

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL PEAD
IMPLEMENTADO EN LA ELABORACIÓN DE TUBERÍAS PARA AGUA**

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela

por los Bachilleres:

Salamanca Federico

Ziems Hector

Para optar por el Título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL PEAD
IMPLEMENTADO EN LA ELABORACIÓN DE TUBERÍAS PARA AGUA**

Tutor Académico: Alberto Pertuz

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Bachilleres:

Salamanca Federico

Ziems Hector

Para optar por el Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2013

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, por habernos proporcionado las herramientas para nuestra formación.

A nuestro tutor, Alberto Pertuz, por guiarnos y habernos brindado su conocimiento.

A la Escuela de Petroleo de la U.C.V, en particular al profesor Castillejo, por habernos prestado los equipos de recopilación de datos.

A nuestros familiares, ya que han sido un apoyo incondicional.

A nuestros amigos porque han estado siempre.

A nuestros compañeros de estudio y profesores.

Gracias por todo.

Federico M. Salamanca S., Hector A. Ziems C.

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO A FATIGA DEL PEAD
IMPLEMENTADO EN LA ELABORACIÓN DE TUBERÍAS PARA AGUA**

**Tutor académico: Ing. Alberto Pertuz
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica. Año 2013, 96pp.**

Palabras Claves: Fatiga, PEAD, Flexión Alternativa, Deformación Cíclica, Polietileno, Alta Densidad, Tubería, Bajo Ciclaje.

Actualmente en Venezuela se están implementando para el transporte de agua, tuberías de Polietileno de alta densidad, en vista del auge que ha tenido este material en otros países y contando con la materia prima y con dos grandes fábricas de tuberías en nuestro país, es inevitable que se implemente en el transporte de otros fluidos. Por tal razón nos hemos visto en la necesidad de estudiar sus propiedades mecánicas para así determinar el comportamiento y el desempeño que va a tener durante su operación y garantizar su buen funcionamiento.

Las evaluaciones de fatiga en el PEAD de fabricación nacional son de vital importancia, ya que como bien se sabe la fatiga es responsable de un gran porcentaje de fallas en tuberías. Por esto se planteó, la obtención de la curva de fatiga en bajo ciclaje del PEAD, la cual suministra mayor información sobre el comportamiento a la fatiga del material. Para tal fin se realizaron ensayos de fatiga a flexión alternativa en régimen de bajo ciclaje, se caracterizó este material mediante sus propiedades a la tracción y el comportamiento esfuerzo-deformación cíclica del mismo. Los resultados permitieron la obtención de la zona de bajo ciclaje de la curva universal de fatiga del material en estudio, así como la ecuación que la modela. También se determinó que el material experimenta un proceso de ablandamiento por deformación cíclica.

La Máquina que se utilizó para realizar los ensayos de fatiga a flexión alternativa fue diseñada para ensayar metales, por esto se le hicieron algunas modificaciones para que fuese dual, y así pudiera continuar ensayando metales y adicionalmente pudieran ensayar polímeros en ella.

INDICE GENERAL

RESUMEN	iv
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE FIGURAS	ix
INTRODUCCION	11
Capítulo I	12
EL PROBLEMA	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2 MOTIVACION	12
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivos Específicos	13
Capítulo II	14
MARCO TEORICO	14
2.1 ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL ESTUDIO	14
2.2 POLIMEROS	18
2.2.1 Propiedades mecánicas de los polímeros	19
2.2.2 Comportamiento elástico	19
2.2.3 Comportamiento plástico	20
2.2.4 Fractura	20
2.2.5 Comportamiento Visco elástico de los Polímeros	20
2.2.6 Termoplásticos	21
2.2.7 Termoestables	22
2.2.8 Elastómeros	22
2.3 POLIETILENOS	22
2.3.1 Polietileno de Alta Densidad (PEAD)	23
2.3.2 características de polietileno de alta densidad	24
2.3.3 métodos de conformado del polietileno de alta densidad	25
2.4 FATIGA EN MATERIALES	26

2.5 ENSAYO DE FATIGA	28
2.5.1 Variables de esfuerzos cíclicos	28
2.5.2 Efecto Bauschinger	31
2.5.3 Relación de Basquin	35
2.5.4 Relación Coffin-Manson	37
2.5.5 Curva S-N	39
2.5.6 Transformación de curvas de Fatiga	41
2.5.7 Fatiga en Polímeros	43
2.5.8 Cálculo de Probetas para el Ensayo de Fatiga	44
_____	46
Dónde: _____	46
2.6 ENSAYO DE TRACCION EN POLIMEROS	47
Capítulo III	49
MARCO METODOLOGICO	49
3.1 RECURSOS DISPONIBLES	49
3.2 MAQUINADO Y PREPARACION DE LAS PROBETAS	50
3.2.1 Probetas para el Ensayo de Tracción	50
3.2.2 Probetas para el Ensayo de Fatiga	52
3.2.2.1 maquinado de Probetas para el Ensayo de Fatiga	53
3.3 ENSAYOS MECÁNICOS	55
3.3.1 Ensayos de tracción	55
3.3.2 Ensayos de fatiga	56
3.3.2.1 Puesta en marcha y calibración de la máquina.	61
3.3.2.2 Montaje del ensayo	68
Capítulo IV	69
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	69
4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN	69
4.2 ENSAYO DE FATIGA A BAJO CICLAJE	76
4.2.1 Ciclo de Histéresis y curva Esfuerzo-Deformación Cíclica.	77
4.2.2 Curva Esfuerzo Número de ciclos, S-N en Bajo Ciclaje.	82
4.2.3 Comparación de los resultados obtenidos con los materiales más usados.	83
CONCLUSIONES	84

<i>RECOMENDACIONES</i>	85
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	86

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Relación entre los coeficientes de resistencia a la fatiga y el esfuerzo real de fractura.</i>	37
<i>Tabla 2: Relación entre los coeficientes de ductilidad a la fatiga y la ductilidad a la fractura real.</i>	38
<i>Tabla 3: Características de la muestra de los variadores de frecuencia.</i>	58
<i>Tabla 4: Datos iniciales de las probetas a ensayar.</i>	69
<i>Tabla 5: Resultados de los ensayos de tracción, Fuerza-Elongación.</i>	70
<i>Tabla 6: Fuerzas Máximas y Elongaciones.</i>	71
<i>Tabla 7: Datos del ensayo de tracción, Esfuerzo-Deformación.</i>	72
<i>Tabla 8: Esfuerzos Máximos y Deformaciones.</i>	73
<i>Tabla 9: Propiedades mecánicas estáticas del PEAD.</i>	75
<i>Tabla 10: Resultados experimentales, ensayos de fatiga.</i>	76
<i>Tabla 11: Ecuación de Coffin-Manson para el PEAD.</i>	79
<i>Tabla 12: Ecuación potencial cíclica del PEAD.</i>	81

INDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 : Curva Esfuerzos Vs. Deformación para el PEAD (Young y Lovell, 1991).</i>	18
<i>Figura 2 : Variaciones de Esfuerzos⁽¹⁰⁾.</i>	30
<i>Figura 3: Variación del esfuerzo en un ensayo de deformación cíclica.</i>	32
<i>Figura 4: Ciclo de histéresis esfuerzo-deformación.</i>	33
<i>Figura 5 : Típica Curva Esfuerzos vs. Numero de Ciclos(N)⁽⁸⁾.</i>	39
<i>Figura 6: Relación Entre los puntos medidos directamente de una curva S-N y los puntos transformados de una curva ϵ-N de una aleación de aluminio que presenta un endurecimiento cíclico.</i>	42
<i>Figura 7: definición de las dimensiones.</i>	45
<i>Figura 8: cargas en la zona a estudiar.</i>	45
<i>Figura 9 : Comportamiento a tracción de un Polímero semicristalino⁽¹³⁾.</i>	48
<i>Figura 10 : Comportamiento a tracción de un Polímero semicristalino⁽¹³⁾.</i>	48
<i>Figura 11: corte de sección de 200 mm.</i>	50
<i>Figura 12: Corte diametral.</i>	51
<i>Figura 13: Corte paralelo al eje.</i>	51
<i>Figura 14: Probeta según norma ASTM A-370.</i>	52
<i>Figura 15: Probeta para el ensayo de fatiga.</i>	53
<i>Figura 16: Máquina de ensayos universales, ensayo de tracción.</i>	55
<i>Figura 17: Esquema de la máquina de ensayos de fatiga⁽¹⁴⁾.</i>	56
<i>Figura 18: Transductor de fuerza utilizado, marca HBM modelo U9B de 10kN.</i>	59

<i>Figura 19: Transductor de desplazamiento utilizado, marca HBM modelo WAT de 50mm.</i>	<i>60</i>
<i>Figura 20: Amplificador de la marca HBM modelo QuantumX MX840.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 21: Modificación de pasadores.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 22: Modificación a las mordazas.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 23: DCL de la mordaza.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 24: Máquina de fatiga a flexión alternativa con los equipos periféricos de control y adquisición de datos.</i>	<i>66</i>
<i>Figura 25: ensayos de tracción, Fuerza Vs. Elongación.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 26: Ensayos de tracción.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 27: Probetas ensayadas a tracción.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 28: Histéresis.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 29: Histéresis ampliada en los extremos.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 30: Curva ϵ-N de fatiga a bajo ciclaje del PEAD de fabricación nacional.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 31: Curva Esfuerzo-Deformación cíclica y estática.</i>	<i>81</i>
<i>Figura 32: Curva Esfuerzo-Numero de Ciclos.</i>	<i>82</i>

INTRODUCCION

Desde la industrialización hasta la actualidad, la humanidad se ha visto en la necesidad de desarrollar nuevos materiales, con mayores propiedades mecánicas, mejores propiedades químicas, de fácil conformado y a un menor costo. Entre los materiales desarrollados, nos encontramos con el polietileno de alta densidad (PEAD).

El PEAD es un material el cual ha tenido muchas aplicaciones en gran parte del mundo, unos ejemplos de estas son: bolsas, envases para fluidos, cajas, juguetes, piezas mecánicas, embarcaciones, camillas, tuberías, cascos de protección, entre otras. En Venezuela contamos con la materia prima y tenemos dos grandes fábricas de tuberías de este material, en Barquisimeto y Maracaibo, las cuales están siendo utilizadas para transportar agua.

Capítulo I

EL PROBLEMA

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El PEAD nacional, no se está utilizando de manera eficiente en la actualidad y no se pueden diversificar sus aplicaciones, debido a que no se conocen todas sus propiedades mecánicas.

Por esto es necesario determinarlas, ya que éstas son imprescindibles al momento de seleccionar un material en el proceso de diseño de una pieza o elemento mecánico. Algunos ensayos estáticos del PEAD nacional han sido realizados, pero muy pocos en fases dinámicas y ninguno en flexión alternativa.

1.2 MOTIVACION

Debido al auge que ha tenido este material en otros países y contando nosotros con la materia prima y fabricas piloto, se prevé que en un futuro no muy lejano se utilicen para transportar otro tipo de fluidos a altas presiones y temperaturas críticas.

Además se desconocen algunas propiedades mecánicas del PEAD de fabricación nacional, lo que nos incentiva a determinarlas mediante ensayos experimentales y aproximaciones matemáticas.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Estudio del comportamiento a la fatiga en bajo ciclaje del PEAD de fabricación Nacional.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudiar el estado del arte.
- Evaluar las propiedades estáticas del PEAD.
- Determinar las propiedades dinámicas del PEAD en bajo ciclaje.
- Determinar la curva esfuerzo deformación dinámica.
- Determinar el modelo matemático que ajuste los puntos experimentales.
- Comparar los resultados obtenidos con los materiales más usados.

Capítulo II

MARCO TEORICO

2.1 ANTECEDENTES RELACIONADOS CON EL ESTUDIO

En el presente estudio de investigación existen diversas revisiones documentales y bibliográficas, con la finalidad de recoger información sobre aquellas indagaciones que guardan una relación de manera directa o indirecta con este trabajo de investigación, de modo que sirven como punto de referencia. Entre las investigaciones previas relacionadas al trabajo, se encontraron las siguientes:

En el año 1898, Von Pechmann obtuvo un polímero de estructura equivalente al polietileno llamada polimetileno. Durante los próximos 40 años continuaron los estudios de este producto, en 1935 fue inventado el polietileno por los científicos Reginald Gibson y Eric Fawcett; luego en 1938, Imperial Chemical Industries fabricó el polietileno por medio de la primera planta piloto, iniciándose la producción comercial en 1939 en Northwich, Cheshire.

En 1953, Karl Ziegler y Erhard Holzkamp, basándose en los trabajos anteriores, estudiaron el proceso de polimerización a baja presión, obteniendo un polietileno de mayor densidad llamado Polietileno de alta densidad (PEAD). En 1955 se inauguró en Alemania la primera fábrica de este material. Paralelamente en USA se desarrollaba un proceso industrial de obtención de polietileno de alta densidad, altamente cristalino utilizando presiones medias, y algunos catalizadores determinados. La primera planta industrial se montó en Pasadena, California en 1957.

En 1963, Ziegler gana el premio Nobel en química por haber inventado la tecnología para obtener el PEAD.

Debido a la creciente utilización que ha tenido el PEAD en la industria, se ha hecho indispensable el estudio mediante ensayos mecánicos. La mayoría de los

materiales utilizados en ingeniería están sometidos a cargas cíclicas, razón por la cual se impulsa el desarrollo cada día de experimentos confiables que permitan realizar la caracterización del comportamiento mecánico de los materiales y de sus procesos de fractura en condiciones de baja, media y alta velocidad.

Se puede decir que el empleo de productos plásticos y compuestos de matriz polimérica es cada vez mayor en ingeniería, de tal manera que se hace necesario el estudio de sus propiedades para poder caracterizarlos bajo diferentes condiciones de aplicación de carga, siendo de especial interés conocer la respuesta de los mismos a las altas velocidades de sollicitación. Este tipo de estudio data de varias décadas y es considerado uno de los temas más relevantes en el área de los materiales. Entre las primeras investigaciones relacionadas con el comportamiento a fatiga de materiales poliméricos se encuentra el estudio sobre mecanismos de falla por fractura, en donde se manifiestan las principales variables involucradas en la respuesta a fatiga de estos materiales.

La mayoría de los estudios relacionados con la fatiga de materiales poliméricos se enfocan en materiales compuestos (materiales reforzados), esto con fines específicos para ser usados en la industria de la aviación y el automovilismo, entre otras. En febrero de 1997 Ferreira, Costa y Richardson, realizaron estudios a fatiga en el polipropileno reforzado con fibra de vidrio, evaluando el efecto de la frecuencia (2 y 10 Hz), la relación de esfuerzos, la temperatura y el efecto del factor de concentración de esfuerzo. Es importante señalar que durante el ensayo de fatiga se notó un aumento en la temperatura a medida que aumentaba el ciclo de carga y en especial cuando se acercaba a la fractura.

Un trabajo similar fue presentado por Kultural y Eryurek, en febrero del 2000, quienes estudiaron el comportamiento a la fatiga de Polipropileno reforzado con carbonato de calcio, considerando diferentes porcentajes de carbonato de calcio (0%, 20% y 40%), y frecuencia de carga de 23 y 50 Hz. Los resultados muestran que

la falla en los especímenes analizados se origina por un aumento de la temperatura debido a las altas frecuencias y amplitudes de esfuerzos.

En ese mismo año, Pearsons estudió sobre mecanismos de falla por fractura, en donde se manifiestan las principales variables involucradas en la respuesta a fatiga de estos materiales.

López *et al.* (2001) publican un trabajo titulado “Predicción de vida a fatiga en materiales compuestos de fibra de carbono bajo carga de amplitud variable”, en el que analizan la aplicabilidad de un modelo general de fatiga de la familia de Weibull a la definición del campo S-N y a la predicción de vida en fatiga mediante la hipótesis de acumulación de daño. La validez del modelo se contrasta mediante un programa experimental de fatiga bajo carga de amplitud variable por bloques y aleatoria gaussiana de banda estrecha, aplicado a un compuesto laminado de fibra de carbono y epoxi.

Barron *et al.* (2001) realizaron un estudio experimental donde evaluaron la influencia de la frecuencia de carga en el comportamiento a fatiga de sistemas compuestos de láminas de T300/914C y matriz de fibras de carbono epoxi. Los ensayos a fatiga fueron realizados con una relación de esfuerzos mayor a 1 (Tracción – Tracción), tomando en consideración varios niveles de esfuerzos, orientaciones en la probeta y a las frecuencias de carga de 5, 10 y 20 Hz. Este estudio demostró que la vida a fatiga depende de la orientación de las fibras y de la frecuencia de carga.

Similar trabajo fue presentado por Towo y Ansell en 2007, donde representaron las curvas S – N y el diagrama de histéresis para una matriz epoxi y poliéster, las relaciones de esfuerzo utilizada fueron de $R = 0,1$ y $R = -1$.

En el año 2003, en la Universidad Politécnica de Cataluña, Mayogo presentó su tesis Doctoral titulada “Estudio constitutivo de materiales compuestos laminados sometidos a carga cíclica”, en el que se desarrolló un modelo constitutivo a través de

métodos numéricos con elementos finitos que permitió el análisis del fenómeno de la fatiga en los materiales poliméricos compuestos laminados, desarrollando además ejemplos de aplicación.

En el año 2004 P.K Mallick y Yuanxin Zhou, estudiaron el efecto del esfuerzo medio en Poliamida -6,6 reforzada con fibras de vidrio; este proyecto se basó en determinar la resistencia a la fatiga para la poliamida reforzada realizando variaciones en el esfuerzo medio y en la relación de esfuerzos máximos y mínimos. Con los resultados obtenidos se propuso una modificación de la ecuación de Gerber que se pudiera aplicar en el diseño con polímeros compuestos sometidos a fatiga. La temperatura fue otro factor considerado de suma importancia en esta investigación.

Merah et al. (2005) realizaron un estudio sobre el efecto de la frecuencia y temperatura en el crecimiento de grieta por fatiga en el Policloruro de Vinilo Clorado (CPVC); las condiciones de ensayo para la frecuencia y temperatura fueron ubicadas en rangos de 0,1-10 Hz y de -10 °C hasta 70 °C; los resultados mostraron que la propagación del crecimiento de grieta en el CPVC se incrementa a las temperaturas de 50 y 70 °C.

Revuelta (2006) investigó la influencia de la relación de esfuerzos (R) en el comportamiento a fatiga de un sistema vidrio-epoxi unidireccional; en este estudio, los resultados experimentales se desarrollaron para $R=0$ y $R=0,5$ y para diferentes ángulos entre la fibra y la carga. Los resultados demostraron que la vida a fatiga del material unidireccional disminuye al incrementar la tensión media y que a medida que el ángulo entre la fibra y la dirección de aplicación de la carga aumenta, el material presenta un comportamiento más estable.

Como se observa, una de las variables más estudiadas en las investigaciones anteriores de fatiga en polímeros, es el incremento de temperatura durante las pruebas de fatiga, ya que ésta debilita al polímero y provoca que su resistencia a la fatiga sea menor.

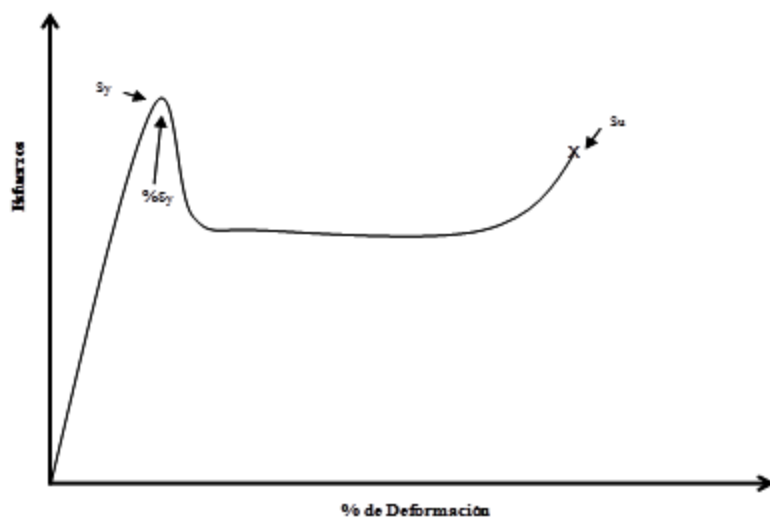


Figura 1 : Curva Esfuerzos Vs. Deformación para el PEAD (Young y Lovell, 1991).

