

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTIMACIÓN DE CURVAS ESFUERZOS – NÚMERO DE CICLOS
POR INDENTACIÓN DINÁMICA

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castro F., Niurka N.
López V., Yurani Y.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTIMACIÓN DE CURVAS ESFUERZOS – NÚMERO DE CICLOS POR INDENTACIÓN DINÁMICA

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Alberto Pertuz

CO-TUTOR : Prof. José Chitty.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Por los Brs. Castro F., Niurka N.
López V., Yurani Y.
Para optar al Título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

ACTA

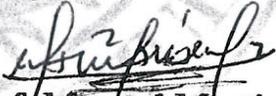
Los abajo firmantes, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por las Bachilleres NIURKA N. CASTRO F., y YURANI Y., LOPEZ V., intitulado:

“ESTIMACIÓN DE CURVAS ESFUERZO – NÚMERO DE CICLOS POR INDENTACIÓN DINÁMICA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el Plan de Estudios conducente al Título de Ingenieras Mecánicas.

En la ciudad de Caracas, a los veintiséis días del mes de junio del año dos mil ocho.


Prof. María de los A. Rodríguez
Miembro Principal


Prof. Manuel Martínez
Miembro Principal


Prof. Crisanto Villalobos
Tutor Suplente



AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios...

Agradecemos a nuestra Universidad Central de Venezuela por habernos abierto todo un mundo de ideas y aprendizajes...

Al Prof. José Chitty por su ayuda, los conocimientos que compartió con nosotras, por tener siempre una respuesta, por guiarnos y por todo el tiempo que nos dedico.

A Prof. Carlos González por su excelente asesoramiento y su buena voluntad y disposición para siempre ayudarnos.

A nuestro tutor, Prof. Alberto Pertuz

A los Prof. Perera, Prof. María Prato y Prof. Crisantos, gracias por estar pendientes y dispuestos a ayudar.

A mis padres, y muy en especial a mi mamá por su inmensa paciencia, su constante apoyo, y por ser una inagotable fuente de cariño. A Laurent, Husse, Made y Toto, por ser los amigos incondicionales, por haber compartido momentos especiales a largo de estos seis años, espero siempre tenerlos en mi vida. A Yurani, Johanna, Ronald, Valentina, Franklin, Marcela, Diego, Emilio, Eder, Luisma, Leo P., Leo A., Tania, Eduardo Mendez, por hacer mas grato esos momentos de estudios y estar siempre allí dispuestos ayudar. A mi Abuela, por ser una inspiración, enseñarme en todo momento a disfrutar y obtener lo mejor de cada experiencia. A mis hermanos, a mis tías, a toda mi familia por su apoyo. A la Sra. Eurania por ofrecer su apoyo y hacer esas comidas ricas mientras estudiamos.

Y finalmente a todos los que de una u otra forma colaboraron con este logro.

Niurka Castro

A mi mamá por ser mi fuente de inspiración, mi apoyo incondicional y por saber escuchar cada vez que lo necesito, por todas tus ricas comidas y por consentirme como solo tú sabes hacerlo. A mi hermana por ser un ejemplo a seguir, por estar siempre pendiente de mí y por ser mi mejor amiga (mi yer). A mi mejor amigo que siempre tiene una respuesta, una sonrisa, un consejo, una broma, el que hace que un día de mi vida sea diferente solo por el hecho de compartirlo con él, a ti mi querido My Ass (Miguel). A mis amigos especiales Josme, Benigno, Karla y Roberto por compartir momentos tan importantes en mi vida y estar siempre que los necesito. A mi familia por su apoyo incondicional, mi papá, tía Gely, mis primas, (Diana, Melania, Daniela, Lissette) y a mi padrino. A Edgar por llegar en un momento tan importante en mi vida, gracias por tu apoyo y por hacerme feliz. A mi entrenador Leobardo por creer en mí y permitirme formar parte del voleibol ucevista y dejarme vivir una de las mejores experiencias de mi vida y a Carolina, Sanchez, Sabrina, María, Liskeila, Nella, por disfrutarla conmigo. Y por último pero no menos importante a las personas que me acompañaron durante todos estos años y que de una u otra forma hicieron siempre que mis días en la Universidad fuesen increíbles, a Ruben Rivero (mi primer amigo en la uni), Rafael, Eduardo Mendez, Carlos Lobo, Eder, Alberto, Marcela, Jaime, Rubén Fidolo, Carlos (negro), Diego, Frodo, Alirio, Angel (gordo) y Caty. A los profesores por compartir con nosotros sus conocimientos y experiencias, Crisanto, Maricely, Denisse, Prato y en especial al Prof. Perera por estar siempre pendiente de nosotras.

