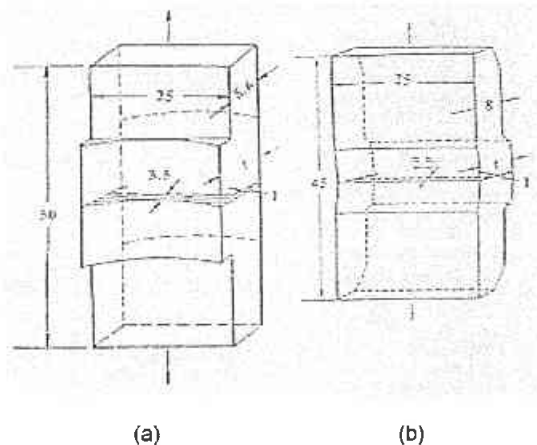
Figura 2.5 Fallas prueba ESCR

**2.3 Prueba tensil con muesca para medir la resistencia del crecimiento lento de grieta en tubos de polietileno y resinas (Notch Tensile Test to Measure the Resistance to Slow Crack Growth of Polyethylene Pipes and Resins)**

Designación ASTM: F1473-97

Este método de prueba determina la resistencia de materiales de polietileno al crecimiento lento de grietas bajo condiciones específicas. La prueba se realiza generalmente a 80°C y a un esfuerzo de 2.4 MPa. Para esta prueba se debe realizar una muesca en la muestra. La falla se da cuando el material se vuelve frágil, esto puede ser a temperaturas menores a 80°C y a esfuerzos menores. La prueba se puede hacer a placas moldeadas por compresión y para tubos de 16 mm y más grandes. La falla frágil se presenta cuando el tubo presenta una deformación permanente en el material (no visible a simple vista) en el área de fractura. La extensión lenta de la grieta con el tiempo es el crecimiento lento de grieta.

Se toma una muestra del tubo con una orientación específica relativa a la extrusión o al moldeo de las placas en compresión (Figura 2.6). Se hace la muesca (la profundidad de ésta depende de las dimensiones de la muestra) con precisión y se somete a un esfuerzo de tensión constante a temperaturas elevadas al aire libre (la temperatura elevada y la muesca crean condiciones aceleradas). El tiempo en que se produce la falla debe ser medido, y depende de los siguientes parámetros de la prueba: temperatura, esfuerzo y profundidad de la muesca, por lo que deben ser especificados. La muestra debe de tener dos tipos de muescas, una principal y dos laterales, esto se observa en la Figura 2.6.



Eje de tensión paralelo a la extrusión

Eje de tensión perpendicular a la extrusión

Figura 2.6 Probetas con muesca

Se sugiere utilizar una máquina que produzca la carga mediante una palanca, pero también se pueden aplicar pesos muertos directamente para producir una carga constante (la carga debe de ser cuidadosamente para evitar choques en la muestra). La temperatura se debe controlar en un rango de  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  con respecto a la temperatura establecida.

La muestra debe ser sujeta a la temperatura de la prueba una hora antes de cargarla (el tiempo entre la creación de la muesca y la realización de la prueba no es importante). Se reportan los parámetros antes mencionados (tiempo, geometría, esfuerzo) para terminar la prueba.

Es importante mencionar que existe otra norma para medir el crecimiento lento de grietas en tuberías de polietileno con muesca (Slow crack resistance of notched polyethylene pipe, designación ASTM F1474-98). Debido a que esta norma aplica sólo a tubos y a la similitud con la norma "Prueba tensil con muesca para medir la resistencia del crecimiento lento de grieta en tubos de polietileno y resinas (Notch Tensile Test to Measure the Resistance to Slow Crack Growth of Polyethylene Pipes and Resins)", no tiene gran relevancia para este trabajo.

### **2.4 Prueba con muesca y esfuerzo constante en ligamento NCLS (Notched Constant Ligament-Stress)**

Designación ASTM: F2136-01

La finalidad de esta prueba es determinar la resistencia al crecimiento lento de grietas bajo un esfuerzo constante en ligamentos o cadenas de resinas de PEAD o en tubos corrugados de PEAD, esto en un ambiente acelerado. La traducción de la prueba es "esfuerzo constante en ligamentos con una muesca".

Esta prueba esta pensada para realizarse en PEAD con un índice de fusión bajo y rango de densidad determinada por la AASHTO Standard Specification M294. En este método de prueba se mide el tiempo de falla de acuerdo al nivel de esfuerzo aplicado a las cadenas de acuerdo a la muestra.

Se somete a una probeta con una muesca (Figura 2.7) a un esfuerzo constante en los ligamentos en presencia de un agente superficial activo a temperaturas elevadas.

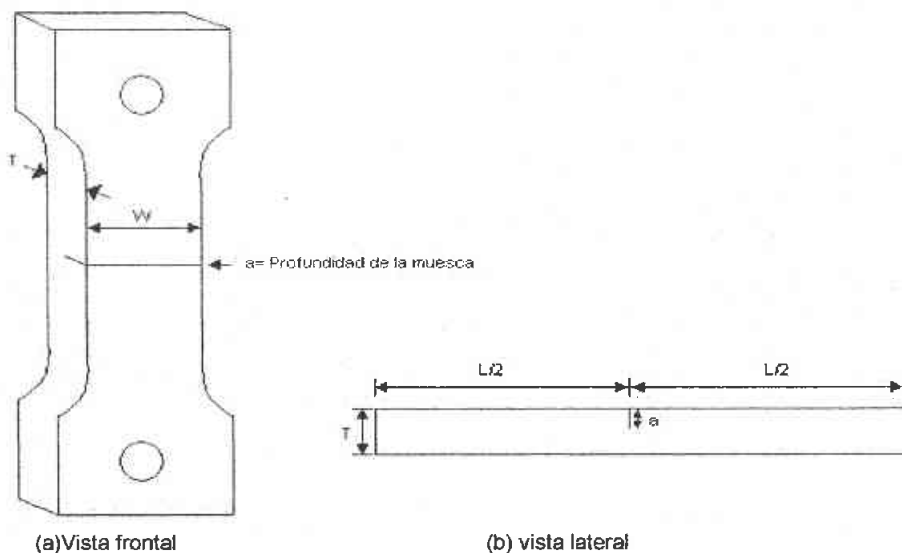


Figura 2. 7 Probeta para la prueba NCLS  
 $A = (t-a) \times W$

Se requiere de una cortador hacer los orificios en las probetas. Las dimensiones de está se muestran en la Figura 2.8. También requiere de un aparato de pruebas esfuerzo-fractura, aunque también se menciona que se pueden usar cargas muertas que produzcan esfuerzos constantes en los ligamentos.

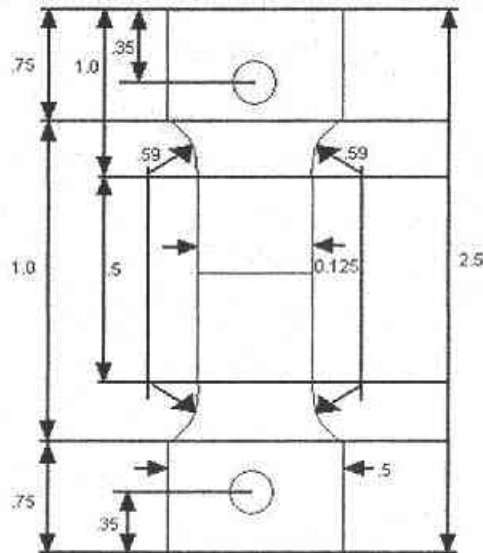


Figura 2.8 Dimensiones de la probeta para la prueba NCLS (pulgadas)

La sustancia con la que será bañada la probeta debe de estar a una temperatura de  $122\text{ }^{\circ}\text{F} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{F}$  ( $50^{\circ}\text{C}$ ). En lo que respecta a la muestra tiene que hacerse con una navaja que tenga un espesor de .2 a .3 mm. Para medir la profundidad de la muesca se pide utilizar un microscopio equipado con un micrómetro.

Para evitar la orientación inducida por la extrusión en tubos, se recomienda cortar piezas longitudinales con un peso determinado y fundirlos para moldearlos con presión después y así evitar este efecto. Para resinas vírgenes los pellets también deben de ser moldeados bajo presión.

El corte de la muesca debe de ser perpendicular a la aplicación de la carga. Para calcular la carga en base al esfuerzo requerido se usa lo fórmula

$$\text{Carga} = (T - a) W S \quad (2.1)$$

donde

S = esfuerzo específico en el ligamento

T = espesor

A = profundidad de la muesca

W = ancho donde se encuentra la muesca

Para el cálculo de la esfuerzo se debe considerar un esfuerzo de fluencia de 27.5 Mpa

Para la prueba, primero se sumerge la probeta en la solución por un periodo de 30 minutos, después se carga la probeta con la carga calculada con un periodo de 5 a 10 segundos sin provocar impacto. Inmediatamente después se comienza a tomar el tiempo hasta la falla.

Se deben hacer 5 pruebas para ser comparadas al final. El promedio aritmético de las 5 probetas deberá ser reportado como el valor NCLS de la resina o de la tubería probada.

### **2.5 Prueba para bases de diseño hidrostático para tuberías de materiales termoplásticos HDB (Hydrostatic design Basis for Thermoplastic Pipe Materials)**

Designación ASTM: D 2837-98

Esta prueba describe el procedimiento para obtener las bases del diseño hidrostático para materiales termoplásticos usados en tuberías, evaluando el esfuerzo de ruptura con pruebas de materiales probados. Más de 3200 datos obtenidos de tuberías termoplásticas y ensambles de tuberías probadas con agua, gas natural y aire comprimido han sido analizadas. Esta prueba se puede aplicar a cualquier material termoplástico para tuberías conocido para cualquier temperatura práctica.

Las bases para el procedimiento experimental están dadas por la prueba *tiempo de falla para tuberías plásticas bajo presión interna constante* la cual tiene la designación ASTM D1598-97. Está consiste en determinar el tiempo de falla para tuberías de resinas termoplásticas y resinas termoestables reforzadas bajo presión interna constante. La *falla* se determina cuando hay una pérdida continua en la presión, la cual puede ser por: fallas dúctiles en el material, ruptura, filtración, etc.

La prueba *tiempo de falla para tuberías plásticas bajo presión interna constante* consiste en someter muestras de tubería a una presión interna constante en un ambiente controlado. Este ambiente controlado puede ser acompañado por inmersiones de la muestra en agua a temperatura controlada o en un baño de aire. Se mide el tiempo de falla. Con esto se obtienen una relación *esfuerzo contra falla* la cual se utiliza en la prueba HDB.

Las bases del diseño hidrostático se tienen que hacer para cada tipo de material y a distintas temperaturas (40°C , 50°C, 60°C, 80°C, 100°C, y 23°C) y se deben hacer las siguientes pruebas.

- Resistencia hidrostática a largo plazo para 100 000 h
- Resistencia hidrostática a largo plazo para 50 años
- Esfuerzo que provocará el 5% de expansión para 100 000 h

Se deben obtener los valores de estas pruebas, y después manipularse matemáticamente para encontrar resultados para los tiempos propuestos. Una vez realizadas, se calcula la resistencia hidrostática para 100 000 h y para 50 años, y para determinar el HDB se comparan con la siguiente tabla.



Tabla 2.1 Categorías de HDB

Rango del valor de la resistencia hidrostática calculada		HDB	
PSI	MPa	PSI	MPa
190 a 230	1.31 a 1.59	200	1.38
240 a 290	1.65 a 2.00	250	1.72
300 a 370	2.07 a 2.55	315	2.17
380 a 470	2.62 a 3.24	400	2.78
480 a 590	3.31 a 4.07	500	3.45
600 a 750	4.14 a 5.17	630	4.34
760 a 950	5.24 a 6.55	800	5.52
960 a 1190	6.62 a 8.20	1000	6.89
1200 a 1520	8.27 a 10.48	1250	8.62
1530 a 1910	10.55 a 13.17	1600	11.03
1920 a 2390	13.24 a 16.48	2000	13.79
2400 a 3010	16.55 a 20.75	2500	17.24
3020 a 3820	20.82 a 26.34	3150	21.72
3830 a 4790	26.31 a 33.03	4000	27.58
4800 a 6030	33.09 a 41.58	5000	34.47
6040 a 6800	41.62 a 46.85	6300	43.41
6810 a 7910	46.92 a 54.50	7100	48.92

El procedimiento difiere un poco dependiendo del tipo de material que se este analizando.