2.2 POLIMEROS

Un polímero es un material que está constituido por moléculas de cadena larga, que a su vez consisten de unidades repetitivas que se conectan entre sí. Puede haber miles o millones de unidades en una sola molécula de polímero. El término se deriva de las palabras griegas *poly*, que significa muchos, y *meros* que significa partes. Las pequeñas unidades, llamadas monómeros, son generalmente moléculas orgánicas insaturadas simples; los átomos se mantienen unidos en esta molécula por medio de enlaces covalentes, y cuando se unen para formar el polímero, esos mismos enlaces mantienen unidos a los eslabones de la cadena. Lo que distingue a los polímeros de los materiales constituidos por moléculas de tamaño normal son sus propiedades mecánicas. En general, los polímeros tienen una muy buena resistencia mecánica

debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen⁽¹⁾. Las fuerzas de atracción intermoleculares dependen de la composición química del polímero y pueden ser de varias clases. Las más comunes son las fuerzas de Van der Waals, las fuerzas de atracción dipolo-dipolo, enlaces de hidrógeno y atracciones iónicas. Muchos sólidos moleculares tienen estructura cristalina, sin embargo, una característica propia de los polímeros es que pueden ser sintetizados, tanto en forma amorfa como en forma cristalina, aunque estrictamente los polímeros llamados “cristalinos” presentan cierta cantidad de fase amorfa siendo, en realidad, semicristalinos⁽²⁾⁽³⁾.

2.2.1 Propiedades mecánicas de los polímeros

Las pruebas mecánicas consideran fuerzas por separado o combinadas. Las pruebas de tracción, compresión y cizalla sirven para medir sólo una fuerza, mientras que las de flexión, impacto y dureza implican dos o más fuerzas simultáneas⁽⁴⁾. A continuación se presenta una descripción de las propiedades mecánicas más importantes y las normas que rigen su determinación:

2.2.2 Comportamiento elástico

En los polímeros termoplásticos, la deformación elástica es el resultado de dos mecanismos. Un esfuerzo aplicado hace que se estiren y distorsionen los enlaces covalentes de las cadenas, permitiendo que éstas se alarguen elásticamente. Al eliminar este esfuerzo, se recuperan de esta distorsión prácticamente de manera instantánea. Además, se pueden distorsionar segmentos completos de cadenas de polímeros; y al eliminar el esfuerzo aplicado, los segmentos volverán a su posición original sólo después de un periodo de horas o incluso meses. Este comportamiento viscoelástico, dependiente del tiempo contribuye al comportamiento elástico no lineal⁽⁴⁾.

2.2.3 Comportamiento plástico

Los polímeros termoplásticos se deforman plásticamente cuando se excede al esfuerzo de cedencia. Sin embargo, la deformación plástica no es una consecuencia de movimiento de dislocación como lo es en los aceros. En lugar de eso, las cadenas se estiran, giran, se deslizan bajo la carga, causando una deformación permanente. Debido a este fenómeno se puede explicar la reducción de esfuerzo más allá del punto de cedencia⁽⁴⁾.

2.2.4 Fractura

Los polímeros pueden fracturarse por mecanismo dúctil o por mecanismo frágil. Por debajo de la temperatura de transición vítrea, los polímeros termoplásticos fallan en modo frágil, de manera muy parecida a los vidrios cerámicos. Sin embargo, por encima de la temperatura de transición vítrea, fallan en forma dúctil, con evidente deformación extensa e incluso estricción antes de la falla⁽⁴⁾.

2.2.5 Comportamiento Visco elástico de los Polímeros

La capacidad de un esfuerzo para provocar el deslizamiento de cadenas y la deformación plástica está relacionada con el tiempo y la rapidez de deformación. Si el esfuerzo se aplica lentamente, las cadenas se deslizan fácilmente una al lado de otra; si se aplica con rapidez, no ocurre deslizamiento y el polímero se comporta de manera frágil. La dependencia de las deformaciones elásticas y plásticas de los termoplásticos con el tiempo, se explica mediante el comportamiento viscoelástico del material. A bajas temperaturas o bajas velocidades de carga, el polímero se comporta como cualquier otro material sólido, como los metales o los cerámicos. En la región elástica, el esfuerzo y la deformación están directamente relacionados. Sin embargo, a altas temperaturas o a bajas velocidades, el material se comporta como líquido

viscoso. Este comportamiento viscoelástico ayuda a explicar por qué el polímero se deforma bajo carga y también permite conformar el polímero convirtiéndolo en productos útiles. La viscosidad del polímero describe la facilidad con que las cadenas se mueven causando deformación⁽⁴⁾.

Una de las formas de clasificar a los polímeros es según su comportamiento ante un aumento de temperatura:

- Termoplásticos.
- Termoestables
- Elastómeros.

2.2.6 Termoplásticos

Son polímeros de cadenas largas que al calentarse se reblandecen y pueden moldearse a presión. Representan el 78-80% del consumo total de los polímeros. Son todos aquellos materiales poliméricos orgánicos que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado. Las moléculas pueden ser de origen natural; por ejemplo, la celulosa, la cera y el caucho (hule) natural; o sintéticas, como el polietileno y el nylon. Su presentación para la fabricación de objetos específicos son resinas en forma granulada, en polvo o en disolución. Con estos materiales se fabrican los productos plásticos terminados⁽⁵⁾.

El uso de los plásticos en aplicaciones ingenieriles está en constante aumento debido a factores como su ligereza, bajo coste y facilidad de fabricación; además, algunos polímeros presentan propiedades características que los hacen insustituibles en ciertas aplicaciones.

Los principales son: polietilenos (PE), polipropilenos (PP), cloruro de polivinilo (PVC), poliestireno (PS), acrilonitrilo- butadieno-estireno (ABS)⁽⁵⁾.

2.2.7 Termoestables

Estos materiales se caracterizan por tener cadenas poliméricas entrecruzadas, formando una resina con una estructura tridimensional que no se funde. Polimerizan irreversiblemente bajo calor y/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 epoxídicas. Pertenecen a este grupo el poliuretano, las resinas de urea y la melamina con formaldehído, las resinas fenólicas, las epoxídicas y las de poliéster⁽⁵⁾.

2.2.8 Elastómeros

Tienen una estructura intermedia, en la cual se permite que ocurra una ligera transformación de enlaces cruzados entre las cadenas moleculares. Los elastómeros son capaces de deformarse elásticamente en grandes magnitudes sin cambiar de forma permanentemente. Típicamente son polímeros amorfos que no cristalizan fácilmente. Tienen una baja temperatura de transición vítrea y las cadenas se pueden deformar elásticamente con facilidad al aplicar una fuerza y al cesar esta fuerza recuperan su forma original⁽⁵⁾.

2.3 POLIETILENOS

Las olefinas, en estado gaseoso, como el etileno, tienen poca tendencia a polimerizar, pero las investigaciones de los ingleses Perrin y Swallow realizadas en 1931 en los laboratorios de la Imperial Chemical Industries, permitieron observar que el etileno sometido a temperaturas de unos 170 ° centígrados y 1.400 atmósferas de presión, se transformaba en polímeros de etileno con el aspecto de polvillo blanco. El PEBD, polietileno de baja densidad, o LDPE (low-density polyethylene), como se

conoce internacionalmente, se utiliza para fabricar bolsas flexibles, embalajes industriales, techos de invernaderos agrícolas, etc. También, gracias a su resistencia dieléctrica, se utiliza para aislante de cables eléctricos. El PEAD, polietileno de alta densidad, o HDPE (High-density-polyethylene), se utiliza también para bolsas (grandes almacenes, mercados, entre otros), y gracias a su resistencia al impacto se utiliza para cajas, Tuberías, juguetes, cascos de seguridad laboral⁽⁶⁾.

2.3.1 Polietileno de Alta Densidad (PEAD)

El polietileno es un material termoplástico producido por la polimerización del monómero etileno. El comportamiento del polietileno, llamado viscoelástico, es totalmente distinto de los materiales elásticos. En los materiales elásticos, la relación entre esfuerzos y deformaciones (dentro de determinados límites) es lineal e independiente del tiempo, es decir, cuando se anula el esfuerzo en el material éste recupera su forma inicial. En los materiales termoplásticos no es así, quedando afectados por fenómenos de deformación plástica, caracterizados por deformaciones no proporcionales a los esfuerzos, dependientes del tiempo y de la temperatura⁽⁶⁾.

En el caso del PEAD, con la permanencia de esfuerzos, se incrementa la deformación por fluencia del material, disminuyendo progresivamente su resistencia mecánica⁽⁶⁾.

El elevado coeficiente de dilatación térmica lineal del polietileno (en torno a 2×10^{-4} mm/°C), que en un principio podría suponer una desventaja frente a otros materiales, no lo es tanto, debido a que las deformaciones térmicas experimentadas son fácilmente absorbidas por el PEAD, sin provocarle esfuerzos apreciables dada su flexibilidad. Por otro lado, y debido a las características mecánicas del polietileno, las variaciones de presión bruscas o golpes de ariete se ven disminuidos en torno a un 40% con respecto a otros materiales como fundición o fibrocemento. Esto se debe en

gran medida a que la velocidad de propagación de las ondas de ariete es alrededor de 5 veces menor que en otros materiales como el acero⁽⁶⁾.

2.3.2 características de polietileno de alta densidad

El polietileno es un material destinado a diversas aplicaciones debido a que posee las siguientes características:

- baja rugosidad
- resistencia a la corrosión
- Flexibilidad, aun a bajas temperaturas
- Bajo peso
- Resistencia a presiones internas y externas
- Facilidad de instalación.
- Excelente resistencia térmica
- Muy buena resistencia al impacto.
- Es sólido, incoloro, translúcido, casi opaco.
- Es tenaz, ligero y reciclable.
- Es más rígido que el polietileno de baja densidad.
- Presenta dificultades para imprimir, pintar o pegar sobre él.
- Su densidad es igual o menor a 0.952 g/cm³.
- No es atacado por los ácidos, resistente al agua a 100°C y a la mayoría de los disolventes ordinarios.

La vida útil mínima de este material es de 50 años. Este tiempo es comprobado a través de ensayos realizados a la resina utilizada

El polietileno utilizado para tuberías está definido por la característica de la resina en relación a su MRS. El MRS (Minimum Required Strength) caracteriza la

resistencia de la resina para fines de cálculo de presión de servicio de las tuberías. Las resinas utilizadas en la elaboración de las tuberías analizadas en este proyecto son MRS 80 y MRS 100, también conocidas como PE-80 y PE-100. Estos valores de 80 kgf/cm (8 MPa) y 100 kgf/cm (10 MPa) corresponden al esfuerzo soportado por el material PE-80 y PE-100, respectivamente⁽⁷⁾.

En resumen, el polietileno es un material al que no se le pueden aplicar las leyes puras de la mecánica clásica dado que no es un material ni elástico ni plástico (ver Figura 1). En pequeñas deformaciones, el polietileno se comporta de forma elástica recuperando sus dimensiones iniciales, siendo aplicable la ley de Hooke. Una vez alcanzado el punto de máxima deformación elástica se produce una deformación plástica donde la deformación es irreversible (no se recupera). Por todo esto se puede afirmar que la deformación sufrida por el polietileno no es directamente proporcional a la carga aplicada ni independiente del tiempo.

2.3.3 métodos de conformado del polietileno de alta densidad

Se puede procesar por los métodos de conformado empleados para los termoplásticos de acuerdo a su producto final, entre los más comunes se encuentran:

- Extrusión: Película, cables, hilos, tuberías.
- Co-Extrusión: Películas y láminas multicapa.
- Moldeo por inyección: Partes en tercera dimensión con formas complicadas
- Inyección y soplado: Botellas de diferentes tamaños
- Extrusión y soplado: Bolsas o tubos de calibre delgado
- Extrusión y soplado de cuerpos huecos: Botellas de diferentes tamaños
- Rotomoldeo : Depósitos y formas huecas de grandes dimensiones

2.4 FATIGA EN MATERIALES

El comportamiento de los materiales en régimen estático es ampliamente conocido y la totalidad de las propiedades necesarias para el diseño están perfectamente caracterizadas (por ejemplo: esfuerzos de fluencia, resistencia a la ruptura, elongación, módulo de Elasticidad, etc.). Desde el punto de vista de diseño estático es suficiente con estos datos de partida para realizar proyectos, ya que se conocen las características de los materiales. Sin embargo, cuando una pieza se somete a esfuerzos variables por efecto de que las fuerzas actuantes lo hagan, o por movimientos de la propia pieza, tanto los procedimientos de diseño estático como las propiedades estáticas del material pierden su valor, debido a que las piezas fallan por haber sufrido un determinado número de ciclos de trabajo. En general, las fallas se producen muy por debajo de los esfuerzos que se pueden considerar aceptables en diseño estático y de forma repentina, sin sufrir ninguna deformación que advierta acerca del fallo del material. Este fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo, se denomina, "Fatiga". Ésta ocurre porque hay deformaciones plásticas cíclicas que provocan cambios irreversibles en la estructura de los materiales⁽⁸⁾.

En 1860, Wöhler desarrolló diversas máquinas de ensayo para el estudio sistemático del fenómeno. De los ensayos de Wöhler, se pueden extraer dos conclusiones:

- Las fuerzas necesarias para provocar la ruptura con cargas dinámicas son inferiores a las necesarias en el caso estático.
- Existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompen, de hecho se conoce como el límite de fatiga.

El fenómeno de fatiga se produce por lo general en zonas donde el material es más propenso a sufrir deformaciones plásticas; esto se debe a la presencia de defectos como: las inclusiones, porosidades o concentraciones de esfuerzos, los cuales

aumentan las probabilidades de formación de fisuras o microgrietas por el efecto cíclico de cargas.

En las zonas donde se inicia la formación de grietas, los materiales pueden soportar cargas mientras no sea excedido el límite elástico de esfuerzo; de lo contrario, se produce una deformación localizada. En este último caso, la grieta puede ser tratada como una perturbación si sus efectos son mínimos, pero si el ataque es severo bajo la acción de esfuerzos aplicados, se puede llegar a formar una zona plástica donde la fragilidad de la misma conduce a la propagación de grietas y falla de las piezas o estructuras mecánicas⁽⁸⁾.

La historia de una grieta que se desarrolla en un componente metálico sometido a fatiga tiene típicamente tres etapas: una de iniciación, una de propagación estable y finalmente una propagación acelerada que conduce a la falla catastrófica del componente.

- **Etapa I:** corresponde a una fase donde se producen los primeros cambios microestructurales, con aumento de la densidad de dislocaciones y formación de microfisuras y posterior localización de las zonas con daño irreversible.
- **Etapa II:** en esta se inician las macrogrietas y la formación de fisuras con tamaños similares al tamaño de grano del material, con tendencia a la propagación total de las grietas.
- **Etapa III:** se produce un proceso de propagación inestable, provocando la fractura o fallo total de la pieza. La magnitud de la concentración de deformación plástica en el extremo de la grieta controla el radio de crecimiento de la misma.

La duración de cada una de las etapas descritas anteriormente puede variar considerablemente en función del tipo de material, carga aplicada, geometría, temperatura e irregularidades. A menudo resulta difícil distinguir estas etapas antes mencionadas⁽⁸⁾.

2.5 ENSAYO DE FATIGA

Los ensayos a fatiga pretenden caracterizar un determinado material sometido a condiciones de carga que varían con el tiempo, independientemente de las condiciones de uso. Este tipo de ensayo pretende ser una referencia similar a la del ensayo de tracción para el caso de carga estática, aunque el comportamiento a fatiga es mucho más complejo que el estático y las teorías en que se basan los cálculos son menos rigurosas y fiables.

Las propiedades de la fatiga de los materiales pueden ser determinadas a partir de ensayos de simulación en el laboratorio. El equipo de ensayo debería ser diseñado para duplicar tanto como sea posible, las condiciones de servicio (nivel de esfuerzos, frecuencia de tiempo, patrón de esfuerzos, etc.)⁽⁹⁾.

Las series de ensayos se comienzan sometiendo a la pieza a ensayar a tensiones cíclicas con una amplitud de las tensiones máximas relativamente altas, usualmente en el orden de dos tercios de la tensión de tracción estática, contándose el número de ciclos a la rotura. Este procedimiento se repite en otras probetas disminuyendo progresivamente la amplitud de las tensiones máximas. Se representan los datos como esfuerzos versus el logaritmo del número de ciclos a la rotura para cada una de las probetas. Los valores de S se toman normalmente como amplitud de esfuerzos.

Los esfuerzos aplicados pueden ser de naturaleza: axial (tensión- compresión), flexionales (flexión) o torsionales. En general se puede decir que sólo son posibles 3 modos diferentes de fluctuaciones Esfuerzo-tiempo.

2.5.1 Variables de esfuerzos cíclicos

Para realizar cálculos de fallas por fatiga, es necesario conocer la variación de los esfuerzos a los que está sometida cualquier pieza, bien sea por cambio de las fuerzas a las que está sometida o por un cambio de posición con respecto a las cargas.

La variación de los esfuerzos en función del tiempo, viene definida por las componentes de esfuerzos en base a una forma sinusoidal. Tales componentes están expresadas por los esfuerzos máximos ($\sigma_{\text{máx}}$), mínimos ($\sigma_{\text{mín}}$), alternos (σ_a), medios (σ_m), rango de esfuerzos ($\Delta\sigma$) y la relación de esfuerzos (R). A continuación se muestran las expresiones que permiten determinar las componentes.

Esfuerzo Medio:

$$\sigma_m = (\sigma_{Max} + \sigma_{Min}) / 2 \quad \text{Ec. 1}$$

Esfuerzo Alternante:

$$\sigma_a = (\sigma_{Max} - \sigma_{Min}) / 2 \quad \text{Ec. 2}$$

Relación de Esfuerzos:

$$R = \sigma_{Min} / \sigma_{Max} \quad \text{Ec. 3}$$

Rango de Esfuerzos:

$$\Delta\sigma = \sigma_{Max} - \sigma_{Min} \quad \text{Ec. 4}$$

En las piezas sometidas a cargas variables se pueden producir las siguientes situaciones de variaciones de esfuerzos (ver figura 2):

Esfuerzo Fluctuante: En este caso, los valores de los esfuerzos máximo y mínimo no son iguales y se producen en una sola dirección. En ocasiones los esfuerzos pueden estar en distintas direcciones y se tendrán combinaciones de esfuerzos a compresión y tracción, respectivamente. La figura (2.a) y (2.b) muestra

las condiciones cuando la relación de esfuerzos (R) es mayor que 1 e igual a 0; condiciones bajo las cuales se desarrolla este proyecto.

Esfuerzos Intermitentes: Se producen cuando el esfuerzo mínimo es igual a cero y la incidencia de las cargas es solamente a compresión o tracción. (Ver figura 2.c)

Esfuerzos Totalmente Alternantes: En esta situación, el esfuerzo medio (σ_m) presente es igual a cero y la variación de esfuerzo se produce en ambas direcciones, es decir, se producen esfuerzos a tracción y compresión con igual magnitud pero con dirección distinta. (Ver Figura 2.d) (Avilés, 2005).