Gracias a la Familia Castro, en especial a la Sra. Nilda, por abrirme las puertas de su casa y siempre hacerme sentir como en mi propia casa. Y a ti Nati por ser mi amiga y mi gran compañera de tesis...nunca olvidare todos los momentos vividos, y que a pesar de todo todavía nos soportamos, lo logramos!!

En fin, a todos por creer en mí y acompañarme en esta grandiosa e inolvidable experiencia...

GRACIAS...YURANI

DEDICATORIA

A mi mamá y a mi Abuela...

Niurka

A mis abuelas Olga y Angela, por que sé lo orgullosas que estarían de mí si me vieran, por quererme y consentirme tanto, gracias por ser los ángeles de mí vida.

Y a ti mamá simplemente por se la mejor...

Yurani

RESUMEN

Castro F., Niurka N. y López V., Yurani Y.

ESTIMACIÓN DE CURVAS ESFUERZOS – NÚMERO DE CICLOS POR INDENTACIÓN DINÁMICA

Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz. Co-tutor: Prof. José Chitty. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica, Año 2008, 87 págs.

Indentación dinámica, fatiga, dureza

En el presente trabajo se llevó a cabo un estudio del comportamiento del vidrio comercial y plexiglass sometidos a fatiga por indentación dinámica. Para ambos materiales se utilizó un indentador Rockwell C, estos especímenes fueron indentados repetidas veces y se fueron tomando los datos del diámetro de las huellas y el tamaño de sus grietas transcurridos cierto número de ciclos durante el ensayo. Debido a que el vidrio se sometió a esfuerzos por encima del esfuerzo crítico, es decir se obtuvieron grietas desde el primer ciclo, se tomó como parámetro de falla cuando el área de la indentación alcanzara un valor de 1 mm^2 , para construir la curva esfuerzo – número de ciclos. Para construir la gráfica para el plexiglass se tomó como parámetro de falla cuando la grieta alcanzara un tamaño de 0,1 mm.

En estos ensayos se pudo observar el comportamiento de los materiales, en el caso del vidrio, se fueron observando las grietas, pero estas a su vez desaparecían, ya que las grietas en algunos casos llegaban a unirse y hacía que el material se descascarara, y debido a esto aumentaba el diámetro de falla. Para el caso del Plexiglass se observaron grietas radiales a lo largo del ensayo y se pudo ver que el diámetro de la huella no aumentaba en gran proporción.

En ambos materiales se realizaron las curvas de fatiga por indentación dinámica y se pudo observar que presentaron un comportamiento similar a las curvas de Wöhler.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Motivación	3
1.2. Formulación del Problema	3
1.3. Objetivos.	4
1.4. Antecedentes	4
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Fatiga.....	7
2.1.1. Evolución de la Falla por Fatiga	9
2.2. Indentación.....	12
2.3. Dureza	12
2.4. Curvas Esfuerzo – Número de Ciclos	19
3. METODOLOGÍA	23
3.1. Ensayo de Prueba	23
3.1.1. Acondicionamiento de la Máquina de Indentación Dinámica	23
3.1.2. Dispositivo para Medir la Fuerza Aplicada	24
3.1.3. Sustitución del Resorte.....	27
3.2. Procedimiento para la Medición de la Fuerza.....	29
3.3. Ensayos Preliminares	32
3.4. Arreglo a la Máquina de Indentación Dinámica	36
3.5. Ensayos de Indentación Dinámica	36
3.5.1. Materiales.....	36
3.5.2. Preparación de las probetas.....	38
3.5.3. Montaje y ensayos.....	39
4. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	44
4.1. Comportamiento del vidrio bajo indentación dinámica.....	44
4.2. Comportamiento del plexiglass bajo cargas de indentación dinámica.....	60