## **2.6 Caracterización de las resinas empleadas en los tubos**

Los tubos estudiados en este trabajo pertenecen a la compañía ABS mexicana S.A. de C.V., la cual fabrica los tubos con PEAD con las características descritas en el capítulo anterior. Dicha compañía recibe la resina virgen de distintos proveedores, los cuales adjuntan una hoja de propiedades de la resina, como son densidad, índice de fluidez, etc. Algunas de estas propiedades serán utilizadas más adelante en este trabajo para calcular algunos valores, como son el esfuerzo máximo y esfuerzo último.

A continuación se presentan las tablas con las propiedades de las resinas vírgenes de cada uno de los proveedores de PEAD.

**Proveedor:** BP SOLVAY POLYETHYLENE

**Tipo:** Fortiflex CP52-35

**Notas:** Polietileno de alta densidad copolimerizado, especialmente desarrollado para aplicaciones en tuberías corrugadas de diámetros grandes.

Tabla 2.2 Propiedades de resina virgen Fortiflex CP52-35

Propiedad	Método de prueba ASTM	Valores típicos Unidades Sistema inglés	Valores típicos Unidades S.I
Densidad	D 4883	-	.952 g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (fusión)	D 1238	-	.35 g/10 min
Esfuerzo de tensión			
@Fluencia (2 in/min)	D 638	3900 psi	26.9MPa
@Último (2 in/min)		4000 psi	27.6 MPa
Elongación			
@Fluencia (2 in/min)	D 638	9.0%	9.0%
@Último (2 in/min)		850%	860%
SP-NCTL ESCR	D 5397	-	24 h
Dureza (Shore D)	D 2240	64	64
Temperatura de transición vítrea	D 746	-103°F	-75 °C

**Proveedor:** BP SOLVAY POLYETHYLENE

**Tipo:** Fortiflex B53-35H-011

**Notas:** Polietileno de alta densidad copolimerizado, desarrollado para aplicaciones de moldeado por soplado. Este producto es recomendado para usar en aplicaciones que requieren una combinación de alta resistencia de carga y un buen grado ESCR.

Tabla 2.3 Propiedades de resina virgen Fortiflex B53-35H-011

Propiedad	Método de prueba ASTM	Valores típicos Unidades Sistema inglés	Valores típicos Unidades S.I
Densidad	D 4883	-	.951 g/cm <sup>3</sup>
Índice de fluidez (fusión)	D 1238	-	30 g/10 min
Esfuerzo de tensión			
@Fluencia (2 in/min)	D 638	4000 psi	27.6 MPa
Elongación			
@Último	D 638	740%	740%
Módulo de flexión	D 790	180000	1241 MPa
Izod con muesca resistencia de impacto	D 256	6.3 ft-lb /in	0.3 N/m
Dureza (Shore D)	D 2240	64	64
Temperatura de transición vítrea	D 746	-103°F	-75 °C
Temperatura de deflexión @ 66psi	D 648	162 °F	72 °C

Proveedor: PETROTHENE

Tipo: LH 7350 grado de moldeado por soplado

Notas: Esta resina de polietileno presenta un excelente balance entre dureza y resistencia al esfuerzo ambiental de grietas. Las aplicaciones típicas incluyen botellas para cloro, detergentes y químicos domésticos.

Tabla 2.4 Propiedades de resina virgen LH 7350

Propiedad	Valor nominal	Unidades	Método de prueba ASTM
Densidad	.953	g/cm <sup>3</sup>	D 1505
Índice de fluidez	.35	g/10 min	D 1238
Esfuerzo de tensión @ ruptura	3900	psi	D 638
Elongación @ ruptura	900	%	D 638
Módulo de flexión	185000	psi	D 790
Impacto tensil	120	Ft-lb/in <sup>2</sup>	D 1822
Temperatura de transición vítrea	-76	°C	D 746
Temperatura de deflexión por calor @ 66psi	74	°C	D 648
Dureza (Shore D)	66		D 2240
ESCR	50	hrs	D 1693

Proveedor: ALATHON

Tipo: L 5332CP grado extrusión de hoja y perfil

Notas: Entre las aplicaciones típicas se encuentran, tuberías corrugadas, conductos y perfiles extruidos.

Tabla 2.5 Propiedades de resina virgen L 5332CP

Propiedad	Valor nominal	Unidades	Método de prueba ASTM
Índice de fluidez	.32	g/10 min	D 1238
Densidad	.953	g/cm <sup>3</sup>	D 1505
Esfuerzo de tensión @ fluencia	3250	psi	D 638
Elongación @ fluencia	8	%	D 638
Esfuerzo de tensión @ ruptura	5300	psi	D 638
Elongación @ ruptura	800	%	D 638
Módulo de flexión	131000	psi	D 790
Impacto tensil	285	Ft-lb/in <sup>2</sup>	D 1822
Temperatura de deflexión por calor @ 66psi	62	°C	D 648
Dureza (Shore D)	66		D 2240
NCTL	24	hrs	AASHTO M294

**Proveedor:** FINATHENE

**Tipo:** CD-522

**Notas:** Resina de PEAD para tuberías corrugadas, también usado para drenaje.

Tabla 2.6 Propiedades de resina virgen CD-522

Propiedades	Valores típicos	Método ASTM
Índice de fluidez, g/10 min -190 °C/ 2.16 kg	.25	D 1238
-190 °C/ 21.6 kg (HLMI)	20	
Densidad, g/cm <sup>3</sup>	.952	D 792
Punto de fusión, °F	263	D 3417
Esfuerzo de tensión @ fluencia, psi	3800	D 638 tipo IV Muestra, 2 in/min
Elongación @ Ruptura, %	600	D 638 tipo IV Muestra, 2 in/min
Módulo de flexión @ 2% deformación, psi	190000	D790
Izod con muesca resistencia de impacto, lb-ft/in	4.0	D 256, muestra 1/8 " de espesor
SP- NCTL, hrs	24	D 5397, 15% esfuerzo de fluencia
ESCR , hrs	*100	D 1697 condición B 10% IGEPAL
	*600	D 1697 condición B 100% IGEPAL
Celda de clasificación ASTM	335520	D 3350

No hay referencia para esta información debido a que fue proporcionada a ADS mexicana por los distintos proveedores de polietileno de alta densidad, y ADS la envió vía fax al Centro tecnológico Aragón de donde fue obtenida.

## **2.7 Tablas de propiedades del PEAD**

Con la finalidad de detallar más la información sobre el PEAD en un plano de aplicación se presentan las siguientes tablas encontradas en las fuentes consultadas [13], la cuales muestran distintas propiedades de interés para la aplicación de este material.

Tabla 2.7 Propiedades eléctricas del PEAD

<b>Propiedades Eléctricas</b>	
Constante Dieléctrica @1MHz	2,3-2,4
Factor de Disipación a 1 MHz	$1-10 \times 10^{-4}$
Resistencia Dieléctrica ( kV mm <sup>-1</sup> )	22
Resistividad Superficial ( Ohm/sq )	$10^{13}$
Resistividad de Volumen ( Ohmcm )	$10^{15}-10^{18}$

Tabla 2.8 Propiedades físicas del PEAD

<b>Propiedades Físicas</b>	
Absorción de Agua - en 24 horas ( % )	<0,01
Densidad ( g cm <sup>-3</sup> )	0,95
Índice Refractivo	1,54
Índice de Oxígeno Límite ( % )	17
Inflamabilidad	HB
Resistencia a la Radiación	Aceptable
Resistencia a los Ultra-violetas	Mala

Tabla 2.9 Propiedades mecánicas del PEAD

<b>Propiedades Mecánicas</b>	
Coefficiente de Fricción	0,29
Dureza - Rockwell	D60-73 - Shore
Módulo de Tracción ( GPa )	0,5-1,2
Relación de Poisson	0,46
Resistencia a la Tracción ( MPa )	15-40
Resistencia al Impacto Izod ( J m <sup>-1</sup> )	20-210

Tabla 2.10 Propiedades térmicas del PEAD

<b>Propiedades Térmicas</b>	
Calor Específico ( J K <sup>-1</sup> kg <sup>-1</sup> )	1900
Coefficiente de Expansión Térmica ( x10 <sup>-5</sup> K <sup>-1</sup> )	100-200
Conductividad Térmica a 23C ( W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0,45-0,52
Temperatura Máxima de Utilización ( C )	55-120
Temperatura de Deflexión en Caliente - 0.45MPa ( C )	75
Temperatura de Deflexión en Caliente - 1.8MPa ( C )	46

Tabla 2.11 Resistencia química del PEAD

<b>Resistencia Química</b>	
Ácidos - concentrados	Buena-Aceptable
Ácidos - diluidos	Buena
Alcalis	Buena
Alcoholes	Buena
Cetonas	Buena-Aceptable
Grasas y Aceites	Buena-Aceptable
Halógenos	Aceptable-Buena
Hidro-carbonios halógenos	Aceptable-Buena
Hidrocarburos Aromáticos	Aceptable



Propiedades para película de Polietileno de Alta Densidad

Tabla 2.12 Permeabilidad para película de PEAD

<i>Propiedad</i>		<i>Valor</i>
Permeabilidad al Agua @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	10
Permeabilidad al Agua @38C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	40
Permeabilidad al Dióxido de Carbono @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	0,3/2
Permeabilidad al Hidrógeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	2
Permeabilidad al Nitrógeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	0,1
Permeabilidad al Oxígeno @25C	$\times 10^{-13} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$	0,4

Propiedades para tubo de Polietileno - Alta Densidad

Tabla 2.13 Propiedades para tubo de PEAD

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Material	Tubo orientado biaxialmente
Módulo de Tracción - Longitudinal	GPa 1-1,2
Módulo de Tracción - Transversal	GPa 0,8 - hoop
Resistencia a la Tracción - Longitudinal	MPa 70-100
Resistencia a la Tracción - Transversal	MPa 35-40 - hoop
Resistencia al Impacto Relativo	2-3

# Capítulo III

Método experimental

Como se mencionó en el capítulo uno, las pruebas de: *fluencia lenta bajo carga constante (creep)* y *la de relajación de esfuerzos* son las dos pruebas elementales que se pueden realizar a materiales que presentan un comportamiento viscoelástico.

En el capítulo uno de este trabajo también se mencionan las condiciones que deben presentar estas pruebas, en el caso de la prueba de creep el material debe someterse a un esfuerzo constante (ya sea en tensión o compresión uniaxial, o en cortante simple) y observar como crecen las deformaciones en el tiempo. Por otro lado, para la prueba de relajación de esfuerzos la muestra deberá sujetarse a deformación constante y medirse la disminución del esfuerzo aplicado en el tiempo [17,19 y 20].

A continuación se describe brevemente, los tipos de muestras empleadas en el estudio así como la forma en que fueron preparadas.

### **3.1 Preparación de muestras**

Para la realización de ambas pruebas se obtuvieron muestras del material ya conformado, es decir, se obtuvieron de tubos fabricados y listos para usarse, esto con la finalidad de analizar la resina en condiciones de trabajo y no analizarla únicamente como una resina virgen. Las muestras obtenidas corresponden con dos tipos de materiales: de tubos que trabajan con presión interna y tubos que trabajan por gravedad.

Debido a que las muestras fueron obtenidas de tubos terminados, las dimensiones de las probetas no pudieron ser normalizadas. A pesar de esto, las probetas obtenidas tienen una geometría tipo viga de sección rectangular la cual es bien conocida y estudiada por la mecánica de materiales.

Las probetas de la tubería corrugada que no trabaja con presión (tubo que trabaja por gravedad), fueron obtenidas de tubos corrugados de 36 pulgadas de diámetro, cortadas de un valle longitudinalmente como se muestra en la Figura 3.1.