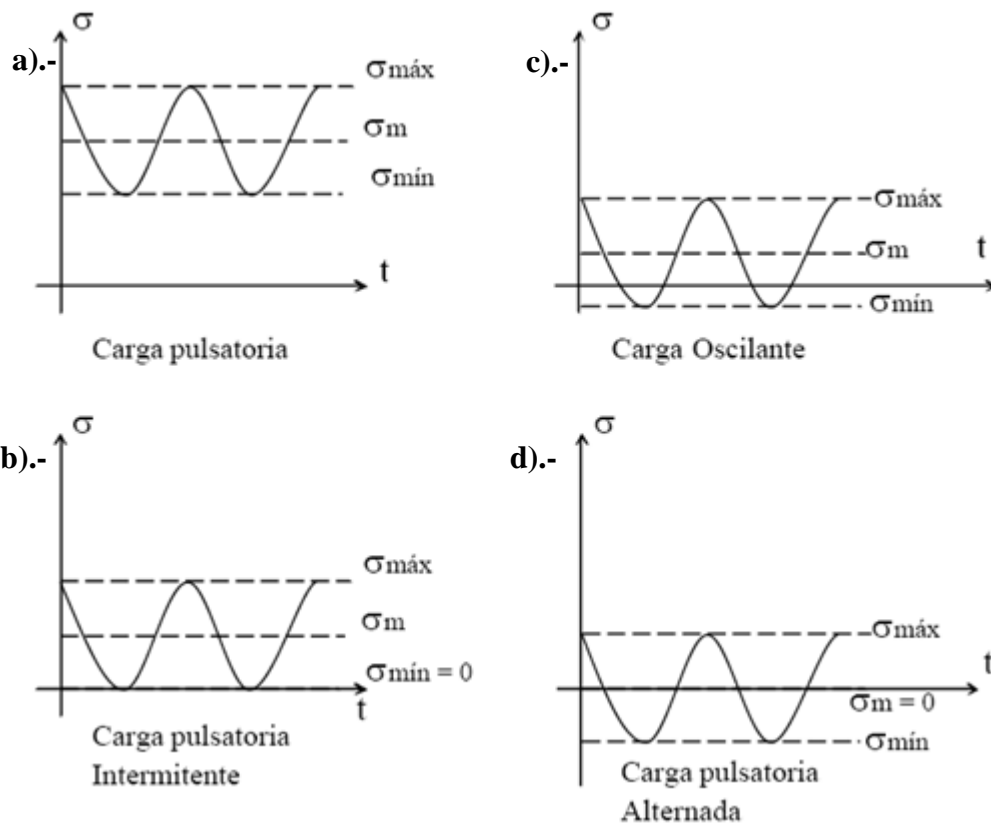


Figura 2 : Variaciones de Esfuerzos⁽¹⁰⁾.

2.5.2 Efecto Bauschinger

La respuesta de un material a una acción mecánica no solo depende del estado actual de tensión que soporta, sino también de la historia de deformaciones plásticas que ha sufrido. El efecto Bauschinger se refiere a una característica de los materiales en donde los valores de esfuerzo-deformación de los ensayos de tracción o compresión de carga monotonía presentan un comportamiento diferente en comparación con los mismos valores obtenidos en carga cíclica. Este fenómeno fue observado a finales del siglo XIX por el ingeniero alemán Johann Bauschinger quien encontró que el esfuerzo de fluencia en tracción o compresión variaba después de aplicar una carga de signo opuesto que causara deformación plástica.

Así mismo, se tiene que al realizar pruebas de deformación cíclica a una amplitud de esfuerzo o deformación constante se pueden observar dos tipos de respuestas:

a) la deformación disminuye o el esfuerzo aumenta de forma progresiva hasta alcanzar una amplitud constante o saturación; a este comportamiento se le llama endurecimiento cíclico.

b) el material se deforma cada vez mas o el esfuerzo va disminuyendo, hasta llegar a una estabilidad, aquí se dice que el comportamiento es de ablandamiento cíclico.

Al respecto, Manson (1963) determinó que el endurecimiento cíclico se presenta principalmente en materiales recocidos, mientras que el ablandamiento se observa en materiales deformados en frío.

Los cambios en el comportamiento de la deformación cíclica son más pronunciados al principio de carga cíclica (comportamiento transitorio), pero luego se estabiliza gradualmente (estado estable) con los ciclos, el material usualmente se estabiliza gradualmente al continuar los ciclos, es decir, la estabilización cíclica se completa usualmente dentro de un 10 a 40 % de la vida total de fatiga. Generalmente

los niveles de deformación en aplicaciones de cargas cíclicas son menores al 2%. La magnitud y tasa de los ciclos de endurecimiento o ablandamiento bajo condiciones de deformación controlada pueden ser evaluadas tomando la variación del esfuerzo como una función de los ciclos.

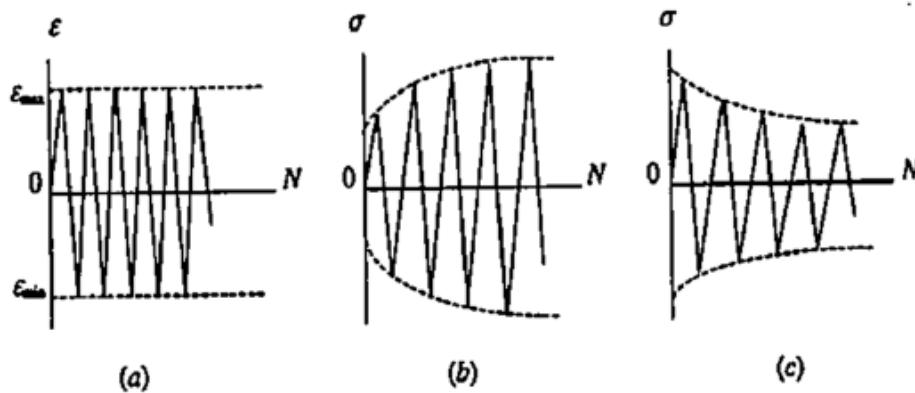


Figura 3: Variación del esfuerzo en un ensayo de deformación cíclica.

Como se observa en la figura 3, manteniendo la deformación constante (a) se pueden obtener dos respuestas del material después de cierto número de ciclos:

Endurecimiento cíclico (b), indicado por un aumento de la resistencia con la deformación o Ablandamiento cíclico (c) cuando se presenta una disminución de la resistencia con la deformación.

Un ciclo de histéresis de aproximadamente la mitad de la vida a la fatiga es generalmente usado para representar el estado estable del comportamiento de esfuerzo deformación de un material. Un ciclo de histéresis esfuerzo-deformación a deformación constante, es mostrado en la Figura 4, donde la curva continua color negro correspondiente a 1100 ciclos muestra el ciclo donde el esfuerzo se estabiliza.

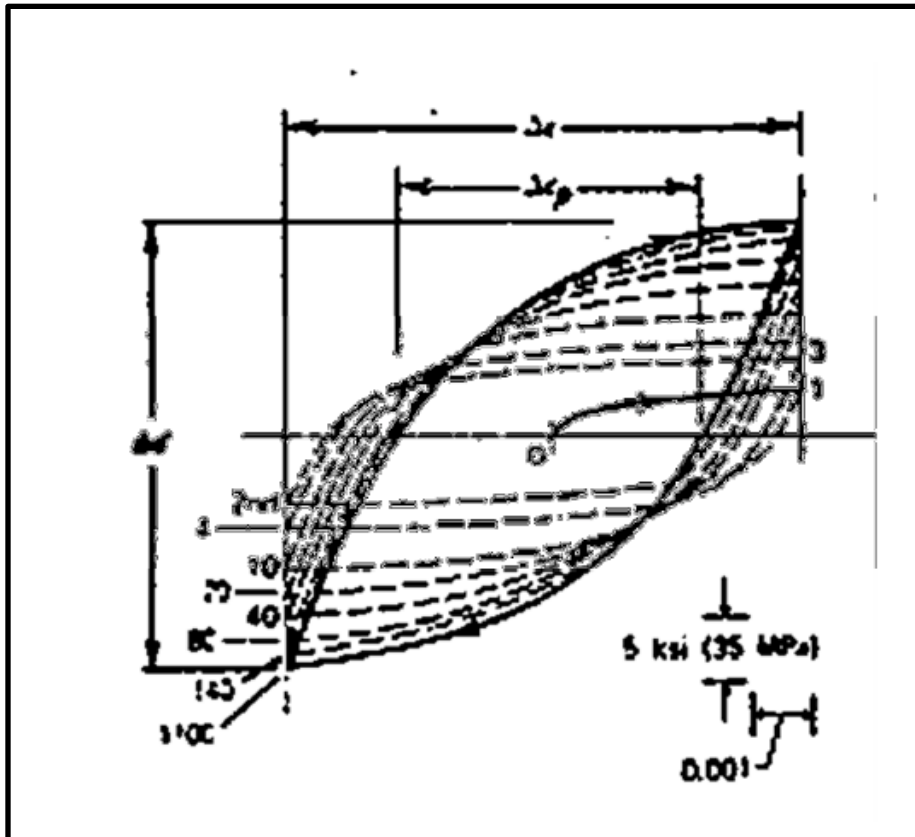


Figura 4: Ciclo de histéresis esfuerzo-deformación.

La deformación plástica ϵ_p en la curva esfuerzo-deformación cíclica puede ser modelada por la ecuación de Hollomon:

$$\sigma = k' * (\epsilon)^{n_f} \quad \text{Ecuación 5}$$

Dónde:

- σ : Esfuerzo total verdadero

- ϵ : Deformación plástica total verdadera
- K' : coeficiente de esfuerzo cíclico
- n_f : coeficiente de endurecimiento por deformación cíclica

Existen tres métodos de ensayos comúnmente usados para obtener la curva de

Esfuerzo-Deformación cíclica:

- a) Método Companion: Se requiere una serie de especímenes de prueba, donde cada espécimen es sometido a una amplitud de deformación constante hasta la falla. La mitad de la curva de histéresis para cada espécimen y la amplitud de deformación son utilizadas para obtener la curva del esfuerzo-deformación cíclica.
- b) Método de paso incremental: un espécimen único es sujeto a bloques repetidos de incremento y decremento de la deformación.
- c) Método a paso múltiple: El método es similar al ensayo de paso incremental, excepto que la deformación aumenta incrementalmente y en cada bloque la amplitud de deformación se mantiene constante. Una vez se alcanza estabilidad cíclica a la amplitud de deformación constante, el ciclo de histéresis estable se guarda y la amplitud de deformación se aumenta a un nivel más alto. Este proceso se repite hasta un número suficiente de ciclos de histéresis estables para construir la curva de esfuerzo-deformación cíclica.

El comportamiento de endurecimiento por deformación, la estabilización del esfuerzo (saturación) y otros efectos de la deformación cíclica dependen de la naturaleza del movimiento de dislocaciones y de la subestructura de dislocaciones que se formen en el material. En materiales recocidos, la densidad de dislocaciones inicial es baja, por tanto, con la deformación cíclica el material va aumentando su

densidad de dislocaciones, lo que hace que el endurecimiento sea similar al endurecimiento por deformación monotónica. Los materiales deformados en frío ya tienen una alta densidad de dislocaciones, sin embargo, la deformación cíclica produce una reorganización de las subestructuras de dislocaciones, (como por ejemplo en celdas) que permiten de nuevo el movimiento de éstas con el consecuente ablandamiento. En general, la deformación cíclica produce arreglos de dislocaciones muy estables y que son independientes de la condición inicial, una vez que se ha alcanzado la saturación.

2.5.3 Relación de Basquin

A partir de los trabajos de Wohler con rieles de trenes sujetos a flexión rotativa, los datos de fatiga fueron presentados en una curva S-Log N; donde S representa la amplitud del esfuerzo y Nf el número de ciclos a la falla. Mientras se observaba un límite de resistencia para muchos aceros sometidos a ensayos de amplitud constante de esfuerzo, dicho límite no existe para aceros de alta ductilidad y metales no ferrosos como las aleaciones de aluminio. Como estos materiales son de amplia aplicación en la industria aeronáutica y electrónica, esto causa que se deba erradicar este límite para mayor confiabilidad en el diseño. Por esto, Basquin mostro que la curva S-Log N puede ser linealizada utilizando todos los ejes coordenados en escala logarítmica, estableciendo de este modo la ley exponencial de la fatiga en la zona de alto ciclaje. Si los esfuerzos reales son usados en lugar de los ingenieriles, la curva entera puede ser linealizada y la amplitud de esfuerzo puede ser descrita como la resistencia o vida a la fatiga por la siguiente relación:

$$\sigma_a = \sigma'_f (N_f)^b \quad \text{Ecuación 6}$$

Dónde:

- σ_a = Amplitud real de Esfuerzo
- N_f = Ciclos a la falla (1ciclo = 2 reversos)
- σ'_f = Coeficiente de resistencia a la fatiga.
- b = Exponente de resistencia a la fatiga o exponente de Basquin.

Para la mayoría de los metales el exponente de Basquin (b) se encuentra en el rango de -0,05 a -0,12, en cuanto al coeficiente de resistencia a la fatiga (σ'_f) es en un sentido análogo al esfuerzo de fractura real del material (σ_f) correspondiente al ensayo de tracción (24). Varias relaciones entre σ'_f y σ_f se han propuesto, algunas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 1: Relación entre los coeficientes de resistencia a la fatiga y el esfuerzo real de fractura.

Halford and Morrow	$\sigma'_f = \sigma_f$
Manson	$\sigma'_f = 1,09\sigma_f$
Manson	$\sigma'_f = 0,92\sigma_f \quad (b=-0,12)$
Manson and Hirschberg	$\sigma'_f = 1,15\sigma_f \quad (b=-0,12)$

2.5.4 Relación Coffin-Manson

Esta relación se usa para caracterizar la vida a la fatiga a bajo ciclaje, para este tipo de fatiga se utiliza un modelo teórico denominado deformación-vida (ϵ -N), ya que en este caso los esfuerzos a los que se ve sometida la pieza generalmente superan el límite de fluencia, por lo cual las ecuaciones clásicas para el cálculo de los esfuerzos en el intervalo elástico ya no son válidas. Manson y Coffin proponen una ecuación empírica en donde relacionan la amplitud de la deformación plástica ($\Delta\epsilon_p$) con el número de ciclos a la falla (N_f) bajo esfuerzos uniaxiales. Dicha relación se puede expresar como:

$$\epsilon_p = \epsilon'_f (N_f)^c \quad \text{Ecuación 7}$$

Dónde:

ϵ_p = Deformación plástica

ϵ'_f = Coeficiente de ductilidad de fatiga

N_f = Ciclos a la falla (1 ciclo = 2 reversos)

c = Coeficiente exponencial de ductilidad de fatiga

Para la mayoría de los metales el exponente de ductilidad a la fatiga (c) se encuentra en el rango de -0,5 a -0,7, indicando un valor mayor o menor de dicho exponente una vida a la fatiga menor o mayor respectivamente. En cuanto al coeficiente de ductilidad a la fatiga (ϵ'_f) es en un sentido análogo a la ductilidad de fractura real del material (ϵ_f) correspondiente al ensayo de tracción. Varias relaciones entre ϵ'_f y ϵ_f se han propuesto, algunas se muestran en la Tabla N° 3. Aunque en si ninguna de estas relaciones son fiables para estimar el ϵ'_f a partir de las propiedades estáticas del material, siendo la única posibilidad confiable de hallar dicho coeficiente es por la medición directa de la curva de Coffin-Manson.

Tabla 2: Relación entre los coeficientes de ductilidad a la fatiga y la ductilidad a la fractura real.

Coffin	$\epsilon'_f = 0,35\epsilon_f$	
Tarnavelli and Coffin	$\epsilon'_f = 0,35\epsilon_f$	
Manson	$\epsilon'_f = 0,5\epsilon_f$	($c = -0,6$)
Manson and Hirschberg	$\epsilon'_f = 0,75\epsilon_f^{(0,75)}$	($c = -0,6$)
Manson	$\epsilon'_f = 0,76\epsilon_f^{(0,6)}$	($c = -0,6$)
Martin	$\epsilon'_f = 0,5\epsilon_f$	
Halford and Morrow	$\epsilon'_f = 0,5\epsilon_f$	
Morrow	$\epsilon'_f = \epsilon_f$	

2.5.5 Curva S-N

El diagrama S-N es la forma fundamental de representar los datos de la duración de una probeta a la fatiga, e ilustra la variación de vida media en fatiga con el esfuerzo. Se le suele llamar Curva de Fatiga o Curva S-N (Stress-Number of Cycles), e indica la duración de la probeta expresada en números de ciclos hasta la rotura, para la máxima tensión aplicada. Representa en ordenadas los esfuerzos máximos que producen la rotura por fatiga; y en abscisas, su duración en ciclos (suele representarse log N en lugar de N). Proviene de someter a ensayos una serie de probetas para determinar el número de ciclos (N) que soporta el material a distintos porcentajes de carga; se puede decir que es un modelo simplificado de la manera en que trabaja una pieza bajo cargas de fatiga en general.

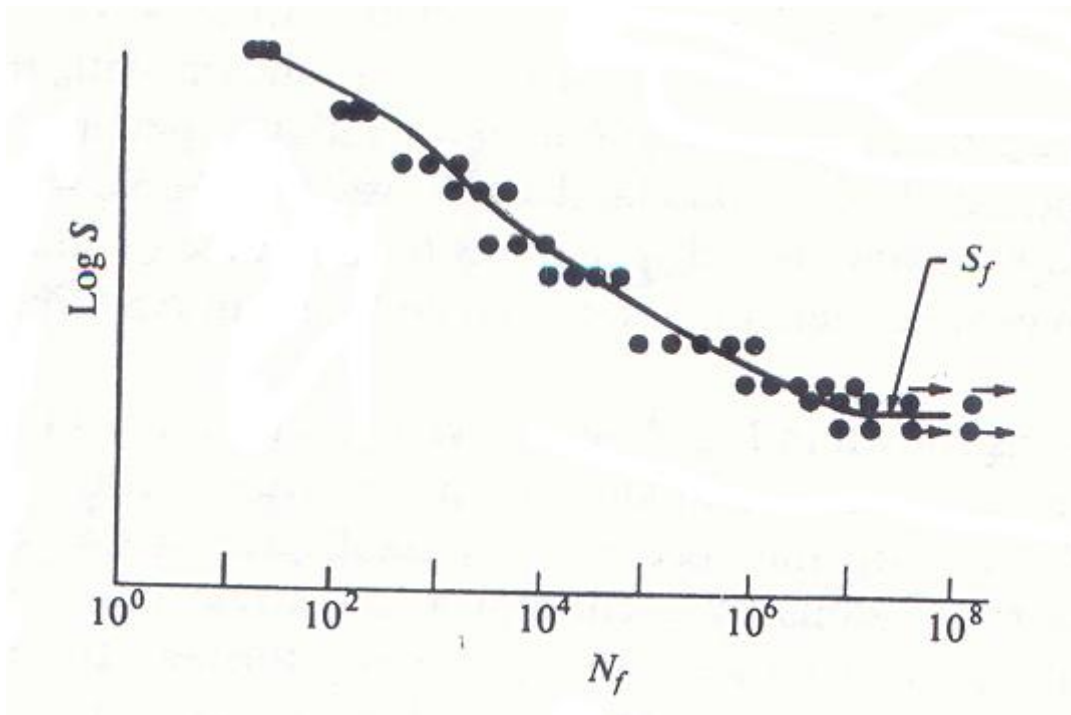


Figura 5 : Típica Curva Esfuerzos vs. Numero de Ciclos(N)⁽⁸⁾.

En esta curva pueden distinguirse dos zonas: la que comprende bajo número de ciclos aplicados (fatiga de bajo ciclaje), y la de bajo nivel de esfuerzo aplicado (fatiga de alto ciclaje). En la primer zona, el daño "puro" por fatiga se ve acompañado por el producido por las deformaciones plásticas que son apreciables a esos altos niveles de esfuerzos. La segunda zona es muy larga, lo que obliga a la selección de una escala logarítmica. La rama extrema de la curva se asemeja a veces a una recta y otras a una curva⁽⁸⁾. (Ver figura 5)

De todas maneras, la porción inferior tiende hacia la horizontal, y en ciertos materiales realmente llega a ser horizontal para todos los propósitos prácticos. Cuando la curva S-N se acerca en forma asintótica a la horizontal, el esfuerzo correspondiente se llama límite de fatiga (suele llamarse límite de aguante o duración), y la vida en fatiga a esfuerzos más bajos se presume ser infinita⁽⁸⁾.