CONCLUSIONES	70
RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Propagación de la grieta. Inicio (a), Propagación (b y c) y Rotura (d)...	12
Figura 2.2. Ensayo de Dureza Brinell.....	14
Figura 2.3. Huella en material sometido a ensayo Brinell.....	15
Figura 2.4. Tipos de puntas normalizadas para ensayos Brinell.....	15
Figura 2.5. Indentador Rockwell C.....	16
Figura 2.6. Huella dejada en material sometido a ensayo Rockwell.....	17
Figura 2.7. Ensayo de Dureza Vickers.....	18
Figura 2.8. Huella dejada en Ensayo de Dureza Vickers.....	18
Figura 2.9. Curvas Esfuerzo – Número De Ciclos.....	20
Figura 2.10. Ciclo de inversión completa del esfuerzo de forma sinusoidal.....	20
Figura 2.11. Ciclos de esfuerzos a tracción.....	21
Figura 3.1. Diseño de Máquina de Indentación Dinámica. Propuesta (a).....	25
Figura 3.2. Diseño de Máquina de Indentación Dinámica. Propuesta (b).....	26
Figura 3.3. Esquema del Resorte.....	28
Figura 3.4. Fotografía del Resorte.....	29
Figura 3.5. Lector de la Celda de Carga.....	30
Figura 3.6. Celda de Carga.....	30
Figura 3.7. Conexión de la celda de carga con el lector de la celda de carga.....	31
Figura 3.8. Huella dejada por el indentador en la probeta de Aluminio 6063.....	33
Figura 3.9. Fotografía del Resorte Fracturado.....	35
Figura 3.10. Indentador Vickers (deteriorado).....	35
Figura 3.11. Plano de la Probeta.....	38
Figura 4.1. Huella dejada en la probeta a 1 ciclo, carga 1, 2, 3.....	44
Figura 4.2. Huella dejada en la probeta a los 3.162 ciclos, carga 1, 2, 3.....	45
Figura 4.3. Huella dejada en la probeta a los 6.324 ciclos, carga 3.....	45
Figura 4.4. Gráfica Diámetro – Número de ciclos.....	46
Figura 4.5. Huella dejada en la probeta a los 341.496 ciclos.....	47

Figura 4.6. Replicas, transcurridos 1, 6.324 y 18.972 ciclos, carga 1.....	48
Figura 4.7. Replicas transcurridos 31.620, 56.916 y 75.888 ciclos, carga 1.....	49
Figura 4.8. Gráfica Diámetro- Número de ciclos, carga 1.....	50
Figura 4.9. Gráfica Diámetro- Número de ciclos, carga 1.....	50
Figura 4.10. Replicas transcurridos 1, 6.324 y 12.648, ciclos carga 2.....	51
Figura 4.11. Replicas transcurridos 25.296 y 44.268 ciclos, carga 2.....	51
Figura 4.12. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 2.....	52
Figura 4.13. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 2.....	53
Figura 4.14. Replicas transcurridos 1, 3.162 y 12.648 ciclos, carga 3.....	53
Figura 4.15. Replicas transcurridos los 25.296 y 31.620 ciclos, carga 3.....	54
Figura 4.16. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 3.....	55
Figura 4.17. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 3.....	55
Figura 4.18. Diámetros – Número de Ciclos (Log-Log).....	56
Figura 4.19 Gráfica Área –Número de ciclos.....	58
Figura 4.20 Curva Esfuerzo – Número de ciclos.....	59
Figura 4.21. Probeta dañada por la acetona.....	60
Figura 4.22. Probeta transcurrido 843.622 ciclos.....	61
Figura 4.23. Probetas a 1ciclo, carga 1, 2 y 3.....	62
Figura 4.24. Probetas con grietas de aproximadamente 0,1 mm, carga 1, 2 y 3.....	62
Figura 4.25. Gráfica Diámetro – Número de ciclos.....	63
Figura 4.26. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log), carga 1.....	64
Figura 4.27. Gráfica Diámetro – Número de ciclos, carga 2.....	65
Figura 4.28. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log), carga 3.....	65
Figura 4.29. Gráfica Diámetro – Número de ciclos.....	66
Figura 4.30. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log).....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Medidas de las Cargas	32
Tabla 3.2. Fuerza Aplicada	39
Tabla 3.3. Valores de los Parámetros.....	40
Tabla 4.1. Diámetro – Número de ciclos	46
Tabla 4.2 Diámetros carga 1.	49
Tabla 4.3 Diámetros carga 2.	52
Tabla 4.4 Diámetros carga 3.	54
Tabla 4.5. Área – Número de Ciclos.....	58
Tabla 4.6 Esfuerzo medio- número de ciclos.....	59
Tabla 4.7. Diametro – Nuúmero de ciclos, carga 1.....	63
Tabla 4.8. Diámetro – Número de ciclos, carga 2.....	64
Tabla 4.9. Diametro – Nuúmero de ciclos.	66