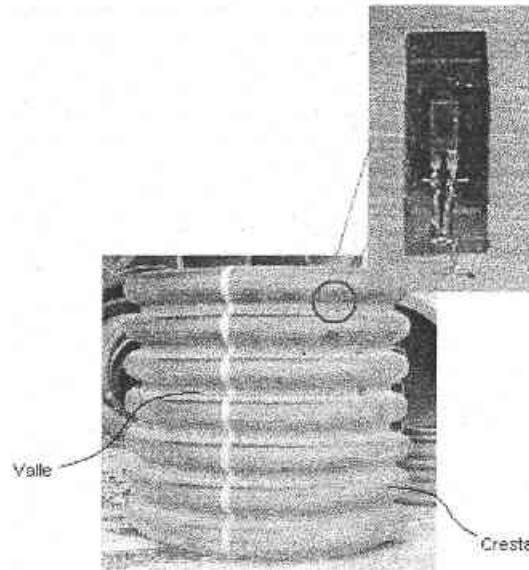


Figura 3.1 Obtención de muestras de resina que trabaja por gravedad

Las dimensiones fueron determinadas por las limitantes que la geometría presentaba. Como se ve en la Figura 3.2, la forma de los tubos permite cortar sólo probetas pequeñas en el valle con el mayor espesor y la mayor longitud posible.

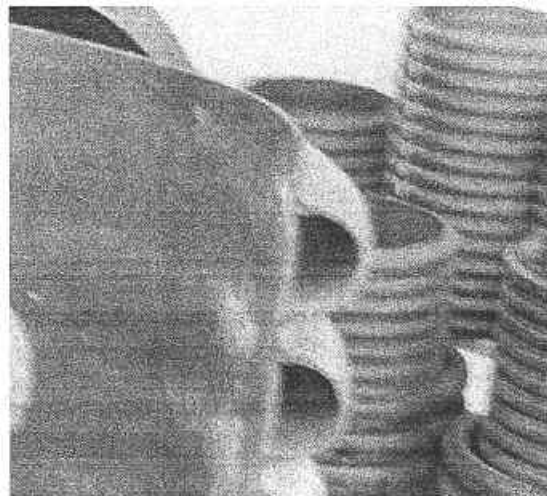


Figura 3.2 Geometría del tubo corrugado

Por otro lado, las probetas de la resina que trabaja con presión se obtuvieron de tubos de 4 ½ pulgadas de diámetro. Se cortaron longitudinalmente como se muestra Figura 3.3. Las dimensiones se determinaron con base a las probetas del tubo corrugado ya que en estos existe una limitante de tamaño como ya se mencionó. Al tener dimensiones semejantes en las probetas para las dos resinas, el análisis de los resultados se simplifica.

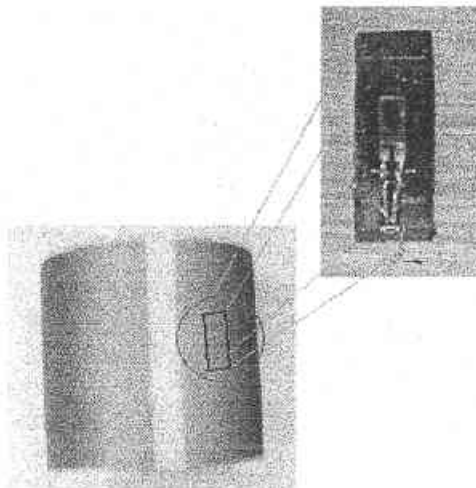


Figura 3.3 Obtención de muestras de resina para presión

### **3.2 Ensayos de fluencia lenta bajo carga constante (creep)**

Como se mencionó anteriormente, las probetas empleadas para esta parte del estudio son de sección rectangular y fueron colocadas en un arreglo de viga en voladizo sometidas a una carga puntual en su extremo libre. La carga aplicada se mantuvo constante lo cual induce un esfuerzo también constante en la muestra.

Para medir las deformaciones en el material, generadas por la carga aplicada, las probetas se instrumentaron con galgas extensométricas uniaxiales tipo EP-40-250BF-350 (Vishay Micro-Measurements <sup>TM</sup>), en un arreglo de cuarto de puente como se muestra en la Figura 3.4. Dicho arreglo es recomendado en la literatura para medir deformaciones puntuales [25].

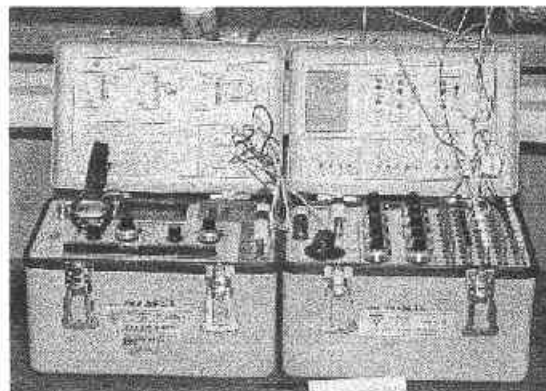


Figura 3.4 Arreglo en cuarto de puente

Para medir las deformaciones en las galgas extensométricas se utilizó el siguiente equipo:

- Strain indicator P-3500 (Vishay Micro-Measurements™)
- Switch and balance unit SB-10 (Vishay Micro-Measurements™)

Es importante mencionar que los instrumentos de medición proporcionan como unidad microdeformaciones es decir, deformaciones multiplicadas por  $10^{-6}$ .



(a) Strain indicator

(b) Switch and balance unit

Figura 3.5 Equipo utilizado

Como es bien sabido en la mecánica de materiales, en una viga en voladizo, las fibras superiores del material están sometidas a tensión uniaxial mientras que las fibras inferiores están sometidas a compresión uniaxial. Así mismo, es sabido que el esfuerzo máximo y la deformación máxima se presentan en la zona del empotramiento.

Considerando lo anterior, las probetas fueron instrumentadas en sus fibras superiores para medir la deformación que el esfuerzo de tensión ocasionó. Al conocer la carga y la geometría de las probetas es posible calcular el esfuerzo al

que están sometidas éstas, mientras que con las galgas extensométricas es posible medir las deformaciones en el material. Lo anterior, nos permite cumplir con las características que pide la prueba de *creep*. En la Figura 3.6 se muestra un esquema de cómo fueron instrumentadas las probetas.

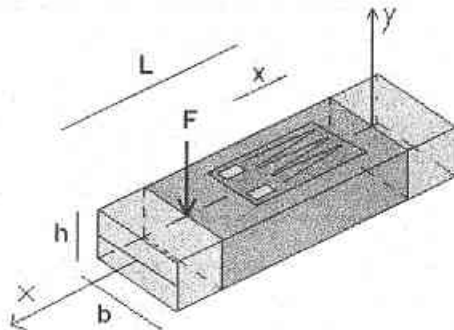


Figura 3.6 Probetas instrumentadas

Las probetas fueron cargadas con una masa de 837 gramos con lo cual se generó un esfuerzo distinto en cada una de las probetas debido a las variaciones en su geometría. El criterio para seleccionar esta masa fue debido a que el esfuerzo que genera no es suficiente para provocar un esfuerzo de fluencia en el material, el cual fue obtenido de información técnica que el proveedor de polietileno le proporcionó al fabricante (tablas mostradas en el capítulo II), el cual es de 26.9 Mpa así como un esfuerzo último de 27.6 Mpa.

Para calcular el esfuerzo que ocasiona la deformación en la galga extensométrica se utiliza la fórmula 3.1 [22] consistente con el arreglo mostrado en la Figura 3.6.

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot F \cdot (L - x)}{b \cdot h^2} \quad (3.1)$$

Y para calcular el esfuerzo en la superficie [22] del empotramiento se utiliza la fórmula

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot F \cdot (L)}{b \cdot h^2} \quad (3.2)$$

donde

F = fuerza (Newtons)

L = longitud donde se aplica la carga (m)

x = distancia del centro del extensómetro desde el empotramiento (m)

b = ancho (m)

h = espesor (m)

En la Tabla 3.1 se muestran las dimensiones de las probetas utilizadas, la carga aplicada y el esfuerzo generado en el empotramiento y en la zona donde se colocó el extensómetro. Los esfuerzos fueron calculados con las fórmulas 3.1 y 3.2 mostradas arriba.

Tabla 3.1 Dimensiones y esfuerzos en las probetas

Probeta	Valor de L	Valor de x	Valor de h	Valor de b	Valor de F	Esfuerzo en el empotramiento	Esfuerzo en el extensómetro
	mm	mm	mm	mm	Newtons	Mpa	Mpa
1C	21.19	9.2	4.55	10.32	8.21882	4.89090	2.76743
6C	19.69	8.77	4.42	10.29	8.21882	4.82999	2.67869
7C	20.56	7.78	4.29	10.08	8.21882	5.46523	3.39716
3L	21.19	8.72	3.97	10.73	8.21882	6.17889	3.63618
4L	21.20	9.54	4.03	10.41	8.21882	6.18351	3.40093
5L	20.40	9.45	3.91	10.7	8.21882	6.14969	3.30093

El número en las probetas indica el número de muestra y la letra "C" o "L" indican el tipo de resina, "C" para el tubo corrugado (tubo que trabaja por gravedad) y "L" para el tubo liso (tubo que trabaja con presión interna). Como se ve en la Tabla 3.1, los esfuerzos generados no superan los esfuerzos de fluencia ni de esfuerzo último antes mencionados.

Una vez comprobado que los esfuerzos no excedieran los esfuerzos de fluencia ni los de fractura del material, se colocaron las probetas en mordazas para cargarlos con la masa antes mencionada, como se muestra en la Figura 3.7.

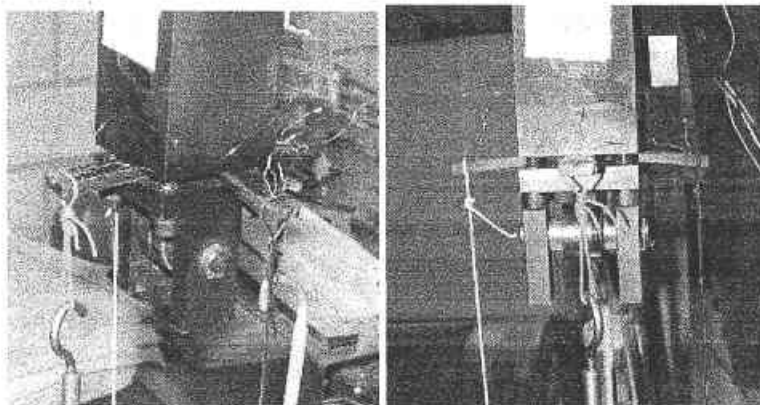


Figura 3.7 Probetas cargadas en voladizo



La prueba para cada una de las seis probetas se realizó al mismo tiempo debido a que la duración de la prueba fue de once días. En la Figura 3.8 se muestran tres probetas cargadas al mismo tiempo, existe una más en la parte posterior que no se aprecia en la figura. En la Figura 3.9 se muestra una foto del experimento con las seis probetas cargadas y el equipo utilizado.

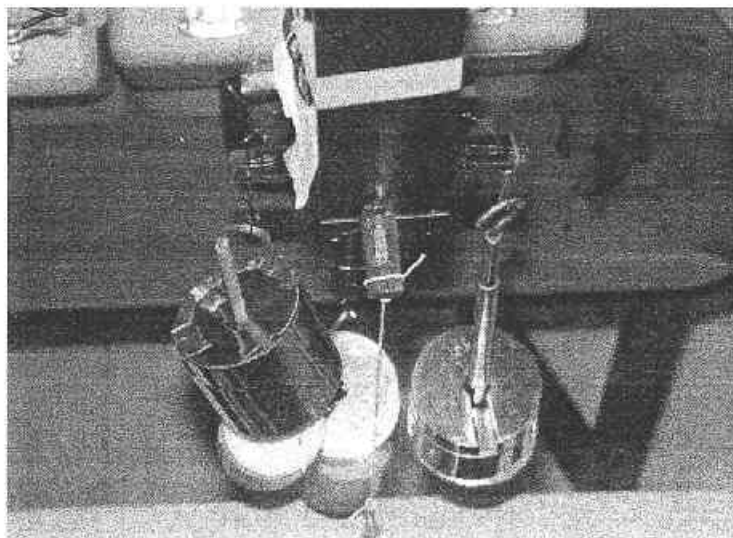


Figura 3.8 Probetas cargadas

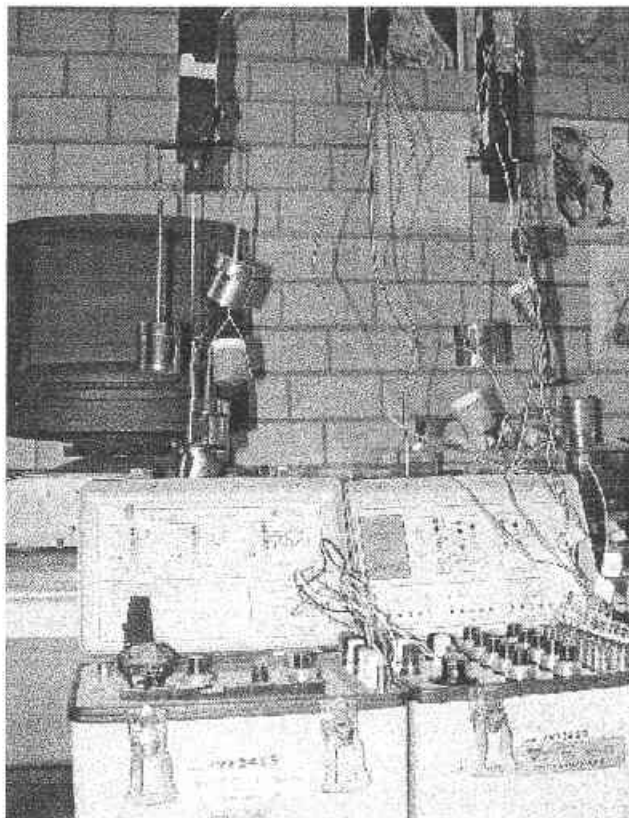


Figura 3.9 Seis probetas cargadas y equipo utilizado

Una vez cargadas las probetas, se tomaron lecturas para las deformaciones así como lecturas del tiempo transcurrido en intervalos de dos horas aproximadamente, durante el día para los once días que duró la prueba (excepto fines de semana).