Del análisis de la curva surge que el número N de ciclos que soporta una probeta antes de fallar aumenta al disminuir el esfuerzo S aplicado. Algunos materiales (ferrosos, aceros, titanio) presentan un tramo horizontal a un valor de esfuerzos bien determinado conocido como Límite de Fatiga (Endurance Limit), valor por debajo del cual se presume que el material durará un número infinito de ciclos sin romper⁽⁸⁾.

En el caso de materiales no ferrosos (Al, Mg, Cu), estas curvas no son asintóticas a la horizontal, lo cual implica que no existe un verdadero límite de fatiga, por lo tanto se utiliza un número de ciclos N, convenido arbitrariamente inferior a ese valor, bajo el cual se supone que la pieza resistirá infinitos números de ciclos. En resumen, los metales ferrosos tienen generalmente límite de fatiga, mientras que los metales no-ferrosos frecuentemente no. Debido a estas características el Límite de Fatiga constituye un criterio de diseño muy aceptable. Por ello es una magnitud frecuentemente tabulada, aunque por razones obvias debe basarse en ensayos finitos.

2.5.6 Transformación de curvas de Fatiga

Las curvas de fatiga, tanto para la zona de bajo como alto ciclaje, curvas S-N, ϵ -N y ϵt -N pueden ser transformadas mutuamente con la ayuda de la curva de esfuerzo deformación cíclica. Para materiales que sean totalmente estables cíclicamente, es decir, que no presenten ningún endurecimiento y/o ablandamiento cíclico, esta transformación debe ser perfecta. Pero esto es solo el caso académico. Para materiales reales el asentamiento entre la transformada y la medición directa de curvas de fatiga puede llegar a ser bueno en materiales que presenten un breve e insignificante (en el sentido del cambio total de la amplitud del esfuerzo o la deformación) estado de endurecimiento y/o ablandamiento cíclico. Mientras más prolongado y marcado sea el endurecimiento y/o ablandamiento cíclico del material, peor será el acuerdo entre la transformada y la medición directa. Ejemplo de esto se puede observar en la figura N° 14 en donde se muestra un diagrama S-N donde $\sigma_a = cte$ son la medición directa y $\epsilon_a = cte$ representan la transformación de una curva ϵ -N, mediante la respectiva curva esfuerzo-deformación cíclica de una aleación de aluminio que presentaba un breve pero prominente endurecimiento cíclico

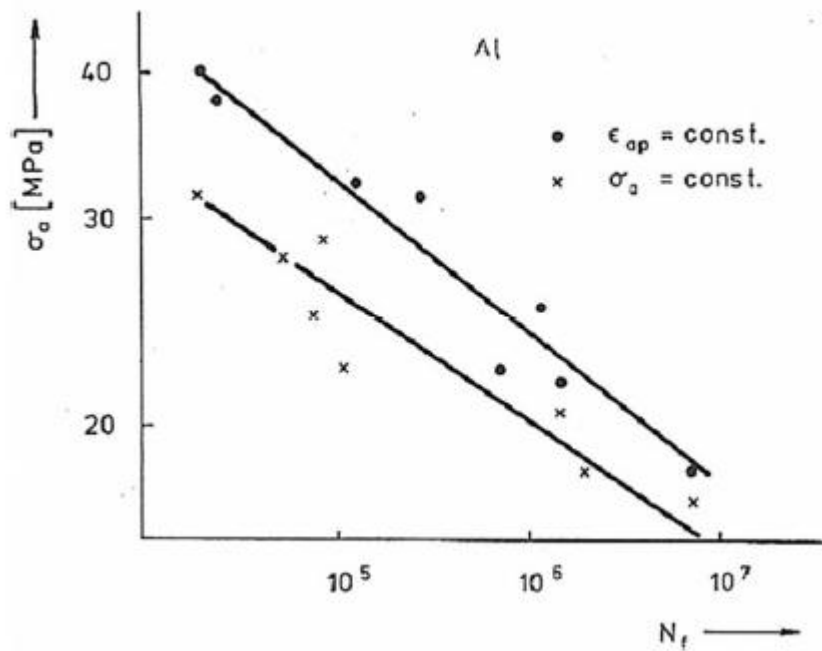


Figura 6: Relación Entre los puntos medidos directamente de una curva S-N y los puntos transformados de una curva ϵ -N de una aleación de aluminio que presenta un endurecimiento cíclico.

Matemáticamente, la transformación mutua de curvas de fatiga por medio de la curva esfuerzo-deformación cíclica indica que sus parámetros no son independientes. En ese caso dicha dependencia puede ser expresada por las ecuaciones 12 y 13. En las cuales mediante parámetros de los modelo de Basquin y Coffin-Manson es posible obtener los parámetros de la ecuación de potencial que modela la zona plástica de la curva esfuerzo deformación cíclica con la cual se permita realizar una transformación mutua bastante buena de las curvas de fatiga.

$$n_f = \frac{b}{c} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$k' = \frac{\sigma' f}{(\epsilon' f)^{n_f}} \quad \text{Ecuación 9}$$

2.5.7 Fatiga en Polímeros

Los materiales poliméricos son usados con frecuencia en aplicaciones donde las cargas son intermitentes y las piezas se encuentran sometidas a estados cíclicos de esfuerzos o de carga y descarga, como por ejemplo sistemas de tuberías, piezas para partes de automóviles, etc.

La respuesta a la fatiga de un polímero está regida por la combinación de factores intrínsecos del material, dentro de los cuales se pueden mencionar⁽¹¹⁾:

- Composición del polímero, peso molecular y distribución del peso molecular.
- Cambios estructurales y morfológicos inducidos por cargas mecánicas y el medio ambiente, como rotura de enlaces, alineamiento molecular y cristalización.
- El tipo de deformación, como elástica, viscoelástica o viscoelástica no lineal.
- Los modos de falla microscópicas, crazes o bandas de corte transversal.
- El ablandamiento térmico.

Existen factores externos que afectan altamente la resistencia a la fatiga de los polímeros, los cuales se mencionan a continuación⁽¹²⁾:

- Cuando la carga cíclica involucra altas velocidades, el material es propenso a calentamiento y ablandamiento térmico. Por tal motivo, el aumento de la frecuencia de carga, resulta en una reducción de la vida a la fatiga del componente.
- El incremento de la temperatura de la probeta durante la prueba depende también de sus dimensiones; en probetas delgadas, la mayor parte del calor

generado se pierde en el medio ambiente; por tal motivo, probetas gruesas son propensas al calentamiento excesivo y los resultados obtenidos serán una reducción en la vida del material.

- Un medio ambiente químicamente agresivo es un factor importante en la reducción de la vida a la fatiga de algunos polímeros sólidos.

2.5.8 Cálculo de Probetas para el Ensayo de Fatiga

El comportamiento a fatiga de las probetas depende principalmente del material, la geometría y la carga. Para garantizar la fatiga de un metal hay que someter la probeta a una carga cíclica tal que deforme la probeta aproximadamente en un 0,2%, en nuestro caso para plásticos y polímeros esta deformación debe ser del 2%.

El cálculo de las dimensiones de las probetas para el ensayo de fatiga se hizo para garantizar que la probeta fallara a bajo ciclaje. Primero se estableció una excentricidad fija en la máquina, esto nos garantizó cierta deformación en la probeta. La geometría de la probeta la tenemos limitada por la configuración de la máquina dejándonos como variable principal la altura de la probeta.

Para la realización de este cálculo se definieron las dimensiones geométricas de la probeta. Largo L , ancho W , espesor τ . (Ver figura 7).

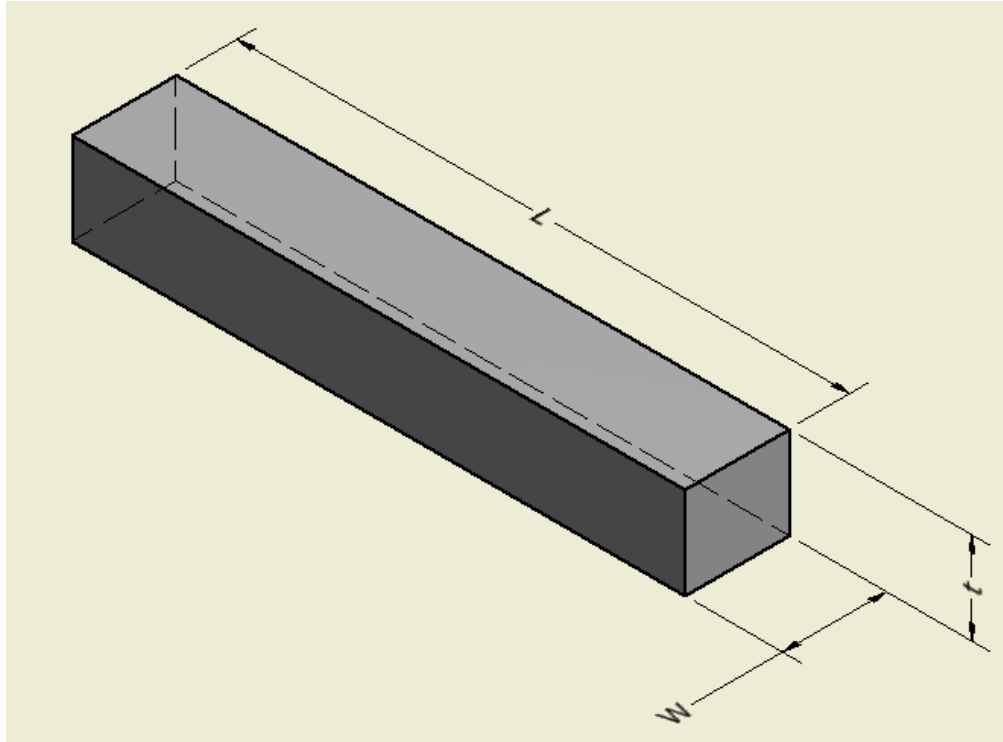


Figura 7: definición de las dimensiones.

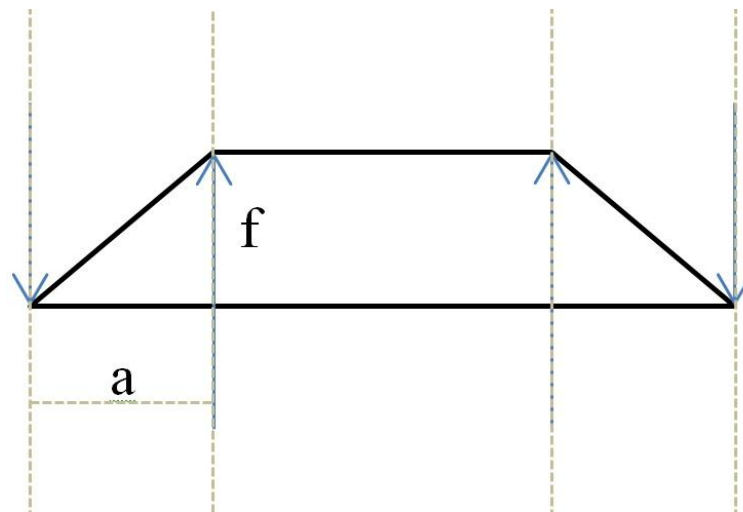


Figura 8: cargas en la zona a estudiar.

Utilizamos las siguientes ecuaciones:

1) Inercia en una barra de sección rectangular $I = \frac{1}{12} * w * t^3$ (10)

2) Esfuerzo de fluencia $\sigma_y = \frac{M * C}{I}$ (11)

3) Fibras estudiadas: la fibra estudiada es la central. $C = \frac{1}{2} * t$ (12)

Sustituimos (12) en (11) despejamos la inercia y obtenemos (13)

$$I = \frac{1}{2} * \frac{M * t}{\sigma_y} \quad (13)$$

Igualamos (10) con (13) despejamos el espesor y obtenemos (14)

$$t = \sqrt{\frac{f * a * 6}{w * \sigma_y}} \quad (14)$$

Dónde:

$I =$ inercia de una barra de seccion rectangular

$f =$ fuerza medida con el transductor de fuerza

$a =$ brazo de aplicacion de la fuerza

$w =$ ancho de la probeta

$\sigma_y =$ esfuerzo al 2% de deformación por encima del esfuerzo de fluencia, ensayo de tracción.

2.6 ENSAYO DE TRACCION EN POLIMEROS

La manera de obtener las propiedades a la tensión de los plásticos es muy similar a los metales; en la figura 4 y 5, se presenta un ejemplo del comportamiento de los polímeros cuando son sometidos a tracción y su relación con las etapas en el diagrama esfuerzo vs. deformación; en ella se observa que la cedencia de un polímero ocurre debido al desdoblamiento de las cadenas moleculares que lo forman, estas cadenas tienden a alinearse en dirección a la carga aplicada. En el punto de cedencia se forma un cuello el cual es seguido de una caída en el esfuerzo aplicado; el cuello se propaga a lo largo de la sección de garganta en un proceso conocido como endurecimiento por deformación hasta que ocurre la falla⁽¹³⁾.

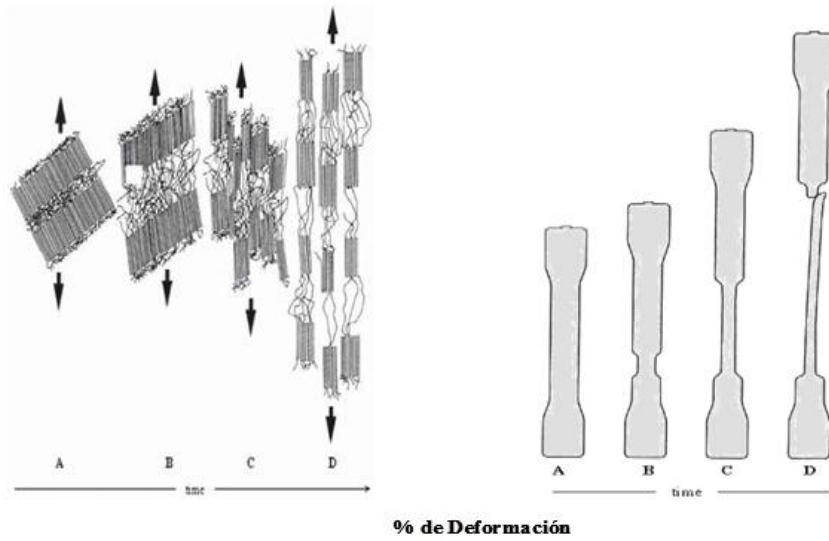


Figura 9 : Comportamiento a tracción de un Polímero semicristalino⁽¹³⁾.

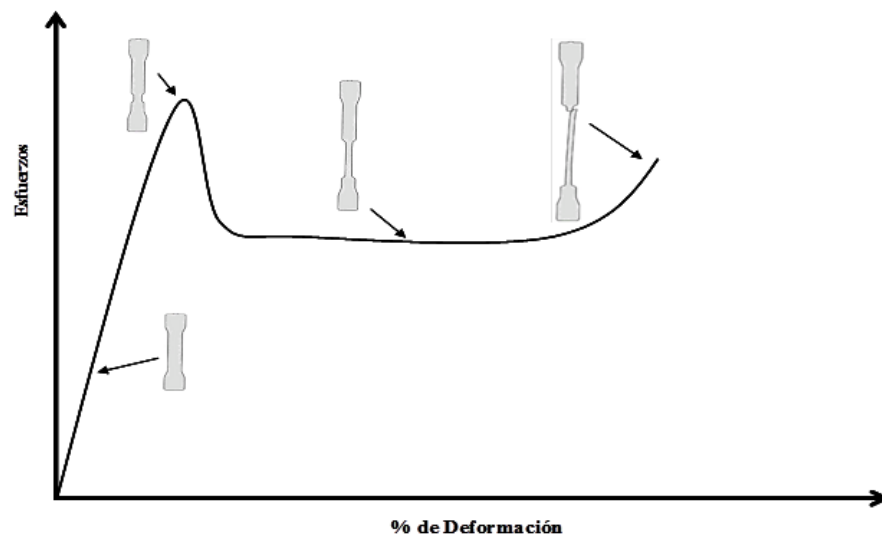


Figura 10 : Comportamiento a tracción de un Polímero semicristalino⁽¹³⁾.

Capítulo III

MARCO METODOLOGICO

3.1 RECURSOS DISPONIBLES

- Material de ensayo (sección de una tubería comercial, de PEAD de 24” de diámetro y 1,35” de espesor).
- Sierra mecánica vaivén.
- Sierra mecánica de cinta.
- Fresadora.
- Torno.
- Taladro de banco.
- Taladro de mano.
- Papel de lija.
- Máquina de ensayo universal.
- Máquina de ensayo de fatiga a Flexión alternativa.
- Dremel.
- Disco de alambre abrasivo.
- Esmeril de banco.
- Alicata de presión.
- Destornilladores.
- Llave ajustable.
- Guantes y lentes de protección.
- Tronzadora con disco de corte.
- Sierra manual.
- Sargentos.
- Prensa de banco.
- Computador con programa Excel® para procesar datos y graficar curvas.
- Inventor® como programa CAD para la realización de planos y diseños 3D.
- Programa CatmanEasy® para la recopilación digital de datos.
- Para consultas bibliográficas se tuvo a disposición libros y Trabajos Especiales anteriores similares que se encuentran en la Escuela de Ingeniería Mecánica.

3.2 MAQUINADO Y PREPARACION DE LAS PROBETAS

De la sección de tubería proporcionada se cortó con una tronadora un anillo de 200 mm de longitud que no tuviese ninguna unión por soldadura, a partir de este se comenzaron a maquinar las probetas. (Ver figura 11).

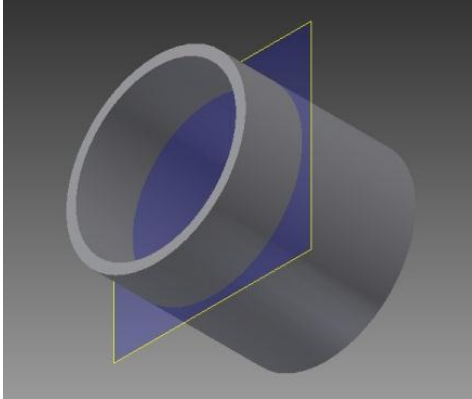


Figura 11: corte de sección de 200 mm.

3.2.1 Probetas para el Ensayo de Tracción

De la sección antes mencionada de 200 mm de longitud se realizó un corte por uno de los diámetros para poder trabajar con la sierra mecánica vaivén (ver figura 12), en esta se hicieron cortes paralelamente al eje del anillo, así se obtuvo muestras de 200 mm de largo, 34 mm de espesor y 30 mm de ancho (ver figura 13).

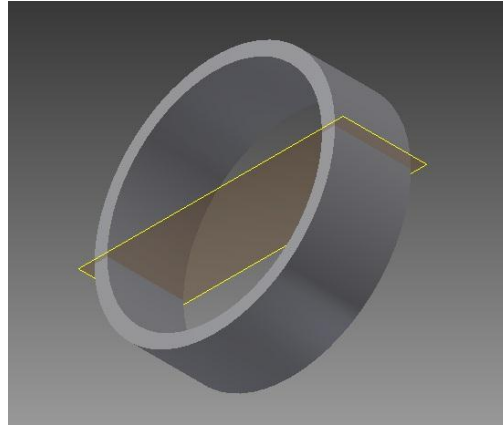


Figura 12: Corte diametral.