INTRODUCCIÓN

En la ingeniería es imprescindible estudiar el comportamiento de las características de los materiales antes de ser utilizados para cualquier diseño. El comportamiento mecánico de los materiales se describe mediante sus propiedades mecánicas, que son simplemente resultados obtenidos por medio de ensayos. Desde el punto de vista de diseño estático es suficiente con conocer los valores de, esfuerzos de fluencia, resistencia a la ruptura, elongación y módulo de elasticidad, para efectos de diseño.

Sin embargo, cuando una pieza se somete a esfuerzos variables, por ejemplo debido a movimientos propios de la pieza, las propiedades estáticas del material pierden su valor, ya que las piezas fallan por haber sufrido un determinado número de ciclos de trabajo bajo cargas cíclicas. 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 en muchos casos una 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*". A pesar, que la mayoría de los componentes que están sometidos a fatiga se diseñan por debajo de su límite elástico, con un número suficiente de ciclos, la pieza puede fallar. De esto se dio cuenta August Wöhler, hacia 1860, y posterior a algunas pruebas concluye con dos teorías, la primera, que los esfuerzos correspondientes para provocar la ruptura con cargas dinámicas está por debajo que con cargas estáticas, y la segunda, que existía un valor mínimo por debajo del cual las piezas no rompían, siendo este el límite a la fatiga. Ésto fue representado en unas curvas S-N (esfuerzo vs número de ciclos), conocidas como Curvas de Wöhler.

Otro ensayo muy rápido y que permite estimar otras propiedades mecánicas es a través de los ensayos de dureza se puede conocer cual es la resistencia de un material a ser penetrado y deformado por otro. El ensayo común de dureza es de tipo estático, sin embargo la máquina de indentación dinámica hace interesante y permite estudiar cual es el comportamiento de los materiales ante un ensayo de dureza de tipo dinámico, como su nombre lo describe.

En este Trabajo Especial de Grado se realizarán los ensayos de fatiga utilizando la máquina de indentación dinámica, con lo cual se estudiará el comportamiento de los materiales a ensayos, bajo cargas cíclicas, determinando así el número de ciclos a los cuales el material iniciará las grietas y cuando el área afectada por la falla alcance un valor determinado, esto a partir de múltiples deformaciones plásticas consecutivas. Estos resultados podrían ser utilizados para calcular la vida útil de piezas sometidas a trabajos livianos, repetitivos y con prolongado tiempo de uso.

1.-PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Motivación

Los ensayos de fatiga tienen gran importancia para la ingeniería ya que establecen una aproximación de la vida útil de grandes cantidades de piezas, que pueden estar sometidas a diferentes cargas cíclicas: de tracción, compresión, torsión o impacto. La importancia de este trabajo es la propuesta de un nuevo método de ensayo de fatiga por indentación dinámica, el cual puede ser un método poco costoso, sencillo y que se podría realizar en menos tiempo que los ensayos convencionales.

Por otro lado, los ensayos de fatiga requieren probetas normalizadas que necesitan una preparación rigurosa y con este nuevo método solo se necesita una pequeña porción del material a ensayar, además, la misma probeta se puede utilizar para realizar varios ensayos.

1.2. Formulación del Problema

Dado que el desarrollo de las tecnologías va avanzando cada día se hace importante desarrollar estudios que permitan profundizar el conocimiento del comportamiento de los materiales, en particular cuando están sometidos a cargas cíclicas.

La fatiga es el fenómeno por el cual los materiales pierden resistencia cuando están sometidos a ciclos de esfuerzos variables en el tiempo. Ésta ocurre porque hay deformaciones plásticas cíclicas que provocan daño a los materiales. 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 discontinuidades como:

inclusiones, porosidades o concentradores de esfuerzos, los cuales aumentan las probabilidades de formación de fisuras o microgrietas.

El estudio de fatiga es muy importante ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90%), aunque también ocurre en polímeros, cerámicas y materiales compuestos.

1.3. Objetivos.

Objetivo General

- Estudiar el comportamiento dinámico por indentación en varios materiales.

Objetivos Específicos

- Acondicionar la máquina de indentación dinámica ubicada en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela.
- Realizar el ensayo de fatiga por indentación dinámica a diferentes cargas.
- Estimar las curvas de fatiga por indentación dinámica en los distintos materiales a ensayar.