Es importante mencionar que con cada una de las lecturas tomadas, también se tomo una lectura de la temperatura ambiente ya que como se menciona en el capítulo uno, un material viscoelástico es sensible a la temperatura. Esto con el fin de reconocer cualquier error ocasionado por la variación de la temperatura.

En el capítulo cuatro se mostrarán los datos registrados así como el análisis de los resultados obtenidos de estas pruebas.

### **3.3 Ensayos de relajación de esfuerzos**

La prueba de relajación de esfuerzos, es la segunda prueba elemental para el estudio de un material que presenta un comportamiento viscoelástico. Debido a su importancia, en el capítulo uno se dio una descripción detallada de las características y los términos bajo los cuales se debe realizar esta prueba. Como se mencionó anteriormente, para esta prueba es necesario aplicar una deformación constante y mantenerla mientras se mide la variación del esfuerzo en el material al transcurrir el tiempo el cual, según se sabe presentará una disminución progresiva en el esfuerzo [17,19 y 20].

Al igual que la prueba del apartado anterior y como se menciona en el capítulo uno, esta prueba puede realizarse en tensión o compresión uniaxial así como en cortante simple. Las probetas empleadas en esta parte del estudio, como ocurrió en las pruebas de creep, fueron elementos tipo viga en voladizo y fueron obtenidas de la misma manera que las empleadas para las pruebas de creep descrito en la sección anterior.

Para esta prueba fueron instrumentadas, con galgas extensométricas en arreglo de puente completo, una serie de láminas, colocadas en un arreglo de viga en voladizo, que funcionaron como transductores de carga. Lo anterior fue debido a que en estas pruebas se requiere medir la variación que experimenta el esfuerzo aplicado para lograr esta deformación impuesta la cual se estima que permanece constante.

Las celdas de carga se elaboraron empleando pequeñas placas de acero con sección rectangular y se instrumentaron con galgas extensométricas EA-06-240LZ-120 (Vishay Micro-Measurements <sup>TM</sup>) en un arreglo de puente completo como se muestra en las Figura 3.10.

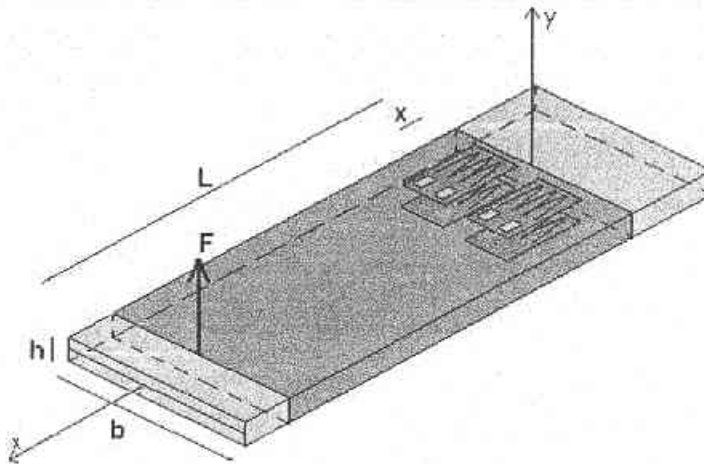


Figura 3.10 Celdas de carga

El arreglo de viga en voladizo con las galgas sujetas a tensión y compresión, como se muestra en la Figura 3.11, es conveniente debido a que es más sensible a la variación de la deformación puesto que ésta se multiplica por un factor de cuatro [25]. Al saber esto, podemos calcular la deformación máxima que se puede presentar en las celdas de carga antes de llegar al esfuerzo de fluencia de éstas.

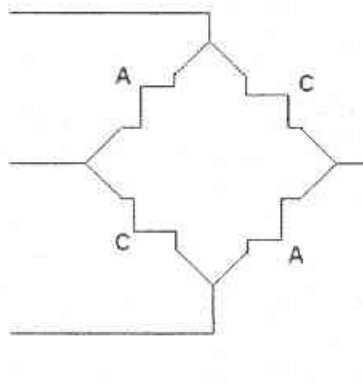


Figura 3.11 Arreglo de punte completo

Cada una de las resistencias mostradas en la figura anterior representa una galga extensométrica, y las letras "C" y "A" indican el tipo de deformación a la que deben ser sometidas. La letra "C" indica una lectura positiva (tensión) mientras que la letra "A" indica una lectura negativa (compresión).

Como se mencionó en la prueba anterior, las fibras superiores de una viga en voladizo están sometidas a tensión uniaxial, mientras que las fibras inferiores están sometidas a compresión uniaxial. Al colocar las galgas con ese arreglo en la celda de carga se obtiene un puente completo (también llamado puente de *Wheatstone*).

Se utilizó el mismo equipo (Figura 3.5) para medir las deformaciones en las galgas extensométricas, el cual como se mencionó antes fue:

- Strain indicator P-3500 (Vishay Micro-Measurements™)
- Switch and balance unit SB-10 (Vishay Micro-Measurements™)

Se utilizaron dos tipos de celdas de cargas y cuatro probetas, 2 probetas del tubo liso y 2 probetas del tubo corrugado. Por cada tipo de resina se utilizó una celda de carga distinta, esto con el fin de obtener un espectro de resultados mayor.

Para calcular las deformaciones máximas en las celdas de carga, primero fue necesario calcular una fuerza máxima aplicada [22] para crear fluencia en el empotramiento ya que como se mencionó, aquí se presenta el mayor esfuerzo, esto con la siguiente fórmula (consistente con el sistema coordinado mostrado en la Figura 3.10)

$$F_{\max} = \frac{\sigma_{\max} \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot L} \quad (3.3)$$

donde

$\sigma_{\max}$  = esfuerzo máximo permitido (600 Mpa)

L = longitud (m)

b = ancho (m)

h = espesor (m)

Al obtener la fuerza máxima en el empotramiento, se calculó la cantidad de deformaciones que se presentarían en la zona donde estaban colocadas las galgas. Primero se calculó el esfuerzo [22], con la fórmula 3.4 (mostrada a continuación) y con ese esfuerzo se calcularon las deformaciones [22] (fórmula 3.5). Al multiplicarlas por cuatro se obtuvieron las deformaciones que se deben registrar por el puente de *Wheatstone* (fórmula 3.6).

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot F_{\max} \cdot (L - x)}{b \cdot h^2} \quad (3.4)$$

donde

$F_{\max}$  = Fuerza aplicada (Newtons)

L = longitud (m)

x = distancia del empotramiento al extensómetro

b = ancho (m)

h = espesor (m)

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_{ac}} \quad (3.5)$$

donde

$\sigma_x$  = esfuerzo en el extensómetro

$E_{ac}$  = módulo de elasticidad del acero (200 Gpa)

$$\text{Microdeformaciones} = \varepsilon_x \cdot 10^6 \cdot 4 \quad (3.6)$$

donde

$\varepsilon_x$  = deformaciones causadas para fuerza

se multiplica por  $10^6$  debido a que son microdeformaciones.

En la Tabla 3.2 se presentan los valores obtenidos en cada una de las celdas de carga, así como las dimensiones de éstas.

Tabla 3.2 Deformación y geometría de las celdas de carga

Celda de carga	Valor de b mm	Valor de h mm	Valor de L mm	Valor de x mm	Fuerza máxima Newtons	Deformaciones permitidas $\mu$ deformaciones
1	22.41	.57	55.04	4.82	13.2286	10949.1
2	22.05	.73	55.04	4.90	21.3489	10931.7
3	21.84	.59	40.04	4.98	18.9873	10507.5
4	22.00	.59	40.04	4.90	19.1264	10531.5

La finalidad de calcular la deformación máxima en las celdas de carga fue para no deformarlas plásticamente.

En Tabla 3.3 se muestran las dimensiones de las probetas así como la celda de carga con la cual trabajaron.

Tabla 3.3 Geometría de las probetas y celda de carga correspondiente

Probeta	Valor de b en mm	Valor de h en mm	Valor de L en mm	Celda de carga	de
10L	11.57	5.02	22.32	1	
10C	11.89	4.24	22.83	2	
11L	11.39	5.21	22.31	3	
11C	12.10	4.41	22.82	4	

Sabiendo la deformación máxima permitida en las celdas de carga, se pudo iniciar la prueba. Las probetas se sujetaron en mordazas en la parte superior mientras que las celdas de carga se colocaron en mordazas en la parte inferior (Figura 3.12). Después se unieron en puntos medidos mediante un trozo de cable.

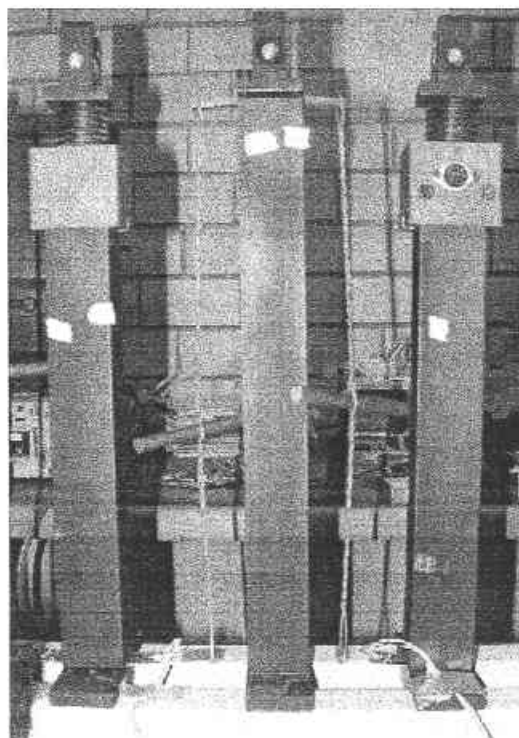


Figura 3.12 Probetas y celdas de carga

Una vez dispuestas las probetas y las celdas en mordazas separadas, el cable se tenso, como se ve en la Figura 3.12, para provocar una deformación tanto en las celdas de carga como en las probetas para cumplir con el requisito de la prueba de *relajación de esfuerzos* de crear una deformación constante. Al tener este arreglo, las celdas de carga midieron la fuerza necesaria para deformar las probetas y con esto medir la variación en el esfuerzo como lo indica la prueba.

Se realizaron cuatro pruebas de este tipo, dos para probetas del tubo liso y dos para probetas del tubo corrugado. Todas estas pruebas se realizaron al mismo tiempo, ya que como en el experimento anterior, las pruebas duraron once días.

En la Figura 3.13 se muestran las cuatro probetas con sus celdas de carga respectivas, y en la figura 3.14 se muestra el experimento completo así como el equipo utilizado.