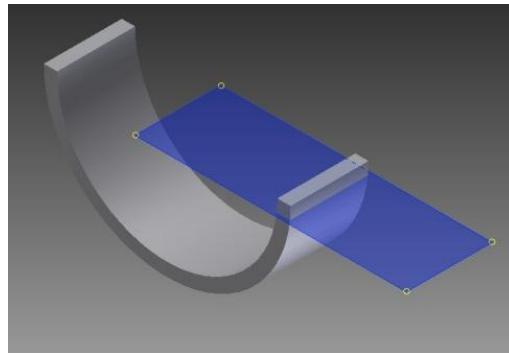


Figura 13: Corte paralelo al eje.

Estas muestras se tornearon con una herramienta de acero rápido, obteniendo cilindros de 20 mm de diámetro, luego se cambió la herramienta por una de acero rápido con una punta de radio 10 mm de diámetro, terminando de dar la forma de probeta según la norma ASTM A-370 para ensayos de tracción. Luego se llevó a la sierra de cinta y se cortó el material excedente. (ver Figura 14).

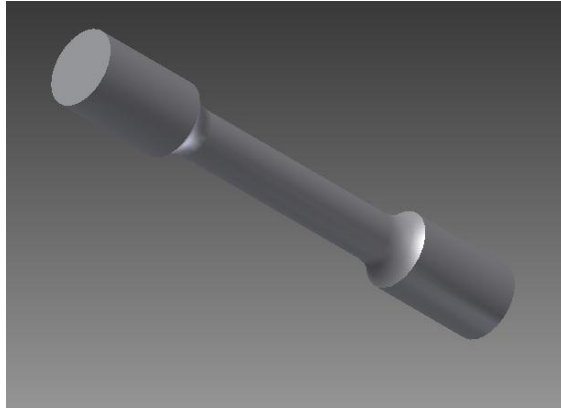


Figura 14: Probeta según norma ASTM A-370.

3.2.2 Probetas para el Ensayo de Fatiga

Las dimensiones de las probetas para el ensayo de fatiga varían dependiendo del material a ensayar. Hay dimensiones que ya están definidas como el largo de la probeta (150 mm) debido a la configuración de la máquina, y el ancho de la probeta (30 mm) debido a la geometría de la muestra de la tubería. La única dimensión que se puede variar es el espesor de la probeta, en un rango de 2 mm a 34 mm.

El cálculo de probetas para el ensayo de fatiga se realizó según el procedimiento mencionado en la parte teórica, obteniendo como resultado la ecuación número 14.

Con la cual se obtuvo un espesor de probeta $t = 30 \text{ mm}$

$$t = \sqrt{\frac{f^*a*6}{w*\sigma_y}} \quad (14)$$

3.2.2.1 maquinado de Probetas para el Ensayo de Fatiga

De la primera sección de 200 mm de longitud se hicieron cortes paralelamente al eje del anillo con una sierra mecánica vaivén, de esta manera se obtuvo muestras de 200 mm de largo, 30 mm de ancho y 34 mm de espesor (ver figura 15).

Las muestras de 34 mm de espesor se redujeron con una fresa frontal a 33 mm garantizando un espesor uniforme, luego se redujo el ancho con una fresa lateral garantizando en toda la longitud el paralelismo entre sus caras. Se procedió a realizar los agujeros de sujeción a la máquina con un taladro de banco y una plantilla previamente fabricada y por último se cortó el material excedente.

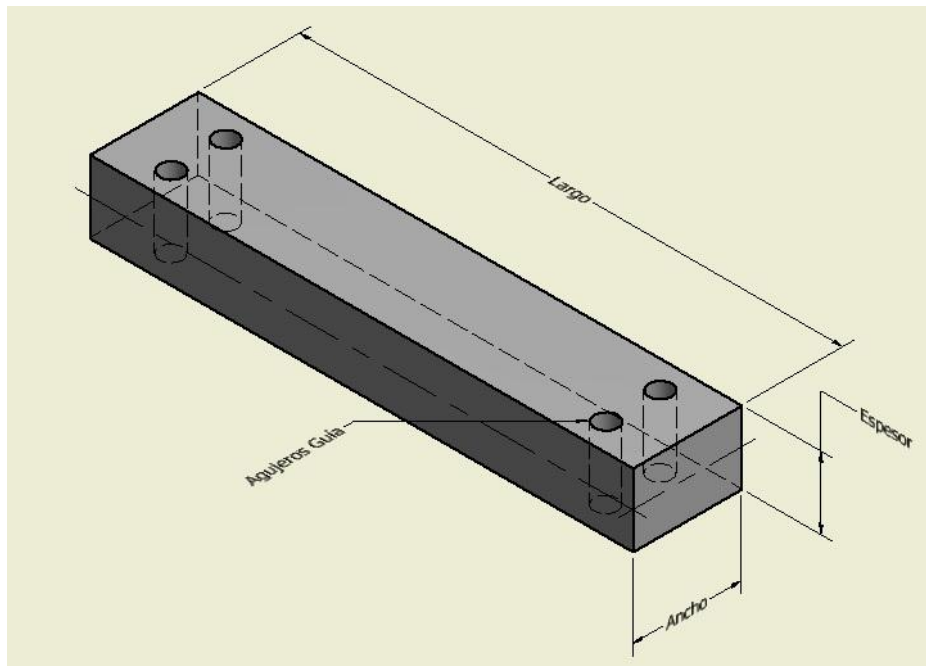


Figura 15: Probeta para el ensayo de fatiga.

Diagrama del Maquinado de probetas



3.3 ENSAYOS MECÁNICOS

3.3.1 Ensayos de tracción

Para el estudio del PEAD en condiciones estáticas, se utilizó la máquina de ensayo universal (Ensayo de Tracción) que se encuentra en el laboratorio de ensayos mecánicos de la escuela de ingeniería mecánica. Se ensayaron 3 probetas cumpliendo con la norma ASTM A-370 para ensayos de tracción.



Figura 16: Máquina de ensayos universales, ensayo de tracción.

3.3.2 Ensayos de fatiga

Para el estudio del PEAD en condiciones dinámicas, se utilizó la máquina de fatiga a flexión alternativa de la escuela de ingeniería mecánica, diseñada y construida por Gondar y Rodríguez ⁽¹⁵⁾ para ensayar metales. Se evaluó la factibilidad para ensayar probetas de PEAD y se diseñaron y construyeron los accesorios para poder realizar ensayos a este material. Así mismo se emplearon una serie de equipos que se describen a continuación, para recopilar los datos. Las variables medidas fueron, frecuencia, tiempo, desplazamiento y carga.

Según Almerida y Chitty ⁽¹⁴⁾, el principio de funcionamiento de la máquina de fatiga por flexión alternativa se basa en cambiar el movimiento rotatorio de un motor eléctrico en un movimiento lineal alternativo a través de un sistema excéntrica-biela. El sistema se encuentra en un extremo del eje que se acopla al motor y esta soportado por dos chumaceras fijas al cuerpo de la máquina. En el pie de la biela está conectado a un plato alternante, sobre el que se fijan dos bases de mordazas. Las mordazas se vinculan a dichas bases con pernos y a su vez al cuerpo de la máquina con un par de bases fijas. De esta manera la probeta queda sometida a ciclos de inversión completa por flexión alternativa con momento constante (Ver figura 17).

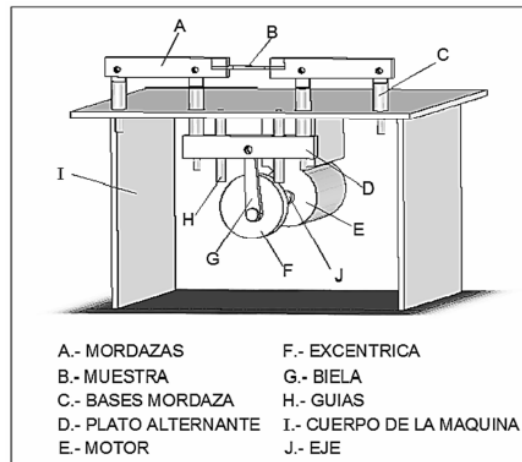


Figura 17: Esquema de la máquina de ensayos de fatiga ⁽¹⁴⁾.

Motor: el motor que posee la maquina es marca Siemens de 3HP, trifásico de inducción, 220v, torque nominal 12,51Nm, corriente nominal 9,6A, 1708RPM, dos pares de polos.

Excéntrica: la excéntrica es ajustable y está conformada por una tapa, contratapa un tornillo-piñón, corona, 4 tornillos de sujeción. La biela se conecta con la excéntrica a través de un rodamiento.

Plato alternante: la biela se conecta a este plato por medio de un pasador y un rodamiento. Este plato tiene dos rodamientos lineales por los cuales pasan dos barras guía de acero, solidarias a la máquina.

Mordazas y bases de mordazas: las mordazas de la maquina se conectan a sus respectivas bases mediante pasadores (ver figura 21) y están unidas al plato alternante y al cuerpo de la maquina a través de una rosca y tuerca. Las mordazas que tenía la máquina, se modificaron por unas más robustas, que ejercen mayor presión y con un acabado estriado para aumentar la fricción en la probeta, ya que las originales fueron diseñadas para probetas de metal con espesor entre 2 mm y 8 mm.

Variador de frecuencia: la selección del variador de frecuencia se hizo en base al motor que ya poseía la máquina de ensayos. Se contactó con varios vendedores, se pidió presupuestos y características. Estos datos se introdujeron en una tabla para hacer la selección. (Ver tabla 3).

Como prioridad los variadores debieron cumplir con las características mínimas de compatibilidad con el motor, en el segundo renglón de importancia está el costo, en el tercer renglón de importancia la garantía, en el cuarto renglón si es nuevo o usado.

La muestra de variadores fue de siete, todos de proveedores distintos, le aplicamos el criterio de selección y se obtuvo como resultado un variador de frecuencia de la marca Siemens, modelo Micro Master 420.

Tabla 3: Características de la muestra de los variadores de frecuencia.

Marca	Modelo	Compatibilidad			Costo	Garantía	Ciudad	Usado/ Nuevo	pts
		Hp	Voltaje	Fases					
Danfoss	Vlt5000	5	*220	*3	10350	*6 meses	Valencia	*nuevo	4
Bonfiglioli	Active	*3	*220	*3	3500	no	Los Teques	usado	3
Siemens	Sinamics c110	*3	*220	*3	5350	*6 meses	La victoria	*nuevo	5
Siemens	Micro Master 420	*3	*220	*3	*3100	*6 meses	*caracas	*nuevo	7
Telemecanique	Altivar	*3	*220	*3	7500	5 días	*caracas	*nuevo	5
Siemens	Micro Master vector	*3	*220	*3	7000	no	*caracas	*nuevo	5
ABB	Acss101-1k6-1	1	*220	*3	5500	no	*caracas	*nuevo	4
WEG	CFW10	5	*220	5	6000	*6 meses	Valencia	*nuevo	3

Sensores: la recolección de los datos del ensayo de fatiga, se realizó mediante el uso de un transductor de fuerza, un transductor de desplazamiento, un amplificador y una laptop.

El transductor de fuerza usado es de la marca HBM U9B de 10kN (ver figura 18), diseñado específicamente para medición compacta de fuerzas pequeñas, capaz de medir las fuerzas estáticas y dinámicas a tracción y compresión.

El transductor de fuerza se importó de Estados Unidos, el cual no incluía el conector de 15 pines, se tuvo que comprar el conector y por medio de manuales se hizo la conexión para que fuera compatible con el amplificador.



Figura 18: Transductor de fuerza utilizado, marca HBM modelo U9B de 10kN.

El transductor de desplazamiento utilizado fue un HBM modelo WAT de 50mm ver (figura 19). Se basa en el uso de un cuarto de puente inductivo de conformidad con el principio diferencial de bobina, que cuenta con una linealidad y un excelente comportamiento térmico.

Para su montaje se utilizó un soporte universal de manera que no se viera afectada la medición con la vibración de la máquina, se alineó el eje del sensor con la dirección del desplazamiento obteniendo directamente la dimensión que quiso ser medida.

El dispositivo está equipado con un circuito integrado de evaluación para operar con voltaje directo en un rango de 15 a 30V. La señal de salida es estandarizada, el rango va desde 0,5 a 10V.

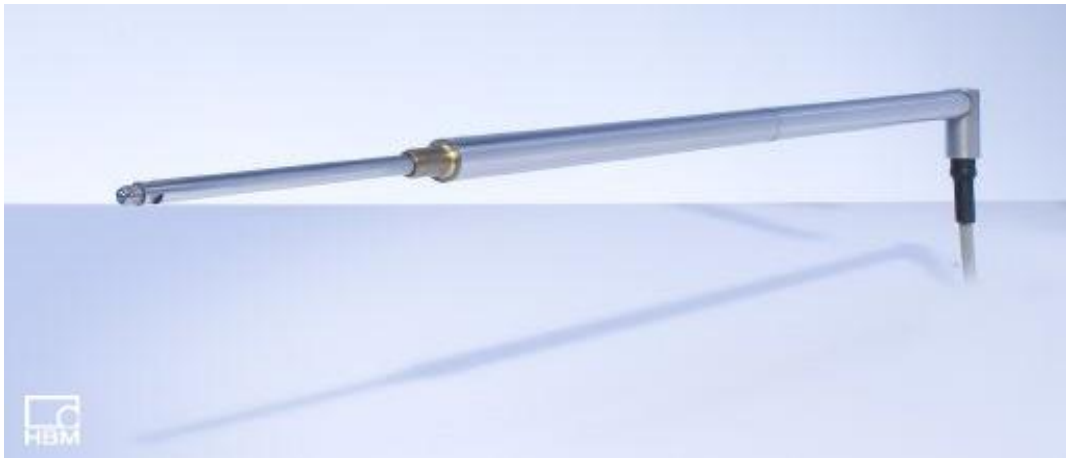


Figura 19: Transductor de desplazamiento utilizado, marca HBM modelo WAT de 50mm.

Las señales generadas por los sensores antes mencionados son enviadas a un amplificador o decodificador de la marca HBM modelo QuantumX MX840 de 8 canales (ver figura 20). El equipo posee 24 bits de resolución para convertir señales analógicas a digitales en mediciones sincronizadas y paralelas. Tiene una tasa de muestreo de 19.2kHz/canal, la cual puede ser ajustada independientemente para cada canal. Los datos que envía este dispositivo son procesados y almacenados en una computadora a través del programa CatmanEasy.



Figura 20: Amplificador de la marca HBM modelo QuantumX MX840.

3.3.2.1 Puesta en marcha y calibración de la máquina.

Se hizo la conexión eléctrica entre la red del laboratorio, el variador de frecuencia y el motor de la máquina. Se corrigió una falla de diseño que tenían los pasadores de las mordazas, estos no poseían retenes y con el movimiento alternante de la máquina se salían. Esta falla se solventó haciéndole unas muescas y colocándole dos retenes a cada pasador (ver figura 21)

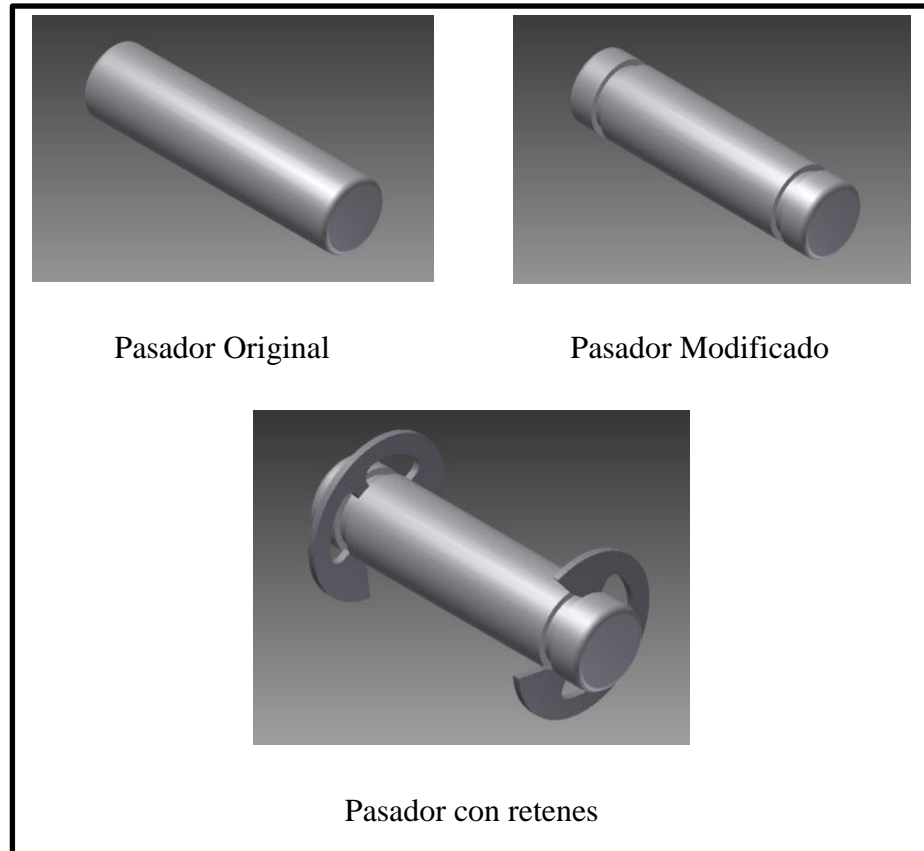


Figura 21: Modificación de pasadores.

La máquina fue diseñada para ensayar probetas de metal de hasta 6mm de espesor. Las probetas de PEAD que se utilizaron en estos ensayos tenían hasta 33mm de espesor y no era posible sujetarlas con el diseño original de la máquina.

Debido a esto se tuvo que adaptar la máquina para hacer ensayos en polímeros, diseñando y construyendo un nuevo elemento mecánico, que sujetara efectivamente las probetas de PEAD de hasta 35 mm de espesor. El nuevo diseño es más robusto, ejerce mayor presión y tiene un acabado estriado para aumentar la fricción entre la

probeta y la mordaza y así evitar su deslizamiento y fractura en los extremos (ver figura 22)

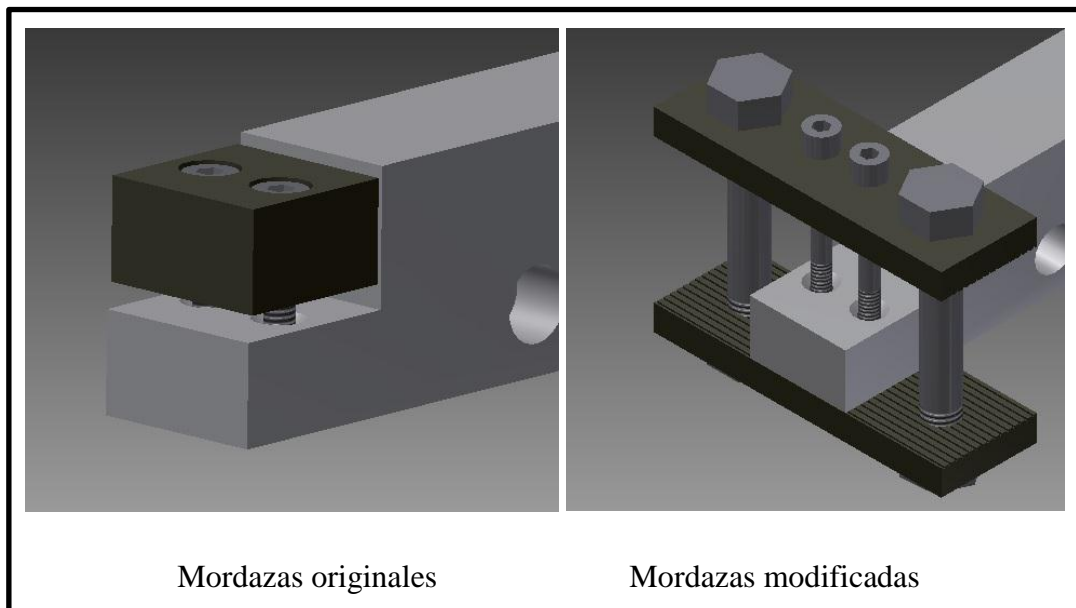


Figura 22: Modificación a las mordazas.