1.4. Antecedentes

Para realizar el ensayo de fatiga por indentación dinámica, el cual es uno de los objetivos de este trabajo, es necesario hacer una revisión de las investigaciones que se han desarrollado anteriormente, uno de ellos es el estudio de Banerjee y Kumar [15] quienes realizaron ensayos de microdureza Vickers para evaluar las propiedades

de fatiga en materiales frágiles, estos especímenes fueron indentados en varias ocasiones en el mismo punto con una carga subcrítica, esto quiere decir, que con la primera indentación no se producen grietas, sin embargo se continúa indentando hasta la iniciación de las grietas radiales. Estos investigadores basaron su experimento en que la longitud de las diagonales de la cavidad deformada fueran aumentando con el número de ciclos y analizaron este incremento para un cierto número de ciclos antes de la visibilidad de la grieta, correlacionando el fenómeno elasto-plástico con la acumulación de tensión residual en cada ciclo. En los resultados de su investigación observaron que la longitud de la diagonal de la muesca en los materiales estudiados continuaron aumentando con las repetidas indentaciones a cargas subcríticas y que al alcanzar la tensión crítica después de un número de ciclos de tensión aplicados se produjo la grieta, por lo que concluyeron que el aumento de la región plástica era debido a la expansión progresiva de la impresión.

En otra investigación, Fuqian Yang et.al. [16] utilizaron la indentación cíclica para evaluar la deformación dinámica del aluminio. Estos realizaron el experimento controlando la carga y dejando que el indentador penetrara continuamente en el material hasta que la velocidad de penetración (por ciclo) fuese constante. Estos investigadores concluyeron que bajo condiciones experimentales la velocidad de penetración en el estado de equilibrio disminuyó con el aumento de la carga debido al incremento de la zona plástica y que la energía plástica disipada por ciclo incrementó con la amplitud de la carga debido al crecimiento de la zona plástica bajo el indentador.

Xu y Yue [17] estudiaron experimentalmente el comportamiento a la fatiga por indentación de cobre policristalino bajo cargas cíclicas. Enfatizaron su estudio en la propagación de la deformación por indentación y la influencia de cargas máximas y cargas mínimas. El trabajo que estos investigadores realizaron mostró que un incremento de la carga máxima puede acelerar la propagación de la deformación por indentación, mientras que un decrecimiento en la carga máxima, retarda la

propagación de la deformación por indentación. Concluyeron que esos fenómenos experimentales implican algunas semejanzas en el comportamiento de la propagación de la profundidad de la muesca en indentación dinámica y la propagación de grieta en un ensayo de fatiga convencional. Además sus resultados revelaron que la nucleación y la acumulación de cavidades están vinculados con el desarrollo de las grietas, lo que implica que es el principal mecanismo de daño durante la fatiga por indentación.

Por otro parte Vega y Martínez [18] realizaron un estudio con el objetivo de profundizar el conocimiento del comportamiento de los materiales plásticos y compuestos con matriz polimérica ante situaciones de impacto. Estudiaron los fenómenos de indentación dinámica que ocurren al colisionar verticalmente un indentador semiesférico con una plancha de material plástico o compuesto. Para ello se plantearon tres modelos matemáticos, uno conservativo y dos no conservativos, que simulan el comportamiento del material frente a la indentación dinámica. Su modelo conservativo no considera las pérdidas de energía durante la colisión, motivo por el que prescinde del elemento amortiguador. Los dos modelos no conservativos están constituidos por un resorte y un amortiguador, la diferencia entre estos dos es la disposición de los elementos mecánicos, bien estén en serie o en paralelo. Con estos tres modelos los investigadores simulaban las gráficas fuerza-tiempo obtenidas en los ensayos, calcularon propiedades mecánicas del material, penetraciones del dardo de impacto, diámetros de las huellas generadas por el impacto, etc. Vega y Martínez observaron en base a las gráficas experimentales que el coeficiente de restitución no es un parámetro intrínseco del material y que depende de la velocidad de impacto, la geometría del indentador, la masa del indentador, así como del material. Y obtuvieron como resultado de su estudio que el modelo conservativo y el paralelo (no conservativo), no aproxima correctamente el comportamiento del material mientras que el modelo serie si lo hace.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fatiga