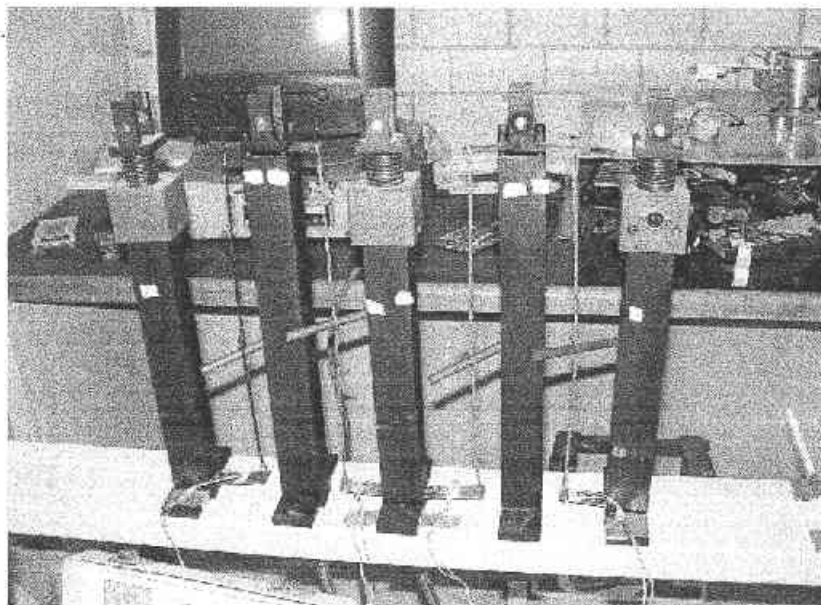


Figura 3.13 Probetas y celdas de carga sujetadas en mordazas





Figura 3.14 Prueba de relajación de esfuerzos y equipo utilizado

Con las probetas y las celdas de carga flexionadas, se tomaron lecturas para la deformación de las celdas con un rango de una hora entre una y otra por un periodo de 11 días (excepto fines de semana). Acompañadas de éstas, también se tomaron lecturas de tiempo y de temperatura, éstas últimas, al igual que en la prueba anterior, con el fin de detectar cualquier variación que se pudiera tener.

Al conocer la deformación en las celdas de carga, podemos conocer la fuerza que se aplicó en las probetas y por ende, la variación del esfuerzo con respecto al tiempo.

Es importante señalar que en esta prueba tal vez no se haya conseguido la condición de deformación constante ya que la probeta no tiene una restricción en su deformación, esto será analizado en el siguiente capítulo, así como los resultados obtenidos en las pruebas.

# Capítulo IV

Resultados y discusión

#### **4.1 Fluencia lenta bajo carga constante (creep)**

En la gráfica de la Figura 4.1, se muestran una serie de curvas microdeformación-tiempo correspondientes a todas las lecturas tomadas durante el periodo que duró el experimento y para cada prueba estudiada en esta parte del experimento. Así mismo, en la gráfica se muestran los valores de esfuerzo aplicado, el cual se mantuvo constante durante la prueba, para cada muestra lo cual explica la variación en las curvas.

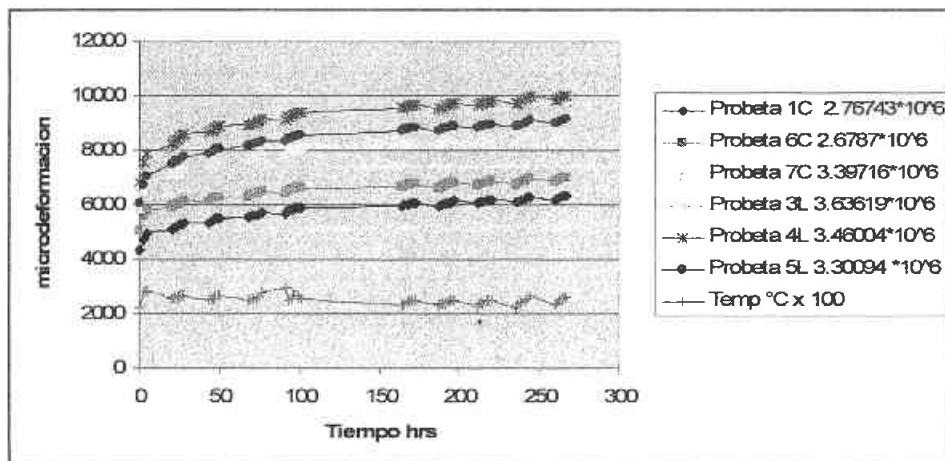


Figura 4.1. Curvas microdeformación-tiempo correspondientes a las seis muestras ensayadas en esta parte del estudio.

En la gráfica de la Figura 4.1 se ve claramente que todas las muestras presentaron un incremento en la deformación con el tiempo sin embargo se puede ver también que las lecturas correspondientes a un mismo día, presentan una tendencia a crecer. Lo anterior no corresponde con el comportamiento reportado en la literatura [17,18,19 y 20], en ninguno de los modelos que se emplean para simular el comportamiento creep en materiales viscoelásticos, ya que además dicha tendencia se ve interrumpida de un día a otro.

Dicho comportamiento fue correlacionado con las variaciones de temperatura, observadas durante un día de prueba y se ve claramente, también en la Figura 4.1, que dichos incrementos corresponden con las variaciones de temperatura observadas. Cabe destacar que para disminuir los efectos térmicos como el que se presentó en la prueba, se tomó la precaución de seleccionar galgas extensométricas apropiadas para instrumentar materiales plásticos, sin embargo, los resultados obtenidos mostraron que al parecer dicha medida no fue suficiente.

Para resolver la situación descrita anteriormente, se realizó una prueba que consistió en someter a calentamiento en una mufla dos tramos de material instrumentado con una galga extensométrica, uno de tubo liso y otro del corrugado, como se muestra en la Figura 4.2. Dicha prueba mostró claramente que el coeficiente de expansión térmica del material estudiado y del material de la base de la galga difieren entre sí. Lo anterior se ve claramente en la gráfica de la Figura 4.3 donde además se aprecia cierta diferencia entre las curvas correspondientes a muestra del tubo liso y la del corrugado.

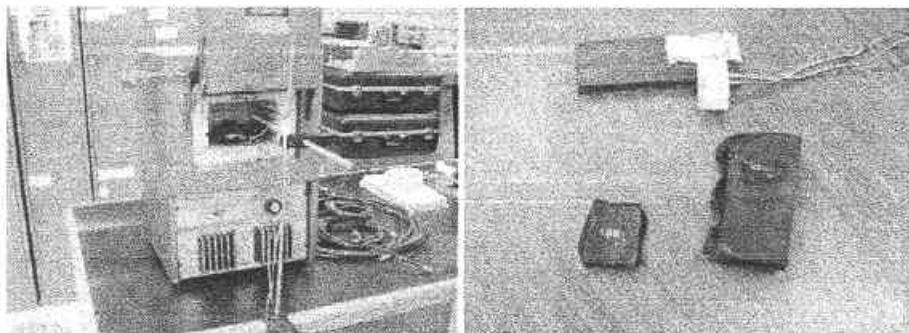


Figura 4.2. Muestras instrumentadas sometidas a calentamiento en una mufla.

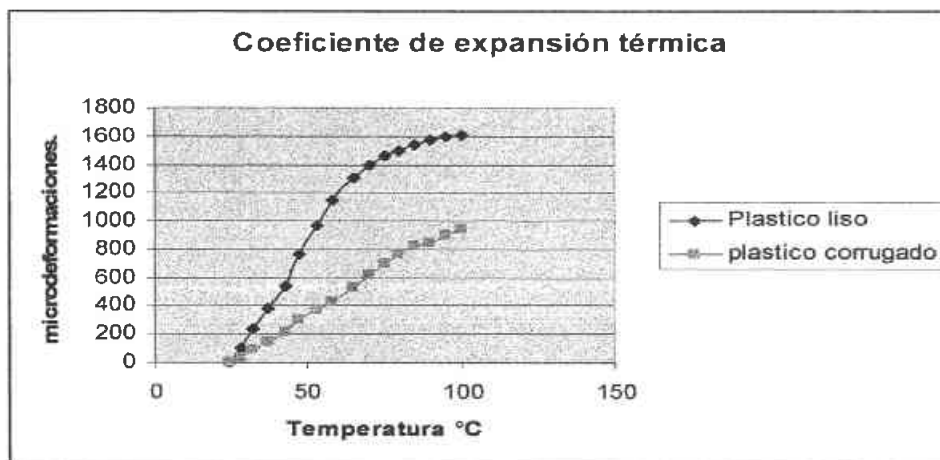


Figura 4.3. Gráficas microdeformación- temperatura obtenidas para cada muestra de resina ensayada.

Como se ve en la gráfica del tubo corrugado, un aumento de 10°C causó una variación de 100 microdeformaciones aproximadamente. Durante las lecturas tomadas para el experimento de *creep* la variación máxima en la temperatura durante el tiempo que duró la prueba fue de 9°C por lo que el error causado por la variación del coeficiente de expansión térmica es al parecer el responsable del efecto de incremento en la deformación en las lecturas de un mismo día.

Para disminuir el efecto térmico mencionado anteriormente, se procesaron los resultados obtenidos de dos formas:

- Se obtuvieron los promedios de las deformaciones registradas en un solo día
- Se separaron las lecturas de las deformaciones para cada día a la misma temperatura.

Dichos resultados se muestran en las Figuras 4.4 y 4.5 y es claro que persiste el efecto de crecimiento de la deformación en el tiempo.

Es claro que el comportamiento observado en las curvas de las Figuras 4.4 y 4.5 es similar al que predice el modelo de Maxwell más que al previsto por el modelo de Kelvin [17,18,19,20].

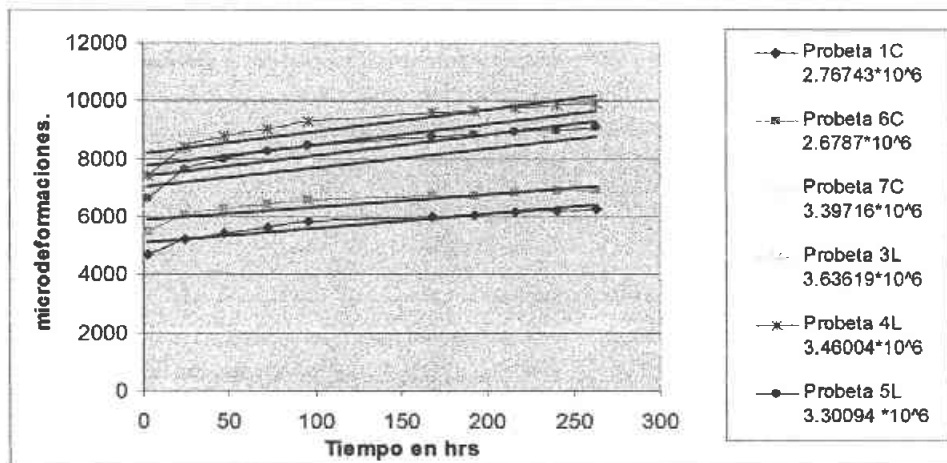


Figura 4.4. Gráficas microdeformación-tiempo correspondientes a las muestras ensayadas. En esta gráfica las microdeformaciones corresponden con el promedio de cada día de prueba.

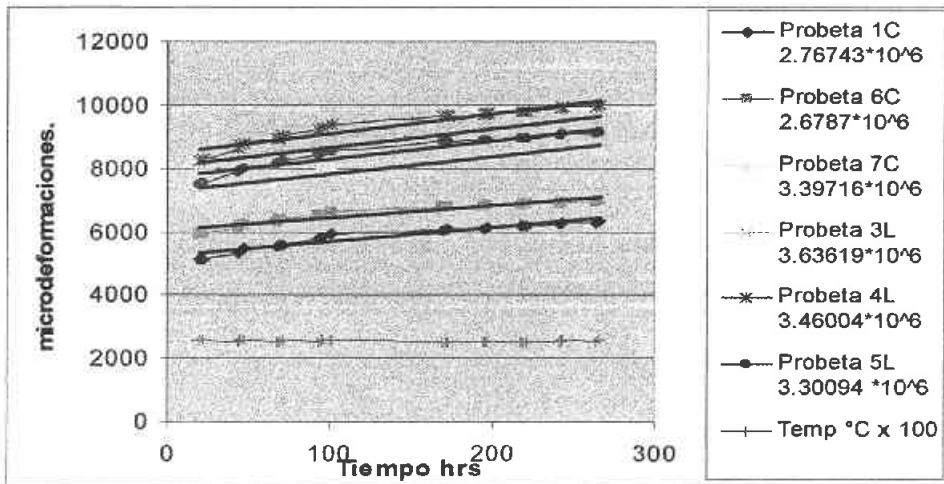


Figura 4.5. Gráficas microdeformación-tiempo correspondientes a las muestras ensayadas. En esta gráfica las microdeformaciones corresponden con los valores de cada día a la misma temperatura.