Utilizando para el montaje inicial, la probeta de mayor espesor, se observó que los tornillos no tenían la longitud necesaria.

Se realizó el montaje con unos tornillos de mayor longitud, y se observó que la probeta respecto a la mordaza presentaba deslizamiento, pese al apriete que se le dio a los tornillos no se logró darle una rigidez necesaria y se previó que arrojaría resultados no deseados experimentalmente. Se concluyó que era por la longitud del tornillo y la rosca hembra de la mordaza inferior.

Teniendo eso en cuenta y con el deseo de no alterar las mordazas originales, se decidió emplear un elemento externo que le aumentara la rigidez al montaje de la probeta. Se ideó reemplazar la mordaza superior por una más ancha con la finalidad

de colocar dos pernos laterales más robustos. Se utilizó una plancha de acero AISI 1045 disponible en el laboratorio y se implementaron cuatro pernos de longitud requerida y media pulgada de diámetro disponibles en el mercado.

Es de esperarse un aumento en los factores de seguridad de los elementos, debido a la introducción de partes más robustas para la sujeción de las probetas, a continuación se calcularon esos factores con los datos de mayor fuerza obtenidos experimentalmente. Corroborando con lo anterior, el elemento crítico para el sistema mordazas-sujetadores son las mordazas inferiores⁽¹⁵⁾, las cuales no fueron modificadas. Las mordazas superiores se aumentaron sus dimensiones en el mismo eje que los pasadores de las mordazas y se agregaron dos pernos con tuercas de media pulgada a cada lado de forma perpendicular, para mejorar el anclaje de la probeta.

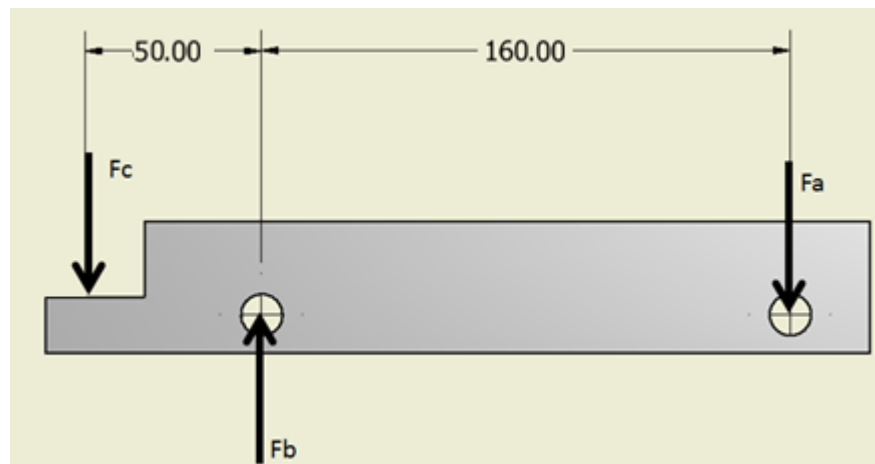


Figura 23: DCL de la mordaza.

$$F_{b \max} = 1226 \text{ N}$$

$$M_A = F_b * \overline{AB} = 1226 \text{ N} * 0,16 \text{ m} = 196,16 \text{ Nm} \quad (15)$$

$$F_C = M_A / \overline{AC} = \frac{196,16 \text{ Nm}}{0,21 \text{ m}} = 934 \text{ N} \quad (16)$$

T: Tornillo, M: Mordaza

$$A_T = 126,68 \text{ mm}^2 \qquad A_M = 320 \text{ mm}^2$$

Tornillos de media pulgada de diámetro con 20 hpp, grado 5, para un esfuerzo axial máximo de 81 kpsi o 558 MPa.

Acero AISI 1045 de $S_y = 310 \text{ MPa}$.

La fuerza en cada tornillo F_t es $F_c/2 + \text{apriete}$.

$$\text{apriete} = \frac{T}{K \cdot D} = \frac{20,6}{0,00252} = 8175 \text{ N} \qquad (17)$$

T = torque, K = ctte (0,2 tornillo seco, 0,15 tornillo con aceite), D = diámetro del tornillo.

$$F_t = 467 \text{ N} + 8175 \text{ N} = 8642 \text{ N} \qquad (18)$$

$$\sigma_T = \frac{8642 \text{ N}}{128,68 \text{ mm}^2} = 67,15 \text{ MPa} \qquad (19)$$

La fuerza en cada mordaza extendida es $F_c + 2 \cdot \text{apriete}$

$$\sigma_M = \frac{934 \text{ N} + 2(8175 \text{ N})}{320 \text{ mm}^2} = 54 \text{ MPa} \qquad (20)$$

Calculamos los factores de seguridad para ambos elementos con nuestras solicitaciones máximas.

$$\psi_T = \frac{S_{yT}}{\sigma_T} = \frac{558 \text{ MPa}}{67,15 \text{ MPa}} = 8,3 \qquad (21)$$

$$\psi_M = \frac{S_{yM}}{\sigma_M} = \frac{310 \text{ MPa}}{54 \text{ MPa}} = 5,7 \qquad (22)$$

Como era de esperarse, los factores de seguridad son altos, pero los elementos añadidos no se agregaron para evitar falla sino para eliminar el deslizamiento de la probeta respecto a las mordazas.

A continuación en la figura 23, se muestra la máquina de ensayos de fatiga con los sistemas de control y recopilación de datos. Se puede apreciar el variador de frecuencia, el transductor de desplazamiento, el transductor de fuerza, el amplificador, la computadora que utilizamos para hacer la recopilación de datos y los cables que conectan cada dispositivo.

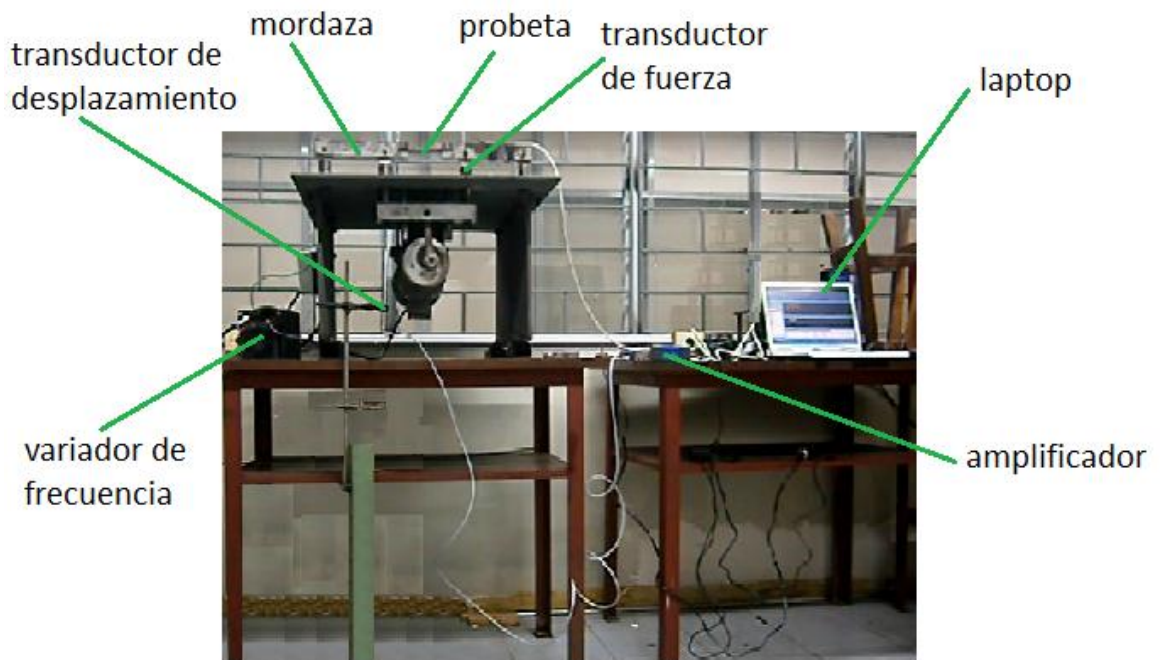


Figura 24: Máquina de fatiga a flexión alternativa con los equipos periféricos de control y adquisición de datos.

La calibración de los instrumentos de medición de fuerza y desplazamiento se realizó digitalmente a través del programa CatmanEasy®, esto se corroboró experimentalmente cargando la celda de carga con pesas graduadas que se encontraban en el laboratorio y el transductor de desplazamiento se verificó con un vernier.

3.3.2.2 Montaje del ensayo

- Se verificaron las dimensiones de la probeta y su acabado.
- Se sacaron los 8 tornillos de las mordazas, se colocó la probeta y se apretaron con los 8 tornillos.
- Se aflojaron los 4 tornillos de la tapa de la excéntrica, se fijó el desplazamiento girando el piñón y se apretaron los 4 tornillos de la tapa nuevamente.
- Se encendió el interruptor del laboratorio, este energiza el sistema.
- Se encendió en interruptor que energiza el variador de frecuencia.
- Se configuraron las variables del motor en el variador de frecuencia.
- Se ajustó la frecuencia del variador en 12 Hz.
- Se ajustó la frecuencia de muestreo del programa CatmanEasy en 60 Hz.
- Se activó el modo de grabación del programa, el cual permitió registrar en un archivo Excel, todos los valores medidos por los sensores durante el ensayo.
- Se verificaron conexiones, pernos y que no hubiese nada sobre la máquina que pudiese interferir con los ensayos.
- Se arrancó el motor por medio del variador de frecuencia e inició el ensayo.

Capítulo IV

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 ENSAYO DE TRACCIÓN

A continuación se presentan los resultados y el análisis, de los ensayos realizados a tracción, recordando que se ensayaron 3 probetas y se cumplió con la norma ASTM A-370 para ensayos de tracción.

Tabla 4: Datos iniciales de las probetas a ensayar.

Probeta	Longitud Inicial [mm]	Diámetro Inicial [mm]
1	68,4	12,6
2	69	12,43
3	68,2	12,56

A continuación en la figura 24 mostramos los gráficos Fuerza Vs. Elongación del PEAD.

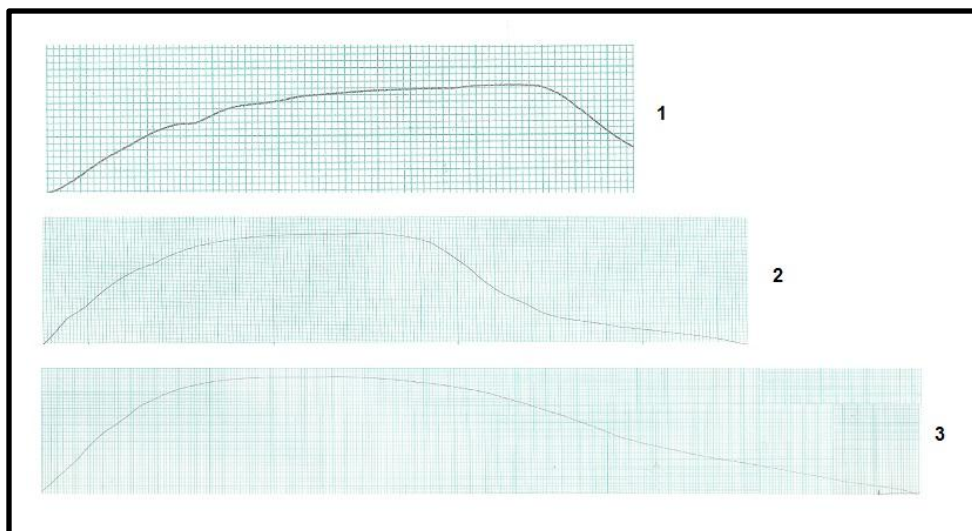


Figura 25: ensayos de tracción, Fuerza Vs. Elongación.

Tabla 5: Resultados de los ensayos de tracción, Fuerza-Elongación.

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
Elongación [mm]	Fuerza [Mp]	Elongación [mm]	Fuerza [Mp]	Elongación [mm]	Fuerza [Mp]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,069	0,010	0,150	0,043	0,167	0,010
0,103	0,025	0,261	0,079	0,709	0,117
0,141	0,064	0,458	0,114	0,959	0,171
0,181	0,116	0,579	0,144	1,145	0,199
0,247	0,183	0,725	0,173	1,444	0,248
0,306	0,230	1,138	0,235	1,690	0,276
0,343	0,238	1,450	0,272	1,907	0,295
0,372	0,259	1,856	0,303	2,481	0,325
0,410	0,286	2,625	0,325	2,808	0,333
0,456	0,300	3,540	0,330	3,443	0,338
0,505	0,314	4,053	0,315	4,108	0,340
0,554	0,327	4,479	0,257	4,388	0,339
0,676	0,344	4,723	0,204	5,235	0,324
0,777	0,349	4,875	0,172	5,766	0,309
0,819	0,355	5,158	0,132	6,479	0,274
0,854	0,358	5,393	0,100	7,931	0,168
0,890	0,360	5,673	0,078	8,317	0,145
0,942	0,357	6,181	0,058	8,626	0,130
1,004	0,300	6,714	0,040	9,317	0,098
1,063	0,216	7,247	0,022	9,845	0,080
1,118	0,157	7,545	0,007	10,815	0,048
1,130	0,154	7,750	0,003	12,150	0,001

Tabla 6: Fuerzas Máximas y Elongaciones.

Ensayo	Fuerza Máxima [Mp]	Elongación [mm]
1	0,36	1,130
2	0,33	7,750
3	0,34	12,150

La máquina de ensayos de tracción, nos generó una curva en la cual, la fuerza está dada en kilopondios y la elongación en milímetros, para llevarlas a esfuerzo deformación se aplicó las siguientes conversiones y formulas.

- Conversión de kilopondios a Newton

$$1 \text{ kp} = 1 \text{ kgf} = 9,81 \text{ N} \quad (21)$$

- Calculo de área, sección transversal de la probeta

$$A = \pi r^2 \quad (22)$$

- Calculo tipo: $\frac{360 \text{ kp} * 9,81 \text{ N/kp}}{0,0001246898 \text{ m}^2} = 28323086 \text{ Pa} = 28,32 \text{ MPa}$ (23)

- Fórmulas para transformar de elongación a deformación

- Deformación $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i}$ (24)

- Elongación $\Delta L = L_f - L_i$ (25)

- Calculo tipo de la deformación

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_i} = \frac{1,13}{68,4} = 0,0165 \quad (26)$$

Tabla 7: Datos del ensayo de tracción, Esfuerzo-Deformación.

Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 3	
ϵ	S	ϵ	S	ϵ	S
[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]	[mm/mm]	[MPa]
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,004	0,809	0,003	3,471	0,002	0,804
0,006	1,969	0,004	6,352	0,010	9,298
0,008	5,008	0,008	9,181	0,014	13,535
0,011	9,138	0,010	11,632	0,017	15,724
0,014	14,368	0,012	14,018	0,021	19,645
0,018	18,069	0,019	18,960	0,025	21,870
0,020	18,710	0,025	22,000	0,028	23,381
0,022	20,362	0,032	24,469	0,036	25,710
0,024	22,499	0,045	26,277	0,041	26,364
0,027	23,621	0,060	26,670	0,050	26,783
0,029	24,691	0,069	25,463	0,060	26,913
0,032	25,699	0,076	20,782	0,064	26,796
0,039	27,030	0,080	16,499	0,077	25,609
0,044	27,459	0,083	13,916	0,085	24,473
0,048	27,888	0,088	10,652	0,095	21,690
0,050	28,147	0,092	8,057	0,116	13,284
0,052	28,32	0,097	6,304	0,122	11,472
0,055	28,086	0,105	4,657	0,126	10,285
0,059	23,594	0,114	3,215	0,137	7,775
0,062	16,989	0,123	1,803	0,144	6,357
0,065	12,385	0,129	0,537	0,159	3,770
0,066	12,119	0,132	0,210	0,178	0,063

Tabla 8: Esfuerzos Máximos y Deformaciones.

Ensayo	ϵ [mm/mm]	S [MPa]
1	0,017	28,320
2	0,132	26,670
3	0,178	26,913

En la figura 25, mostramos los gráficos esfuerzo VS deformación del PEAD. El eje de las ordenadas representa el esfuerzo real expresado en mega pascales y el eje de las abscisas representa la deformación real. Se pueden visualizar 3 curvas que corresponden a cada uno de los especímenes ensayados, a partir de los cuales se estimó la resistencia a la tracción (S_{ut}) y el límite de fluencia (S_y).

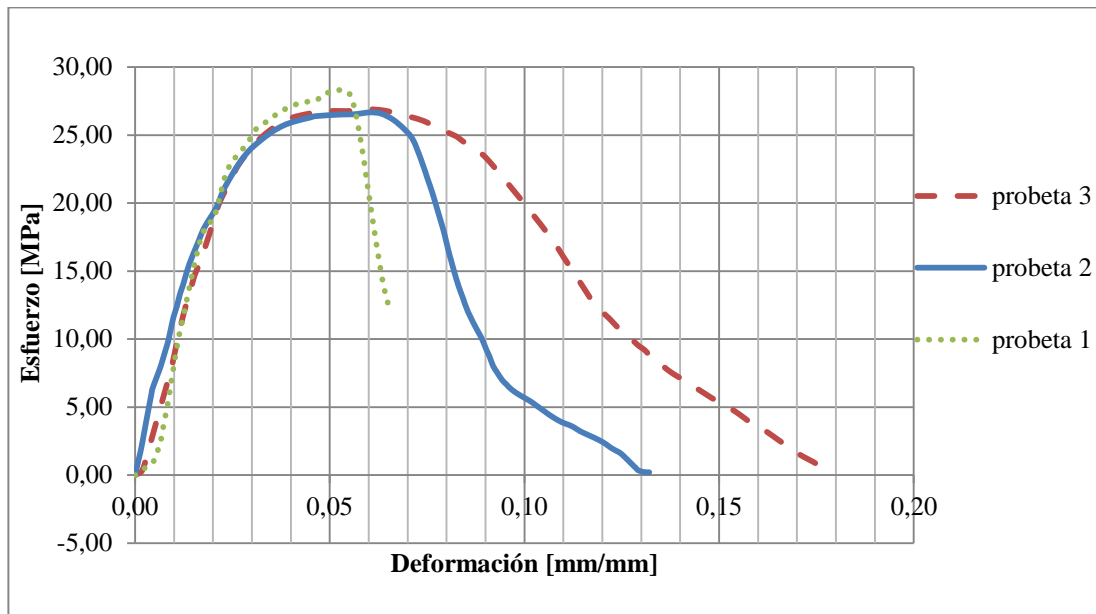


Figura 26: Ensayos de tracción.

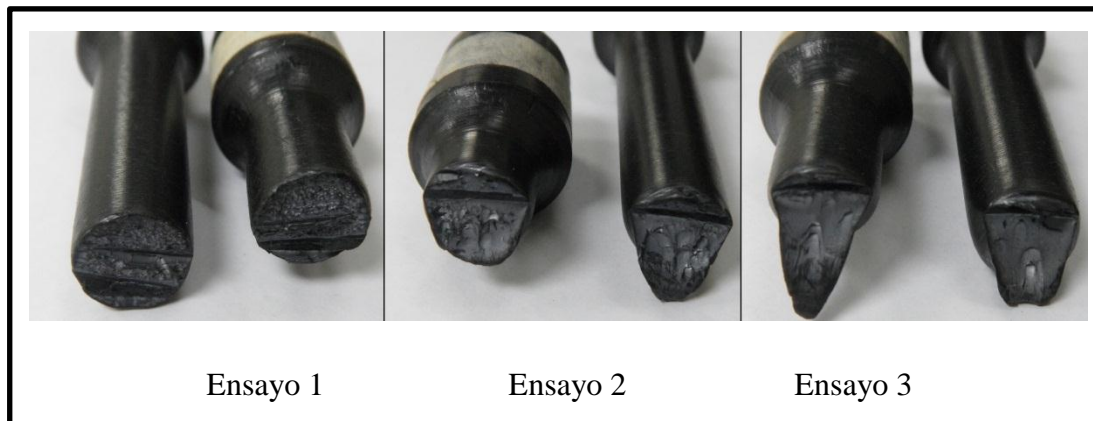


Figura 27: Probetas ensayadas a tracción.