Como se sabe, el comportamiento deformación-tiempo correspondiente a esfuerzo constante que predice el modelo de Maxwell es del tipo de una recta que pasa fuera del origen por lo que se practicó un ajuste lineal a cada una de las curvas mencionadas. Dicho ajuste se muestra en las figuras 4.4 y 4.5.

En la Tabla 4.1 se presentan los valores de las pendientes obtenidas y la ordenada al origen correspondientes a cada curva mostrada en las Figuras 4.4 y 4.5.

Tabla 4.1. Valores de las pendientes y la ordenada al origen obtenidas al aplicar un ajuste lineal a las curvas de las Figuras 4.4 y 4.5.

Probeta	Promedio de cada día (Figura 4.4)			Temperatura uniforme (Figura 4.5)		
	Pendiente ( $\mu$ -deformación)/seg	Ordenada al origen ( $\mu$ -deformación)	Varianza $R^2$	Pendiente ( $\mu$ -deformación)/seg	Ordenada al origen ( $\mu$ -deformación)	Varianza $R^2$
1C	0.0014	5088.6	.866	0.0012	5225.2	.9294
6C	0.0012	5899.7	.8239	0.0011	6039.9	.9174
7C	0.0019	7026.1	.8253	0.0016	7270.7	.9244
3L	0.002	7776.1	.7945	0.0016	8090.4	.9154
4L	0.0021	8182.8	.8158	0.0017	8463.8	.9239
5L	0.002 t	7393	.7979	0.0016t	7702.8	.9191

Cabe destacar que en las curvas de la Figura 4.4 y 4.5, se aprecia ligeramente la existencia de dos pendientes; una que abarca la primera semana y la otra, más pequeña que la primera, que se extiende toda la segunda semana de prueba. Lo anterior puede deberse a que en la primera semana el material sufrió cierto proceso de acomodado en los primeros días de la prueba para posteriormente tomar un comportamiento más uniforme.

Con el fin de evaluar dicha variación en la pendiente de las curvas se analizaron, también mediante ajuste lineal, los datos correspondientes a la primera semana de prueba y a la segunda semana por separado. Los resultados obtenidos, es decir las pendientes y las ordenadas al origen, se muestran en la Tabla 4.2 para la primera semana y en la Tabla 4.3 para la segunda semana.

Tabla 4.2. Valores de las pendientes y la ordenada al origen obtenidas al aplicar un ajuste lineal a las curvas de las Figuras 4.4 y 4.5 para la primera semana.

Probeta	Promedio de cada día (Figura 4.4) Primera semana			Temperatura uniforme (Figura 4.5) Primera semana		
	Pendiente ( $\mu$ - deformación) /seg	Ordenada al origen ( $\mu$ - deformación)	Varianza $R^2$	Pendiente ( $\mu$ - deformación) /seg	Ordenada al origen ( $\mu$ - deformación)	Varianza $R^2$
1C	0.0031	4808	.9288	0.0026	4943.4	.9818
6C	0.003	5619.5	.8944	0.0023	5780.3	.975
7C	0.0045	6605.4	.8866	0.0032	6905.7	.9858
3L	0.0051	7284.4	.8622	0.0034	7696.9	.9789
4L	0.0051	7696	.8796	0.0037	8051.9	.9791
5L	0.0051	6901	.8641	0.0034	7309.2	.9839



Tabla 4.3. Valores de las pendientes y la ordenada al origen obtenidas al aplicar un ajuste lineal a las curvas de las Figuras 4.4 y 4.5 para la segunda semana.

Probeta	Promedio de cada día (Figura 4.4) Segunda semana			Temperatura uniforme (Figura 4.5) Segunda semana		
	Pendiente ( $\mu$ - deformación) /seg	Ordenada al origen ( $\mu$ - deformación)	Varianza R <sup>2</sup>	Pendiente ( $\mu$ - deformación) /seg	Ordenada al origen ( $\mu$ - deformación)	Varianza R <sup>2</sup>
1C	0.0007	5564.3	9872	0.0008	5584.4	959
6C	0.0006	6348.9	9788	0.0006	6398.3	9281
7C	0.0008	7775.6	9866	0.0008	7803.3	9606
3L	0.0008	8678.5	9856	0.0008	8689	9408
4L	0.001	9014.8	9864	0.001	9043	9671
5L	0.0008	8269.2	9873	0.0008	8300.6	9739

Como se sabe la solución del modelo de Maxwell para el caso de esfuerzo constante corresponde con una recta de la forma:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{\eta} t + \frac{\sigma_0}{E} \quad (4.1)$$

Donde

$\sigma_0$  = esfuerzo constante aplicado

$\eta$  = Coeficiente viscoso

E = Modulo de elasticidad

De donde se tiene que conociendo el esfuerzo aplicado, es posible calcular el valor del coeficiente viscoso ( $\eta$ ) y del módulo elástico (E) del material estudiado empleando la pendiente y la ordenada al origen obtenidos mediante el ajuste lineal aplicado a cada conjunto de resultados experimentales.

En la Tabla 4.4 se muestran los valores de  $\eta$  y E correspondientes a los datos de la primera y segunda semana, así como a los de todo el experimento, calculados empleando los valores de deformación promedio para cada día y los valores de deformación a la misma temperatura. Así mismo en dicha Tabla se muestran los valores de módulo elástico instantáneo ( $E_i$ ) para cada prueba los cuales fueron calculados empleando la deformación generada por la carga a 5 minutos de iniciada la prueba.

Tabla 4.4 Valores de  $E_i$ , E y  $\eta$  calculados a partir de las pendientes y de las ordenadas al origen para la prueba en general así como para la primera y segunda semana, tanto de promedios diarios como de temperatura uniforme.

Probeta	Promedios diarios							
	$E_i$	General			Primera semana		Segunda semana	
		MPa	E MPa	$\eta$ (GPa*seg) $\times 10^6$	E MPa	$\eta$ (GPa * seg) $\times 10^6$	E Mpa	$\eta$ (GPa * seg) $\times 10^6$
1C	915.4	543.8	1.9797 $\times 10^6$	575.5	8.9271 $\times 10^6$	497.3	3.9534 $\times 10^6$	
6C	772.8	454	2.23225 $\times 10^6$	476.6	8.829 $\times 10^6$	421.91	4.4645 $\times 10^6$	
7C	860.9	483.5	1.7879 $\times 10^6$	514.3	7.5492 $\times 10^6$	436.9	4.2464 $\times 10^6$	
3L	826	467.6	1.8180 $\times 10^6$	499.1	7.1297 $\times 10^6$	418.9	4.5452 $\times 10^6$	
4L	742.5	422.8	1.6476 $\times 10^6$	449.5	6.7843 $\times 10^6$	383.8	3.46 $\times 10^6$	
5L	798.3	446.5	1.6504 $\times 10^6$	478.3	6.4724 $\times 10^6$	399.184	4.1261 $\times 10^6$	

Continuación Tabla 4.4

Probeta	Ei MPa	Temperatura uniforme					
		General		Primera semana		Segunda semana	
		E MPa	$\eta$ (GPa*seg) $\times 10^6$	E MPa	$\eta$ (GPa * seg) $\times 10^6$	E MPa	$\eta$ (GPa * seg) $\times 10^6$
1C	915.4	529.6	2.306 $\times 10^6$	559.8	1.0643 $\times 10^6$	495.5	3.4592 $\times 10^6$
6C	772.8	443.5	2.4351 $\times 10^6$	463.4	1.1646 $\times 10^6$	418.6	4.4645 $\times 10^6$
7C	860.9	467.2	2.1232 $\times 10^6$	491.9	1.0616 $\times 10^6$	435.3	4.2464 $\times 10^6$
3L	826	449.4	2.2726 $\times 10^6$	472.4	1.0694 $\times 10^6$	418.4	4.5452 $\times 10^6$
4L	742.5	408.8	2.0353 $\times 10^6$	429.7	9.3514 $\times 10^5$	382.6	3.46 $\times 10^6$
5L	798.3	428.5	2.0630 $\times 10^6$	451.6	9.7086 $\times 10^5$	397.6	4.1261 $\times 10^6$

En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran los valores obtenidos para E y para  $\eta$  respectivamente obtenidos por los diferentes análisis con el fin de compararlos.

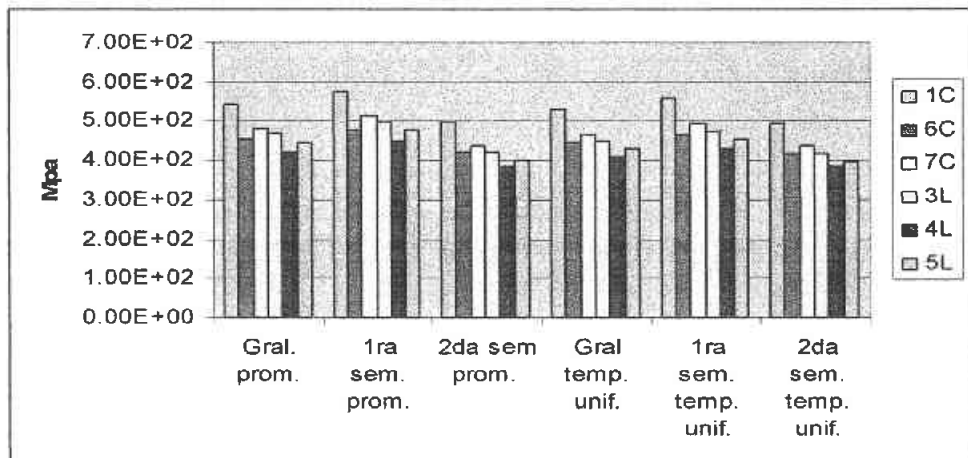


Figura 4.6 Valores obtenidos para la constante elástica E

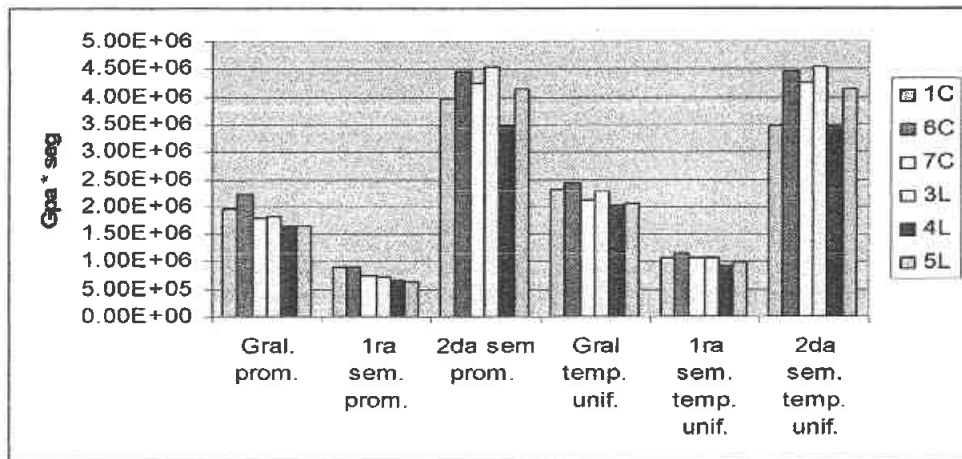


Figura 4.7 Valores obtenidos para la constante Viscosa  $\eta$

Como se ve claramente en la Tabla 4.4, los valores del  $E_i$  obtenidos son mayores que los calculados, empleando la ordenada al origen y se puede apreciar que son aproximadamente iguales a los reportados en la literatura [26]. Las variaciones en el módulo elástico son comunes en los materiales viscoelástico ya que se ha reportado en la literatura que depende de la rapidez de deformación y el tiempo, de hecho se habla a menudo de un módulo elástico aparente al referirse un efecto de disminución de éste asociada al incremento de la deformación al someter el material a esfuerzo constante [23 y 24].

Por otro lado, no se ha encontrado en la literatura valores de  $\eta$  con los que puedan ser comparados los resultados obtenidos sin embargo la coincidencia de  $E_i$ , encontrados en el experimento, con valores reportados significa que las mediciones realizadas son razonables y por lo tanto podemos considerarlas válidas.

Los valores finales calculados para las constantes  $E$  y  $\eta$  para el tubo que trabaja por gravedad (tubo corrugado) y para el tubo que trabaja con presión interna (tubo liso) se muestran en la Tabla 4.5 y fueron obtenidos promediando los valores obtenidos mediante; promedios diarios (segunda semana) y con temperatura uniforme (segunda semana). El criterio para promediar dichos valores fue debido a que, como se mencionó antes, se aprecia una cambio en la pendiente de la segunda semana, la cual nos hace pensar que ese es el comportamiento que seguirá la muestra con el tiempo.

Tabla 4.5 Valores finales calculados para las constantes E y  $\eta$  para el tubo que trabaja por gravedad y para el tubo que trabaja con presión interna.

Tubo	Tipo de servicio	E (MPa)	$\eta$ (GPa*seg)
Corrugado	Trabajo por gravedad	451	$4.14 \times 10^6$
Liso	Trabajo con presión interna	400	$4.04 \times 10^6$

Así mismo, empleando los valores de  $\eta$ , E y un esfuerzo aplicado de 7 MPa se calculó el tiempo en el que el material alcanza 2% de deformación, dichos valores se muestran en la Tabla 4.6. Estos valores fueron comparados con los reportados por Hauser Laboratory Services [27] quien sometió muestras de PEAD a esfuerzo constante hasta alcanzar la falla en el tiempo. Es razonable que la deformación plástica del material preceda a la transición dúctil-frágil.

Tabla 4.6 Tiempo en que se alcanza el 2% de deformación utilizando los valores de  $\eta$  y E calculados con un esfuerzo de 7 MPa.

Tipo de resina	Tiempo para llegar al 2% de deformación hrs
Trabajo por gravedad	735.835
Trabajo con presión interna	400.794

Es importante destacar, en esta parte del estudio que los valores de  $\eta$  encontrados para ambos materiales ensayados, resina obtenida de un tubo corrugado y de un tubo liso, son prácticamente iguales lo cual difiere de lo esperado. Según los estudios reportados en la literatura [29] una tubería que trabajará bajo presión interna, como es el caso del tubo liso empleado en el estudio, debe ser fabricada con una resina con un grado HDB de al menos 3. De acuerdo con los estudios reportados en la literatura [29] una resina de este tipo debe contener mayor porcentaje de material amorfo que una resina para tuberías por gravedad y por lo tanto el coeficiente viscoso debería ser mayor. Así mismo, es claro que si durante el servicio, la tubería está sujeta a un esfuerzo constante la deformación que ésta sufra deberá ser lo suficientemente lenta para evitar, a corto plazo, que se presente dilatación del tubo.

La razón por la cual no encontramos un coeficiente viscoso mayor en la resina del tubo liso puede asociarse a diversas causas entre ellas que la resina del que fue fabricado el tubo estudiado no es del tipo recomendado o bien, que durante el proceso de fabricación se vieron considerablemente afectadas sus propiedades.

## **4.2 Relajación de esfuerzos**

Como se mencionó anteriormente, para estas pruebas se instrumentó una celda de carga para cada muestra a través de la cual se midió la fuerza aplicada para imponer cierta deflexión sobre ella.

En la Figura 4.8 se muestran las curvas deformación-tiempo correspondiente a las celdas de carga, las cuales permiten calcular el esfuerzo aplicado a cada celda y posteriormente la fuerza correspondiente. Lo anterior fue realizado empleando las siguientes ecuaciones (consistentes con el sistema coordenado mencionado en el capítulo 3 de este trabajo)[22]:

$$\sigma_x = \frac{6 \cdot F \cdot (L - x_1)}{b \cdot h^2} \quad (4.2)$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_{ac}} \quad (4.3)$$

Al sustituir la (4.3) en la (4.2) obtenemos

$$F = \frac{\epsilon_x \cdot E_{ac} \cdot b \cdot h^2}{6 \cdot (L - x_1)} \quad (4.4)$$

donde:

$\sigma_x$ =esfuerzo normal

F=fuerza

L= distancia del empotramiento al punto de aplicación de la fuerza

$x_1$ =distancia del empotramiento a los extensómetros

b= ancho

$E_{ac}$ =Módulo de elasticidad del acero

En la Figura 4.9 se muestra la gráfica fuerza-tiempo la cual, por equilibrio, es igual para las celdas de carga y para las muestras. Dicha gráfica se utilizó para calcular el esfuerzo en estas últimas utilizando la fórmula 4.2 con la distinción de que el valor de  $x_1$  no se considero ya que se midieron esfuerzos en el empotramiento. La variación de estos para cada muestra se presenta en la gráfica de la Figura 4.10.

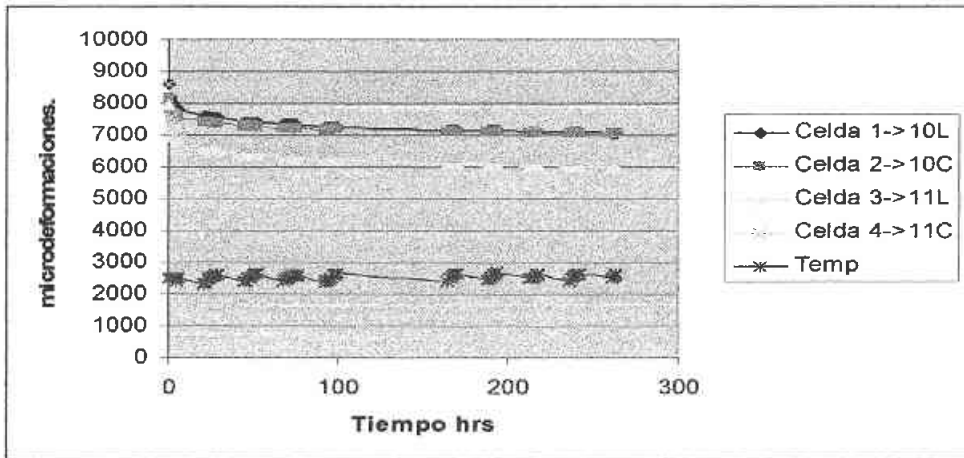


Figura 4.8. Gráficas microdeformación-tiempo correspondientes a las celdas de carga instrumentada en cada una de las muestras ensayadas.

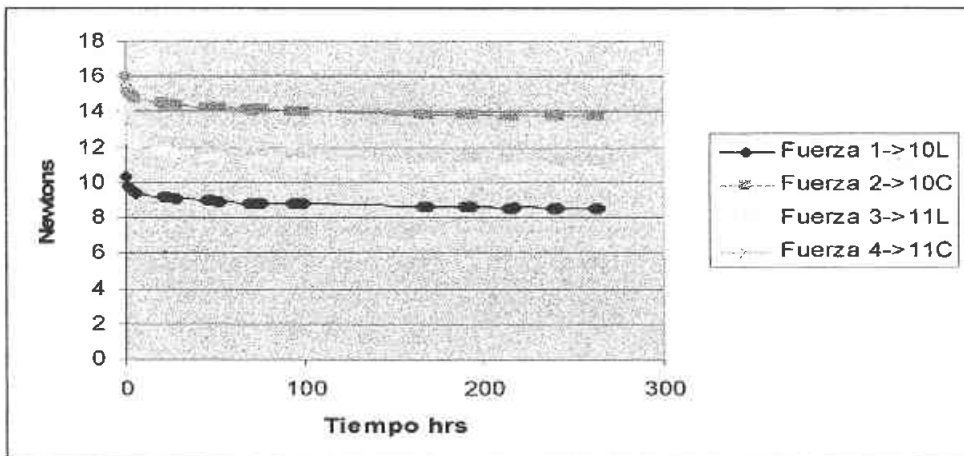


Figura 4.9. Gráficas fuerza-tiempo correspondientes a las celdas de carga y a las muestras ensayadas.

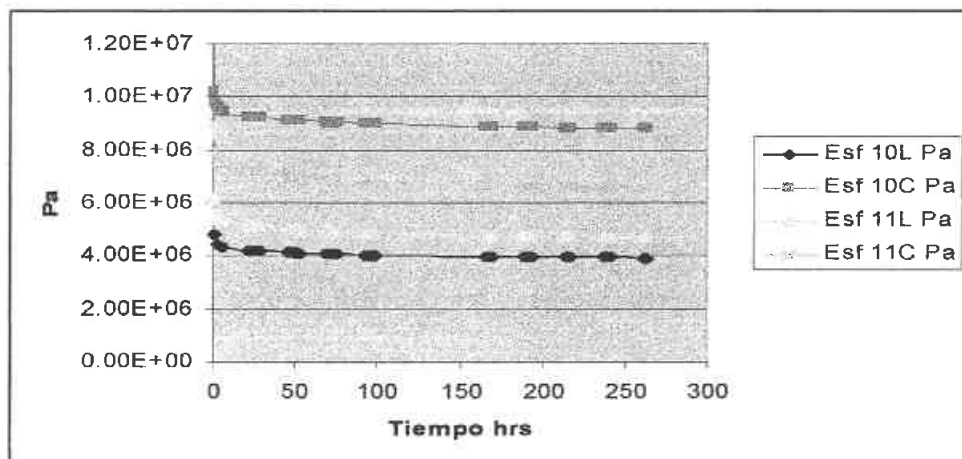


Figura 4.10. Gráficas esfuerzo-tiempo correspondientes a las muestras ensayadas.

En la Figura 4.10 se puede ver que la variación del esfuerzo sigue aproximadamente una trayectoria que puede ser representada por una recta. Considerando lo anterior, se practicó un ajuste lineal a los datos obtenidos para cada muestra. En la Tabla 4.7, se muestran las ecuaciones obtenidas de cada ajuste así como los valores del módulo elástico y del coeficiente viscoso obtenidos en la primera parte del estudio.

Tabla 4.7 Funciones del esfuerzo y valores de las constantes elásticas y viscosas.

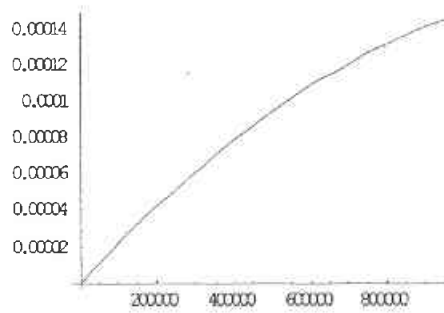
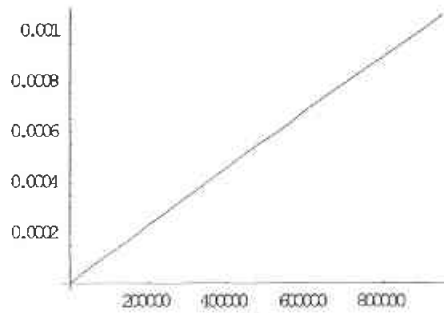
Probeta	Ecuación para el esfuerzo $\sigma$ (con el tiempo en segundos)	Valor de E (Mpa)	Valor de $\eta$ (GPa . seg)
10C	$-0.4504 t + 9000000$	451	$4.14 \times 10^6$
11C	$-0.6595 t + 7000000$	451	$4.14 \times 10^6$
10L	$-0.2864 t + 4000000$	400	$4.04 \times 10^6$
11L	$-0.4552 t + 5000000$	400	$4.04 \times 10^6$

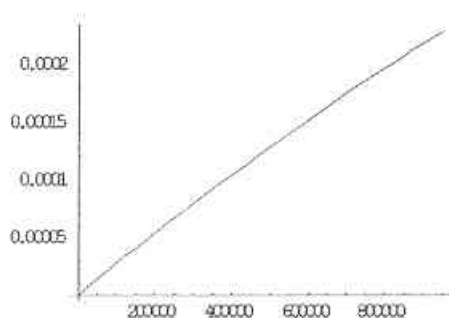
Con los datos de la Tabla 4.7 y empleando el modelo de Maxwell, se calculó el comportamiento deformación-tiempo esperado en las muestras los cuales se presentan en la Tabla 4.8. El comportamiento calculado para cada probeta se muestra en las gráficas de la Figura 4.11 donde se ve claramente que corresponde con curvas parabólicas.