En la figura 26, se describen los resultados de los ensayos de tracción. En ella se observa que la fractura del ensayo 1 es de tipo frágil, en el ensayo 2 y 3 podemos observar que aparentemente hubo una fractura de 45 grados, evidenciando la existencia de un esfuerzo principal en la dirección de fractura. Comparando la probeta 1 con la 2 y la 3, pareciera que los ensayos 2 y 3 no fueran de tipo frágil, sin embargo en ninguno de los ensayos se observó un encuellamiento, lo que nos indica que el material es de tipo frágil.

De las gráficas de esfuerzo deformación en la zona elástica, se calculó el módulo de elasticidad. Para cada punto de esfuerzo respecto al origen se obtuvo la pendiente, se realizó un promedio entre cada una de las pendientes calculadas para cada probeta, se promediaron las 3 pendientes obteniendo así el módulo de elasticidad del material.

Cálculos tipo:

$$- \text{Pendiente } m = \frac{\text{esfuerzo}}{\text{deformacion}} = \frac{18,069}{0,01783} = 1013,18 \quad (27)$$

$$- \text{Promedio } P = \frac{E1 + E2 + E3}{3} = \frac{980,18 + 1074,68 + 947,58}{3} = 1001,15 \quad (28)$$

Tabla 9: Propiedades mecánicas estáticas del PEAD.

Probeta	E[MPa]	Sy[MPa]	Sut[MPa]
1	980,18	19,00	28,32
2	1074,68	19,00	26,67
3	947,58	21,00	26,91
Promedio	1001,15	19,67	27,30
Desviación estándar	65,86	1,15	0,89

Se observa que el módulo de elasticidad [E] del PEAD hallado experimentalmente está dentro del rango esperado, teóricamente para polímeros está entre 0,01 y 4 GPa. Los límites de fluencia dieron valores muy cercanos, se promediaron obteniendo como resultado 1GPa y una desviación estándar de 0,065GPa.

Los valores de esfuerzo último a la tracción fueron similares, presentando un promedio de 27,30 MPa y una desviación estándar de 0,89MPa.

Adicionalmente podemos observar que el espécimen 1 tuvo una fractura frágil, comparado con los otros dos especímenes que tuvieron fracturas claramente a 45 grados, esto se puede observar muy bien en la figura 25 en la cual se muestran las probetas ensayadas.

4.2 ENSAYO DE FATIGA A BAJO CICLAJE

Continuando con el análisis del comportamiento a la fatiga en bajo ciclaje para el material en estudio, en la tabla 10 mostrada a continuación se presentan los resultados experimentales obtenidos de los ensayos de fatiga, se especifican cada una de las probetas, ancho, longitud, espesor, deformación, número de ciclos a la fractura y esfuerzo de estabilización.

Tabla 10: Resultados experimentales, ensayos de fatiga.

Nº de probeta	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Longitud [mm]	Deformación ϵ	Ciclos a la falla [Nf]	Esfuerzo Est. S [KPa] ec.(11)
1	25,2	27,55	90	0,0477	6600	9159,250
2	25,3	27,4	90	0,0486	6300	10299,471
3	25,4	27,1	90	0,0476	3300	11404,693
4	28,5	28	90	0,0544	4620	10234,871
5	29	28,5	90	0,054	3300	20832,922
6	29,3	27,9	90	0,0547	2640	11311,151
7	29,5	29	90	0,0542	4840	10982,298
8	29,5	27,5	90	0,0568	2970	10277,425
9	30,25	28,2	90	0,0542	3960	9492,396
10	30	28,6	90	0,0607	3795	14712,875
11	32	28	90	0,0216	34560	5037,449
12	33	27,6	90	0,037	14400	8316,679
13	34,2	29	90	0,0389	28620	7033,646

4.2.1 Ciclo de Histéresis y curva Esfuerzo-Deformación Cíclica.

El ciclo de histéresis del material ensayado se muestra en la figura 27, en esta se observa la simetría que existe en el momento aplicado en el material, por otra parte se observa que para el mismo intervalo de ángulo de flexión el momento va disminuyendo hasta el punto donde aparece la grieta en el material. De igual manera se aprecia que el ángulo de flexión varía manteniéndose en el intervalo $-0,1$ Rad y $0,1$ Rad, lo que demuestra que el ensayo cumple con deformación controlada. Mientras se ensayaban las probetas se detectó al tacto que su temperatura aumentaba considerablemente a medida que avanzaba el ensayo. Esto se debe a que cuando el polímero se deforma ocurren movimientos moleculares los cuales disipan energía en forma de calor.

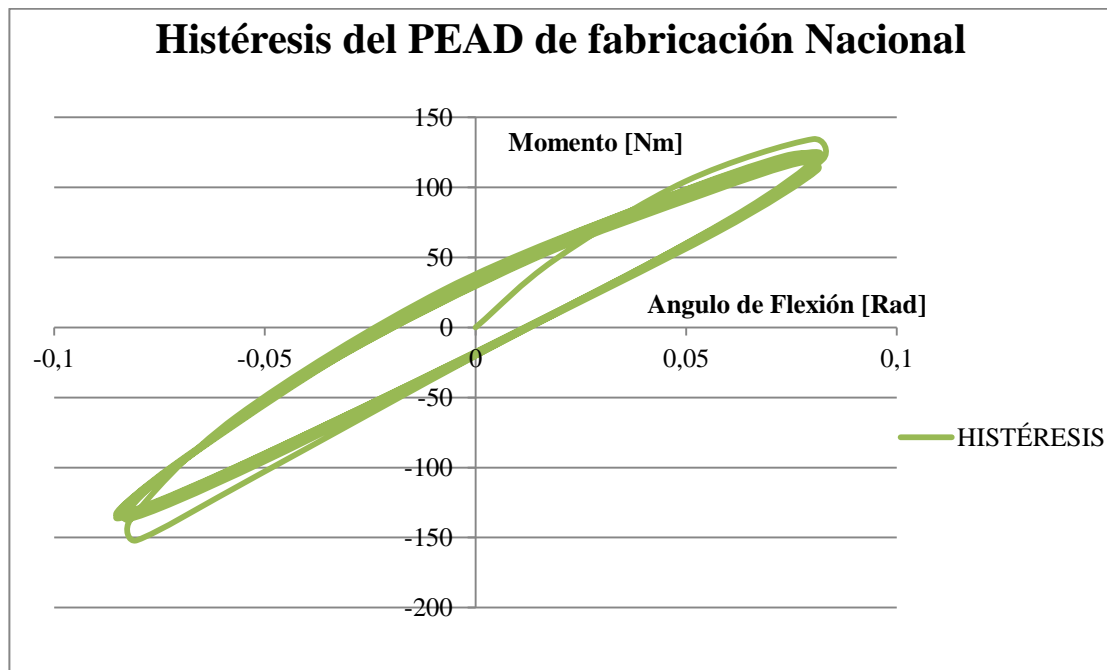


Figura 28: Histéresis.

En la Figura 28, se le hizo zoom a los primeros ciclos de la Histéresis, aquí podemos observar que para el mismo intervalo de ángulo de flexión, el momento disminuye con cada ciclo, a este fenómeno se denomina ablandamiento por deformación cíclica y ocurre cuando se deforma el material, generando un movimiento molecular en el cual se rompen los enlaces fuertes. Esto es característico en los polímeros de alta densidad.

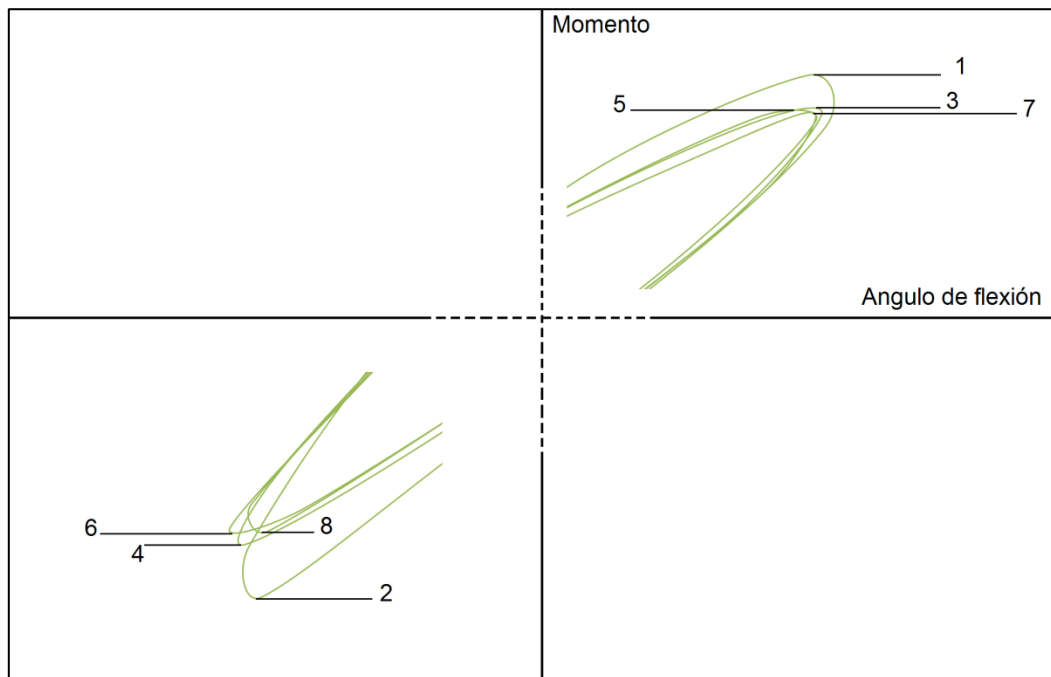


Figura 29: Histéresis ampliada en los extremos.

A partir de los datos mostrados en la tabla 10, se realizó el gráfico mostrado en la figura 29, este nos muestra la curva ϵ -N, característica de los ensayos de fatiga a bajo ciclaje, se graficaron en escala doble logarítmica, los ciclos a la falla para cada probeta ensayada a los distintos niveles de deformación, a dichos puntos se le realizó una aproximación mediante una relación potencial, con el fin de obtener los coeficientes de la ecuación de Coffin-Manson, la cual se muestra en la tabla 11.

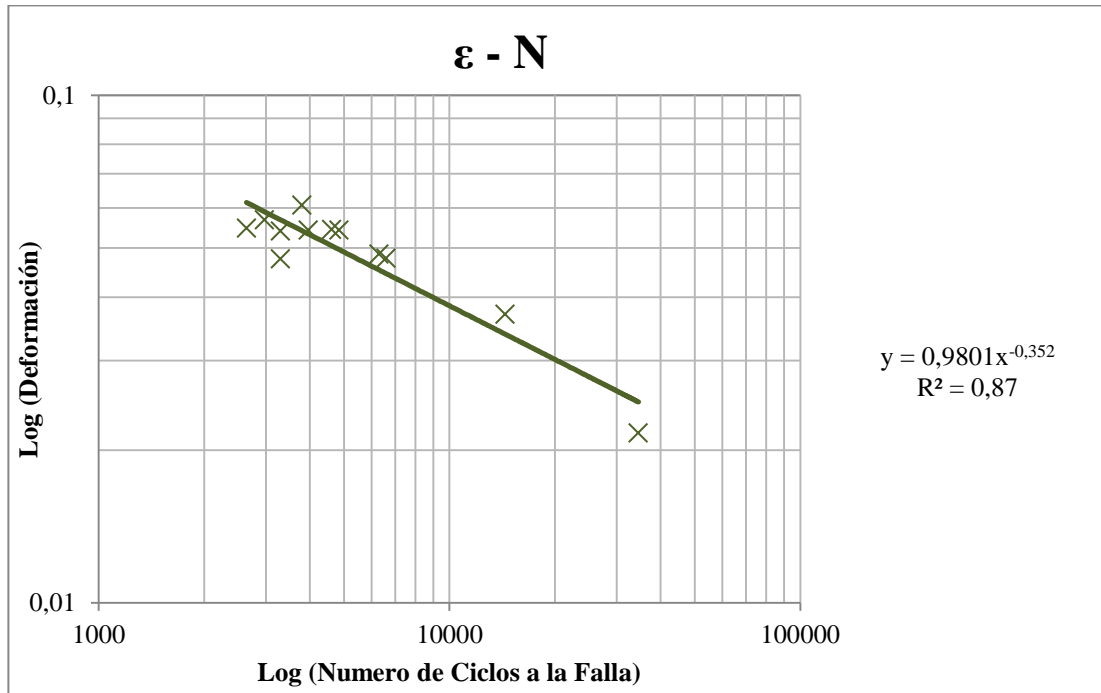


Figura 30: Deformación Numero de Ciclos de fatiga a bajo ciclaje del PEAD de fabricación nacional.

Tabla 11: Ecuación de Coffin-Manson para el PEAD.

Parámetros de la ecuación de Coffin-Manson	
Coeficiente de Ductilidad a la Fatiga (ϵ^f)	0,9801
Exponente de ductilidad a la fatiga (c)	-0,352
Ajuste de la curva (R^2)	0,87
Ecuación de Coffin-Manson	
$\epsilon_a = 0,9801(Nf)^{-0,352}$	Ecuación 29

En la figura 30, se observa que las probetas fueron ensayadas a vida finita, todas fracturaron por debajo de 50 kilociclos⁽³²⁾, lo que nos garantiza que los resultados

están en la zona de bajo ciclaje, debido a que se aplicó un desplazamiento adecuado para obtener deformaciones plásticas significativas.

Esta curva presenta la forma esperada debido que al graficar la amplitud de la deformación contra el número de ciclos a la falla observamos una tendencia lineal decreciente, lo que demuestra que al disminuir la deformación aplicada, aumenta el número de ciclos que soporta cada espécimen. Esto se debe a que el daño por fatiga es menor tardando más tiempo en fracturar la muestra.

Se ensayaron 13 probetas debido a que la fatiga es netamente probabilística, se logró una correlación entre los datos de $R^2 = 0,87$ al construir la curva ϵ -N, lo cual nos indica que el ajuste de la línea de tendencia es muy bueno.

En la figura 30, que se muestra a continuación, tenemos la gráfica de Esfuerzo vs Deformación de la zona plástica del material, en donde se muestran dos curvas, una corresponde al ensayo estático y la otra al ensayo dinámico. Además en dicha gráfica se muestra la ecuación potencial para cada una de las curvas. En la tabla 13, se detallan los parámetros de la ecuación potencial que modela la zona plástica de la curva de esfuerzo-deformación cíclica.

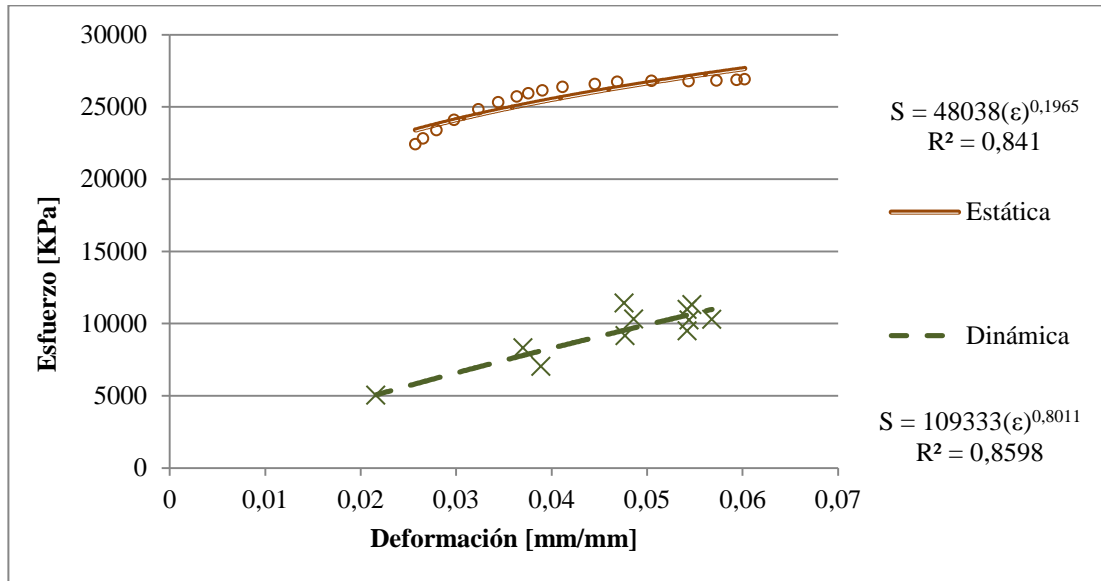


Figura 31: Curva Esfuerzo-Deformación cíclica y estática.

Tabla 12: Ecuación potencial cíclica del PEAD.

Parámetros de la Ecuación Cíclica	
Coeficiente de Resistencia Cíclica (K')	109333
Exponente de Endurecimiento Cíclico (N_f)	0,8011
Ajuste de la Curva R^2	0,86
Ecuación Potencial Cíclica	
$\sigma_c = 109333(\epsilon)^{0,8011}$	Ecuación 30
Ecuación Potencial Estática	
$\sigma_e = 48038(\epsilon)^{0,1965}$	Ecuación 31

4.2.2 Aproximación S-N en Bajo Ciclaje.

Para hacer la comparación entre el PEAD y los materiales más usados, tuvimos que realizar una aproximación de la curva S-N en bajo ciclaje, procediendo de la siguiente manera. Las deformaciones máximas a las que estuvo sometida cada probeta, fueron evaluadas en la ecuación potencial cíclica mostrada en la tabla 12. Obteniendo así una aproximación de los valores de esfuerzo para su correspondiente número de ciclos a la falla. Estos puntos se graficaron en escala logarítmica debido a que las curvas con las cuales vamos a comparar se encuentran en esta escala. Estos puntos se ajustaron gráficamente mediante una recta como se muestra en la figura 32, para poder hacer la comparación con las asíntotas al bajo ciclaje de cada material.

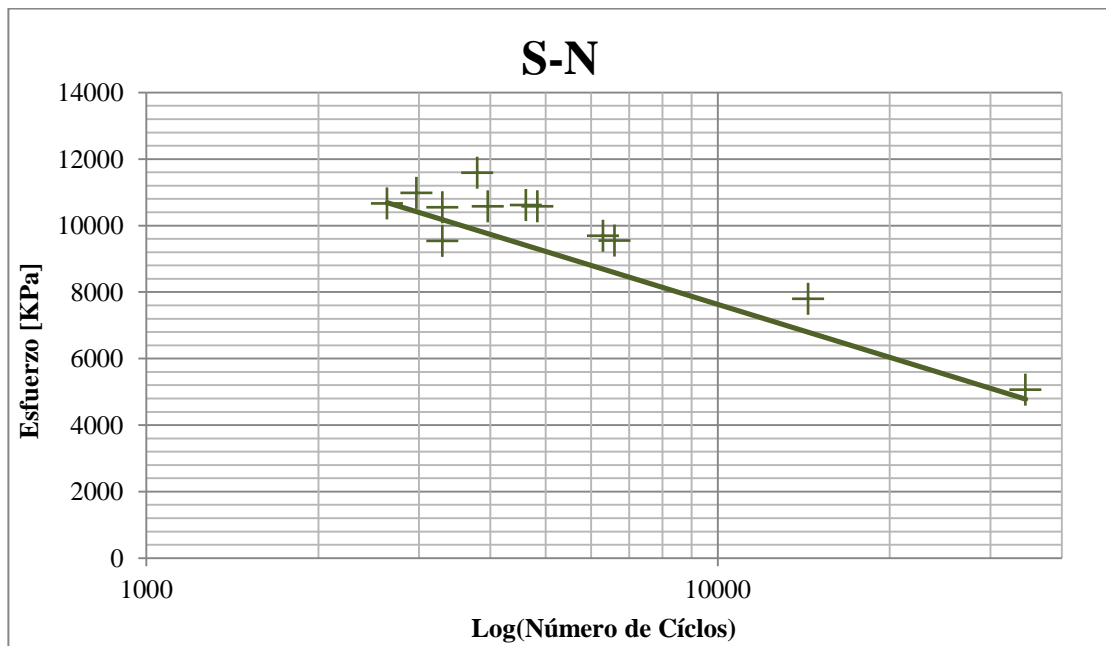


Figura 32: Esfuerzo-Numero de Ciclos.