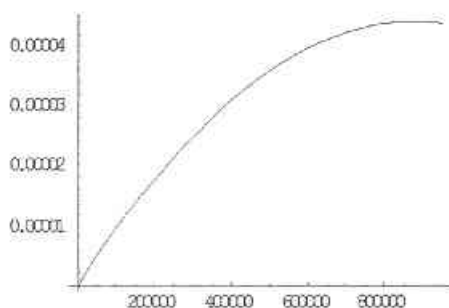
Tabla 4.8 Funciones obtenidas con el modelo de *Maxwell* para la deformación en base al esfuerzo calculado.

Probeta	Ecuación para la deformación $\epsilon$
10C	$1.17524 * 10^{-9} t - 5.43961 * 10^{-17} t^2 + C$
11C	$2.2851 * 10^{-10} t - 7.96498 * 10^{-17} t^2 + C$
10L	$2.74009 * 10^{-10} t - 3.54455 * 10^{-17} t^2 + C$
11L	$9.9623 * 10^{-11} t - 5.63386 * 10^{-17} t^2 + C$





c) 10L



d) 11L

Figura 4.11. Curvas microdeformación-tiempo(seg) correspondientes a la solución del modelo de Maxwell empleando las ecuaciones de la Tabla 4.8. a) Muestra 10C, b) Muestra 11C, c) Muestra 10L, d) Muestra 11L.

Las curvas obtenidas muestran claramente que la forma en que fue realizado el experimento no corresponde con una condición de deformación constante como era el fin. Más bien las condiciones logradas corresponden con una condición de rapidez de esfuerzo constante como muestran las curvas de la gráfica de la Figura 4.11.

La variación de la deformación no fue medida en las muestras, debido a que se espera inducir deformación constante, sin embargo es bien sabido que la deflexión en las muestras es directamente proporcional a la deformación. Considerando la forma en la que fue realizada la prueba, la deflexión de la muestra es la misma que experimentó la celda de carga la cual puede ser calculada conociendo la deformación en la celda, las propiedades del material y las dimensiones de la misma.

En la gráfica de la Figura 4.12 se muestran las curvas deflexión-tiempo correspondientes a cada muestra ensayada en esta parte del estudio. Como se puede ver dichas curvas muestran un comportamiento similar al de una curva parabólica sin embargo no corresponde fielmente con el que se mostró en las gráficas de la Figura 4.11. Cabe destacar que, debido a que el arreglo al que fueron sometidas las muestras del material es de viga en voladizo, la relación entre la deflexión y la deformación puede variar considerablemente ya que la deformación en la viga varía a lo largo del eje longitudinal incluso, en el punto de aplicación de la carga la deformación es cero para todo valor de la deflexión.

Es importante mencionar que el efecto térmico observado en el estudio de fluencia lenta no se apreció en esta parte del estudio sin embargo pudo haber influido en el comportamiento del material.

Por otro lado, el modo de carga obtenido durante esta parte del experimento es similar al que ha sido observado por Gabriel [28] en tubos enterrados. Según estudios de Gabriel, un tubo enterrado adecuadamente estará sometido a cierto esfuerzo que va disminuyendo en el primer año aproximadamente en tanto el material de relleno se consolida. Como se ve en la gráfica de la Figura 4.12 la deflexión tiende a hacerse constante lo cual a su vez generará un estado de deformación constante que favorecerá a la tubería ya que dicha condición favorecerá la relajación de los esfuerzos. En realidad es recomendable realizar una serie de pruebas en las que se logre la condición de deformación constante para verificar el fenómeno de relajación de esfuerzos sin embargo los resultados obtenidos hacen evidente que dicho efecto se presenta en el material.

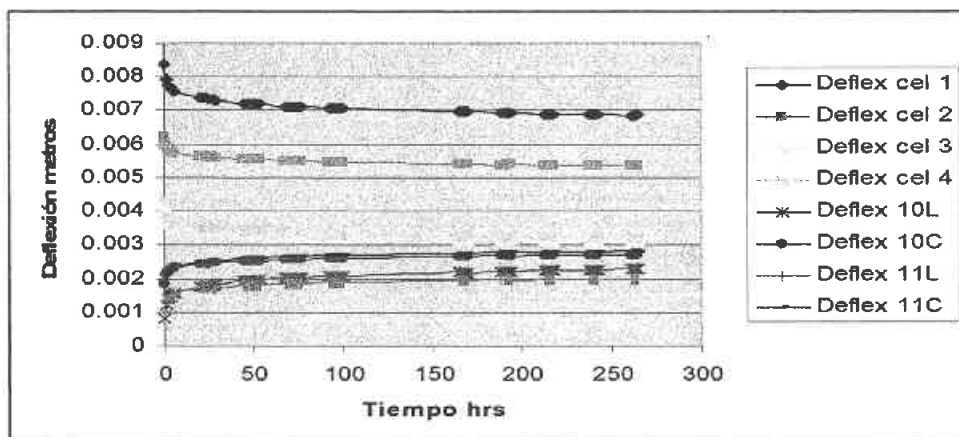


Figura 4.12. Curvas deflexión-tiempo correspondientes a cada muestra a partir de la deformación medida en su respectiva celda de carga

En general, podemos considerar que los resultados obtenidos en esta parte del estudio son congruentes con el comportamiento viscoelástico reportado en la literatura debido a que una disminución de la fuerza aplicada, como la que experimentaron las muestras ensayadas, genera un incremento en la deformación. Así mismo, aunque no fue posible comprobar con toda precisión la congruencia del comportamiento observado en el material con el que predice el modelo de Maxwell podemos decir que dicho modelo lo aproxima mejor que otro modelo como es el caso del modelo de Kelvin contrario a lo que se asegura en la literatura [30]. En realidad, existen algunos trabajos reportados en lo que se asegura que el comportamiento del PEAD es no lineal y por lo tanto no puede ser representado mediante modelos lineales como el de Maxwell [30]. No obstante, con los resultados obtenidos en el presente trabajo, empleando dicho modelo, es posible aproximar el comportamiento en un intervalo de esfuerzos bajos.

## Conclusiones

Las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos nos permiten llegar a las siguientes conclusiones.

El material empleado para fabricar tanto los tubos corrugados como los tubos lisos ensayados en el presente trabajo presentan un comportamiento mecánico viscoelástico.

Los materiales estudiados, la resina de tubo liso y la del corrugado, siguen con moderada precisión el comportamiento que predice el modelo de Maxwell pero no el de Kelvin como suponen algunas fuentes.

El coeficiente viscoso y el módulo elástico instantáneo para ambos materiales resulto ser aproximadamente de  $4.10 \times 10^6$  GPa\*seg y de 850 MPa respectivamente.

El coeficiente viscoso del material con que se fabrica el tubo liso presenta un valor menor al esperado lo cual indica que se debe realizar un estudio específico que aclare la dispersión.

La prueba realizada a esfuerzo constante nos permite determinar lo siguiente:

- El coeficiente viscoso del material
- La variación aparente del módulo elástico del material
- El tiempo en el que se alcanzará la deformación plástica en el material y por tanto un criterio de diseño importante.
- Empleando nuestros resultados y combinándolos con otros resultados se pueden hacer extrapolaciones que nos permitan determinar algunos parámetros de interés.

Los resultados obtenidos nos han permitido identificar algunos de los fenómenos en los que se basan las normas típicamente empleadas para caracterizar las resinas con las que se fabrican las tuberías de PEAD. En particular, nuestro estudio nos permitió separar la parte viscoelástica del comportamiento del de crecimiento de grietas que en las normas consultadas, realizan de manera simultánea. Con esto se da un paso importante en la aclaración de los puntos en discusión del proyecto de norma NMX-E-241.

La prueba a rapidez de "descarga" constante nos permitió observar un fenómeno de gran interés para el comportamiento de tubos enterrados. Bajo un estado de rapidez de carga (descarga) constante, la deformación que sufre el material tiende a hacerse constante en un tiempo relativamente corto, aunque es necesario continuar los estudios para resolverlo totalmente. Como han reportado otros

autores es posible evaluar el comportamiento del material mediante pruebas de corto plazo.

Por otro lado, del presente trabajo se derivaron las siguientes recomendaciones:

- a) Definir un arreglo de carga que permita realizar pruebas en flexión, como las realizadas en el presente trabajo, en una condición de deformación constante midiendo simultáneamente la fuerza aplicada y la deformación en determinados puntos de la muestra.
- b) Realizar pruebas a esfuerzo constante y deformación constante en muestras de tubos tanto lisos como corrugados bajo condiciones de aplastamiento y/o a tubo confinado.
- c) Realizar los mismos estudios a muestras de las resinas, con las que serán fabricados los tubos, y de los propios tubos para evaluar la influencia del proceso en las propiedades del material.
- d) Repetir las mismas pruebas realizadas en el presente estudio incrementado: el período de prueba, el esfuerzo inducido y la geometría de las muestras.
- e) Realizar las mismas pruebas en muestras con grietas inducidas.

### Bibliografía y mesografía

- [1] RODRIGUEZ Ferdinand, Principles of polymer systems, segunda edición Ed. McGraw-Hill (1985)
- [2] JASTRZEBSKI Zdigniew, Naturaleza y propiedades de los materiales para ingeniería, segunda edición Ed. Interamericana (1979)
- [3] <http://www.monografias.com/trabajos14/polimeros/polimeros.shtml>
- [4] <http://www.monografias.com/trabajos16/derivados-petroleo/derivados-petroleo.shtml#polimeros>
- [5] <http://www.arqhys.com/arquitectura/polimeros.html>
- [6] <http://www.vecom.com.ar/polimeros>
- [7] <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polimero.htm>
- [8] [http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec\\_16.html](http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_16.html)
- [9] <http://www.uned.es/biblioteca/rsu/pagina1.htm>
- [10] <http://www.pslc.ws/spanish/tg.htm>
- [11] RUBIN I. , Materiales plásticos, propiedades y aplicaciones , Noriega Editores (2002)
- [12] Engineering Properties of Polyethylene, Plastics Pipe Institute, Inc.
- [13] [http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Polietileno\\_-\\_Alta\\_Densidad.HTML](http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Polietileno_-_Alta_Densidad.HTML)
- [14] <http://www.telecable.es/personales/albatros1/quimica/industria/polietileno.htm>
- [15] [http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Polietileno\\_-\\_Baja\\_Densidad.HTML](http://www.goodfellow.com/csp/active/STATIC/S/Polietileno_-_Baja_Densidad.HTML)
- [16] <http://www.ing.unlp.edu.ar/estruc3b/visc.pdf#search='viscoelasticidad'>
- [17] MASE, George, Continuum mechanics, Ed. McGraw-Hill (1970)

- [18] MASE, George and MASE Thomas, Continuum mechanics for engineers, Ed. CRC press (1999)
- [19] CHEMAL Eringen, Mechanics of continua, Ed. John Wiley & Sons, Inc.
- [20] CALCOTE Lee, Introduction to continuum mechanics, Ed. D. Van Nostrand company, inc. (1968)
- [21] BOYCE, William y DIPRIMA Richard, Ecuaciones diferenciales y problemas con valores en la frontera, Noriega-Limusa (2004)
- [22] HIBBELER R.C., Mecánica de materiales, Ed. Prentice Hall (1997)
- [23] MOSER A. P. Buried pipe design, McGraw-Hill (2001)
- [24] WATKINS Reynold and ANDERSON Loren, Structural mechanics of buried pipes, CRC press (2000)
- [25] DALLY James and RILEY William, Experimental stress analysis, McGraw-Hill. (1991)
- [26] PPI/CPPA Summary, Design service life, PP 1-5
- [27] WOODS David and KRAUSE-SINGH Julie, Tensile creep rupture, HAUSER Laboratory services (1999), PP 3 y 4.
- [28] LESTER Gabriel and GODDARD James, Curved beam stiffness for thermoplastic gravity-flow drainage pipes, Transportation Research Board (1999), PP 1-14.
- [29] Designing and installing. High density polyethylene (HDPE) and Piping systems for water applications, Plastic pipe institute inc. Kansas November 2004. PP 1-18
- [30] McGRATH T.S. and SCHAFER B.W., Parallel plate testing and simulation of corrugated plastic pipe, Proceeding of TRB 2003 annual meeting (2003)