4.2.3 Comparación de los resultados obtenidos con los materiales más usados.

En la figura que se muestra a continuación, se representan las rectas S-N en bajo ciclaje del PEAD del TFE y de una aleación de Aluminio.

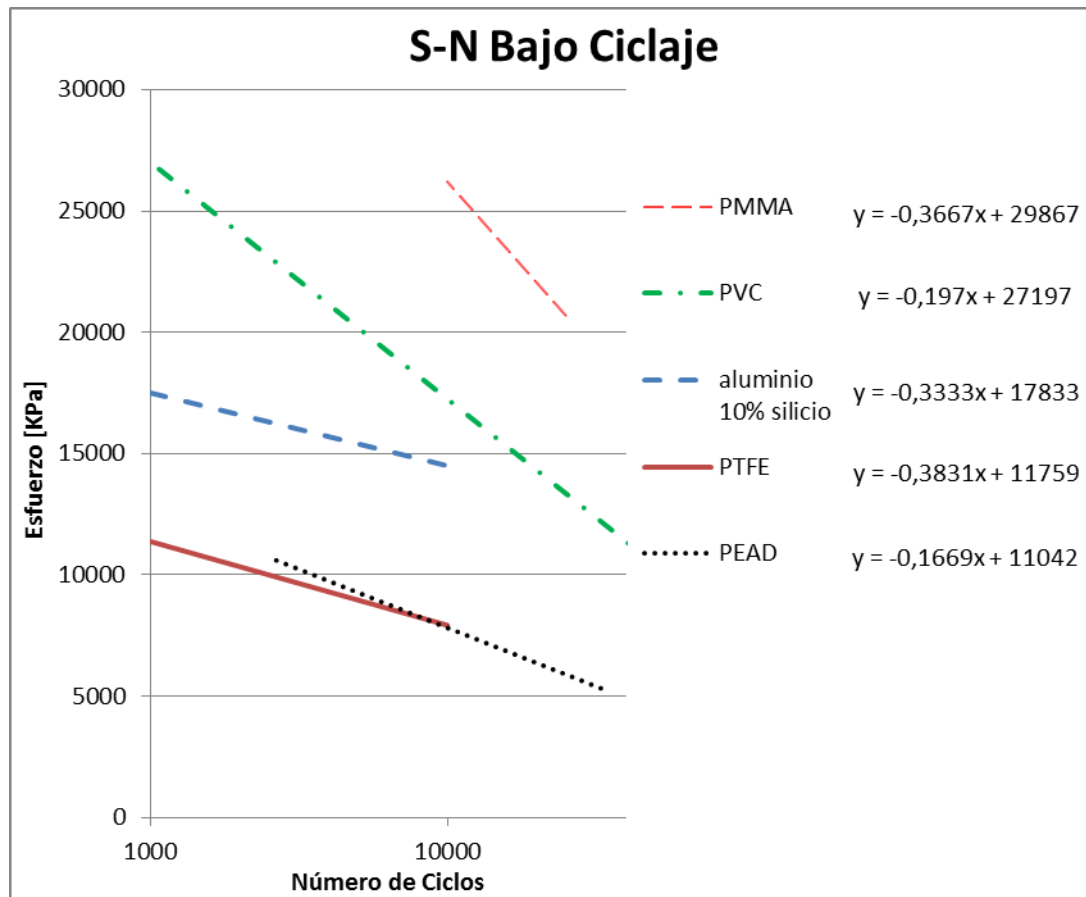


Figura 33: Curvas Comparación Esfuerzo-Número de Ciclos en bajo ciclaje.

Estas líneas representan la zona de bajo ciclaje, las cuales son asíntotas a cada curva S-N en esta zona. Como se aprecia en la gráfica la curva del PEAD es la que generó el menor esfuerzo de estabilización seguida por el polímero TFE y luego la aleación de aluminio, el esfuerzo de estabilización de los aceros al carbono estaría por encima de la aleación de aluminio. Indicándonos que el PEAD se fatiga con menores esfuerzos que los aluminios y los aceros al carbono.

CONCLUSIONES

- En este trabajo se realizaron ensayos de fatiga a flexión alternativa en régimen de bajo ciclaje, con deformación controlada, los cuales evidenciaron que el PEAD de fabricación Nacional es un material susceptible a deformarse plásticamente.
- Se aproximó la curva S-N en bajo ciclaje, utilizando la ecuación potencial cíclica para determinar los esfuerzos.
- Para la ecuación de Coffin-Manson $\epsilon_a = (\epsilon'f)(Nf)^{(c)}$ en el régimen de plasticidad los parámetros obtenidos son:
Coeficiente de Ductilidad a la Fatiga ($\epsilon'f$) = 0,9801
Exponente de ductilidad a la fatiga (c) = -0,352
- Se logró la estimación de las curvas Esfuerzo-Deformación Estática y Dinámica del PEAD, en régimen de bajo ciclaje, se observó que la curva dinámica disminuye con relación a la curva estática evidenciando un eminente ablandamiento por deformación cíclica, Lo cual nos indica que el material presenta un comportamiento frágil.
- La curva esfuerzo-deformación cíclica (Histéresis) presentó una disminución del esfuerzo máximo para el mismo intervalo de deformación, lo que evidencia un proceso de ablandamiento por deformación cíclica del material.
- La máquina de ensayos de fatiga a flexión alternativa, pudo ser adaptada exitosamente para el estudio de materiales no metálicos.

RECOMENDACIONES

- Realizar el estudio del PEAD de fabricación Nacional en régimen de alto ciclaje.
- Construir la curva universal de fatiga del PEAD de fabricación Nacional.
- Utilizar pernos más largos y sujetarlos con tuercas por debajo de la mordaza inferior.
- Realizar un programa que manipule la data adquirida por los sensores de manera eficiente. Ya que por cada ensayo se obtienen aproximadamente 450 mil datos.
- Realizar los ajustes necesarios para operar la máquina de ensayos sin supervisión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Morton, Jones.(2006). Procesamiento de Plásticos. Grupo de Investigación de Polímeros. Editorial Limusa.
- 2) Gerardus Schrauwen, Bernardus Antonius. (2003). Deformation and failure of semicrystalline polymer systems. influence of micro and molecular structure. Technische Universite Eindhoven
- 3) Ehrenstein, G., Riedel G., Trawiel, P.(2004). Thermal Analysis of Plastics. HANSER, Cincinnati
- 4) Mark, James E.(2007). Physical Properties of Polymers Handbook. Second Edition. Springer Science and Business Media, LLC.
- 5) Brewin, John y Chapman, Peter.(2000). Recent Developments in the design and manufacture of plastic pipes. Vinidex Tubemakers PTV limited.
- 6) Benham, E. y McDaniel, M., (2000). Ethylene Polymer, HDPE. Encyclopedia of Polymer Science
- 7) Polinter. (2008) “Hoja Técnica para Polietilenos de Alta Densidad para tuberías.

- 8) Stephens, Ralph L., Fatemi, Ali, Stephens, Robert R., Fuchs, Henry O.(2001). Metal Fatigue in Engineering. Second Edition.
- 9) Lee, Yung-Li, Pan, Jwo, Hathway, Richard y Barkey, Mark.(2005). Fatigue testing and Analysis(Theory and Practice). Elsevier Butterworth Heinemann. Linacre House, Jordan Hill.
- 10) Schijve, Jaap.(2004). Fatigue of structures and materials. Kluwer Academic Publishers.
- 11) Lesser, Alan J.(1998) Changes in Mechanical Behavior During Fatigue of Semicrystalline
- 12) Suresh Subra. (2003). Fatigue of materials. Cambridge Solid State Science Series.
- 13) Dowling Norman E.(1999). Mechanical behavior of material, engineering methods for deformation, fracture and fatigue. Prentice Hall. USA.
- 14) Almerida, V. y Chitty, J. (2007) Rediseño y puesta en marcha de una máquina de ensayos de fatiga por flexión alternativa. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

- 15) Gondar, G. y Rodríguez, R. (2007) Diseño y construcción de una máquina de ensayos de fatiga de muestras planas por flexión alternativa. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- 16) ASM-19 Handbook (1997) Fatigue and Fracture. 9na Edición. EEUU: ASTM
- 17) Cardoza, Y. y De La Pena, F. (2008) Estudio de la evolución del daño acumulado por fatiga de bajo ciclaje en probetas de acero AISI 304 sometidas a flexión alternativa. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica
- 18) Shigley, J. y Mischke, C. (2002) Diseño en Ingeniería Mecánica. 6ta Edición. México: McGraw-Hill.
- 19) Svoboda, H. y Vedia, L. (2002) Fatiga. Argentina: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Mecánica y Naval.
- 20) Avilés, Rafael.(2005). Análisis de Fatiga en Máquinas. Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Bilbao. International Thomson Editores Spain.
- 21) Barron, V., Buggy, M. y Mckenna, N. H.(2001). Frequency effects on the fatigue behaviour on carbon fibre reinforced polymer laminates. Journal Of Materials Science. University of Limerick, Limerick, Ireland.
- 22) COVENIN 527.(1997) “Tubos de Material Plástico. Determinación de las características a la tracción”. Revisión, 1997

- 23) Ferreira, J.A. M, Costa, J.D. M, Reis, P.N.B. and Richardson, M.O.W.(1999). Analysis of fatigue and damage in glass-fibre-reinforced polypropylene composite Materials. Composite Science and Tecnology. 1461-1467.
- 24) Ferreira, J. A. M, Costa, J. D.M and Richardson, M.O.W.(1997). Effect of notch and test conditions on the fatigue of a glass-fibre-reinforced polypropylene composite. Composites Science and Technology. Vol 57; 1243-1248
- 25) Mayogo Majó, Joan Andreu. (2003). Estudio Constitutivo de Materiales Compuestos Laminados sometidos a carga cíclica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Resistencia de Materiales.
- 26) Moore D.R, Pavan A, J. G. Willian.(2001). Fracture Mechanics Testing Methods for Polimers, Adhesives and Composites. European Structural Integrity Society.
- 27) Universidad de los Andes, Elementos de Máquinas, Elementos de Unión Roscados. Mérida 2010.
- 28) K. Oliphant, Ph.D, M. Conrad, Ph.D, W. Bryce, P.Eng. (2012). Fatigue of Plastic Water Pipe: A Technical Review with Recommendations for PE4710 Pipe Design Fatigue.
- 29) VM Parfeev, Yu. Yu. Silis, Ya. P. Skrastin'sh, A. Kh. Dukat, SV Parfeev. (1992). Análisis experimental de la fatiga de bajo ciclo de películas de tereftalato de polietileno metalizado.

- 30) Inc. J Biomed Mater. (2003). Biodegradación de poliuretano bajo la carga de fatiga.
- 31) Yuanxin Zhou, P.K. Mallick. (2005). Fatigue Performance of an Injection Molded Talc-Filled Polypropylene.
- 32) Barrueta O. y Moreno O. Obtención de la curva universal de fatiga de una aleación de aluminio 10% de Silicio. Trabajo Especial de Grado. Caracas: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica.

ANEXOS



Anexo 1: Muestra original de la tubería.



Anexo 2: Corte con sierra vaivén.



Anexo 3: Torneado de las probetas de tracción.



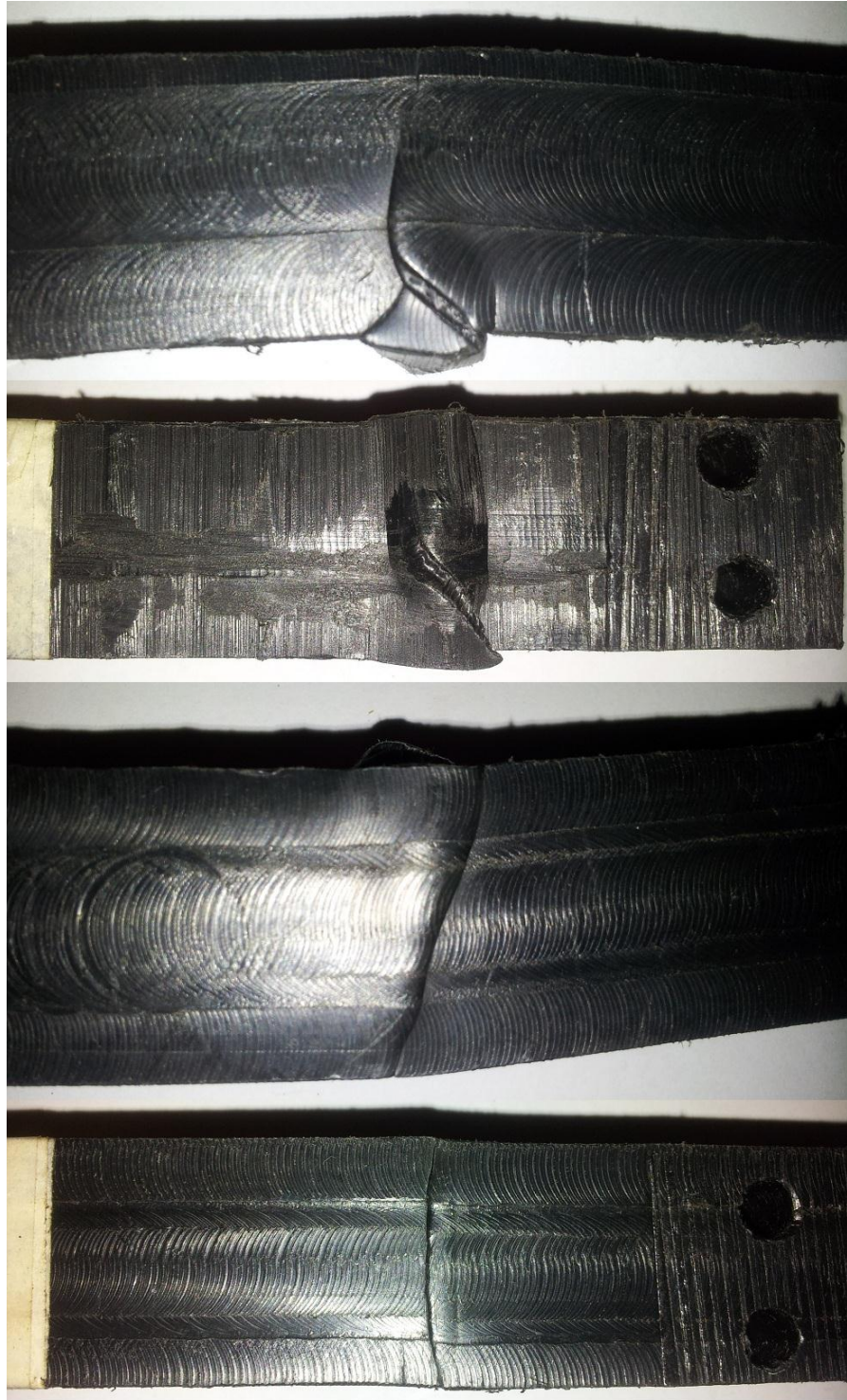
Anexo 4: Torneado de las probetas de tracción.



Anexo 5: Ensayo de fatiga en vivo (foto de alta velocidad).



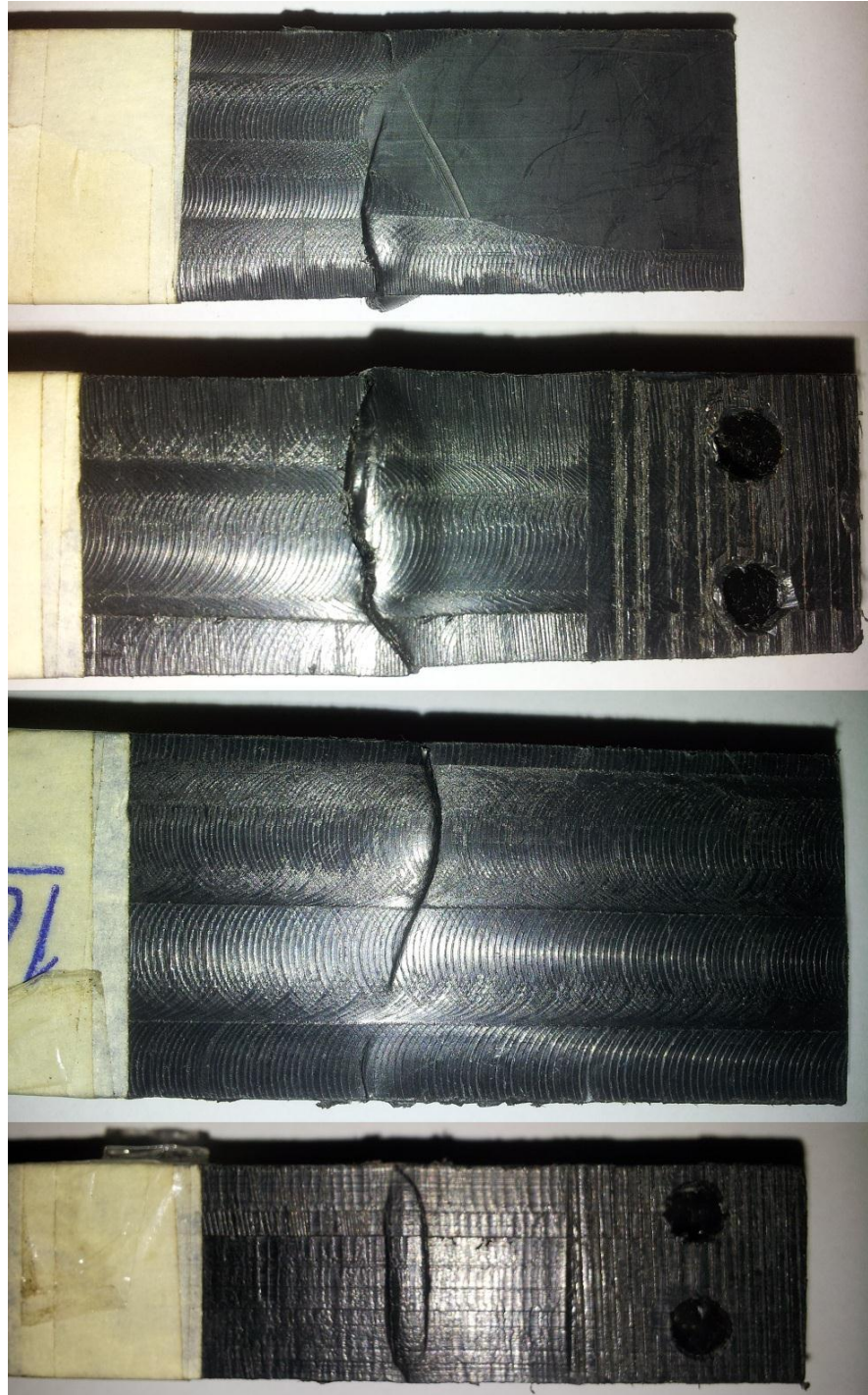
Anexo 6: Fresado de las probetas de fatiga.



Anexo 7: Probeta de fatiga después del ensayo.



Anexo 8: Probeta de fatiga después del ensayo.



Anexo 9: Probeta de fatiga después del ensayo.