Desde la antigüedad se sabe que la rotura de los materiales ocurre con más facilidad cuando están expuestos a cargas dinámicas que cuando se encuentran bajo cargas estáticas. Un claro ejemplo de ello, es que un alambre es imposible de romper si es estirado manualmente por sus extremos, sin embargo si se flexiona y se realizan movimientos repetitivos se romperá con facilidad. [10]

Sin embargo, este comportamiento en materiales no fue de gran interés para los ingenieros hasta mediados del siglo XIX, principalmente como consecuencia de la experiencia adquirida en la ingeniería de ferrocarriles, ya que comenzaron a producirse roturas prematuras en los ejes de las ruedas, debido al deterioro gradual del metal durante el curso de su trabajo. [10]

Para explicar este fenómeno se propusieron distintas teorías. En 1843 William John Macquorn Rankine demostró que la reducción de las concentraciones de tensiones alargaba la vida del eje. Luego, entre 1858 y 1870 Whöler realizó la primera investigación amplia de la fatiga de los metales. Diseñó diversas máquinas para el estudio del fenómeno bajo diversas condiciones de los esfuerzos, una de las cuales es la máquina de flexión rotativa para ensayos de fatiga en materiales férricos. De aquellos ensayos, Whöler extrajo dos conclusiones, la primera, que los esfuerzos necesarios para provocar la rotura con cargas dinámicas eran inferiores a los necesarios para el caso de cargas estáticas, y la segunda que existía un valor mínimo por debajo del cual las probetas no se rompían, siendo este el límite a la fatiga. [10]

Ya en el siglo XX, Humfrey y Ewing realizaron las primeras observaciones al microscopio de la deformación provocada por los efectos fluctuantes. Encontraron

que bajo cargas dinámicas el metal se deformaba debido al deslizamiento de algunos planos dentro de los cristales, aparecían deformaciones por deslizamiento similares a las obtenidas en el caso estático, y a partir de estas bandas de deslizamiento se originan grietas de fatiga cuyo posterior crecimiento es lo que conduce a la rotura. [10]

Posteriormente en 1923, Hanson y Gough introdujeron la hipótesis del endurecimiento por deformación para explicar la existencia del límite de fatiga, si el valor del esfuerzo es inferior al del límite a la fatiga la deformación podrá detenerse finalmente, pero si no, podrá alcanzarse un límite de endurecimiento por deformación y podrá formarse una grieta. [10]

Actualmente, aunque se acepta la teoría del endurecimiento/deslizamiento, no existe una formulación cuantitativa de la teoría que permita realizar un cálculo fiable. No obstante, la multitud de datos disponibles, especialmente para materiales ferrosos y muchos materiales metálicos de uso comercial, ha permitido desarrollar métodos de cálculo para el diseño de piezas con garantías. Este no es el caso de materiales de reciente aparición, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos. El proceso de deslizamiento provoca la aparición de una o varias grietas en aquellos puntos en los que exista una concentración de tensiones (impurezas, poros, etc.) que por efecto de las cargas dinámicas se van propagando hasta que la sección eficaz de la pieza es insuficiente para soportar la carga estática. [10]

De esta manera se puede decir que la fatiga es el deterioro gradual de un material que esta sujeto a cargas repetidas. 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 discontinuidades como: inclusiones, porosidades o concentradores de esfuerzos, los cuales aumentan las probabilidades de formación de fisuras o microgrietas por el efecto cíclico de cargas.

Las Normas ASTM (American Society of Testing and Materials) definen a la fatiga como: “Término general usado para describir el comportamiento de materiales sometidos a ciclos repetidos de tensión o deformación que ocasiona un deterioro del material que provoca una falla progresiva”. [24]

2.1.1. Evolución de la Falla por Fatiga

Una falla por fatiga usualmente comienza con una discontinuidad local como una muesca, grieta u otra área de concentración de esfuerzo. Cuando el esfuerzo en la discontinuidad excede el límite elástico, ocurre deformación plástica. [5]

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aún en metales dúctiles. La superficie de fractura es inicialmente paralela a la dirección de los esfuerzos de corte máximo (usualmente 45° con respecto a los esfuerzos principales) lo que corresponde a la primera etapa de crecimiento de grietas y posteriormente la grieta se torna perpendicular al esfuerzo principal, lo que se conoce como segunda etapa de crecimiento de grieta y que usualmente se modela usando mecánica de fractura lineal elástica. [5]

Existen algunas condiciones básicas para la aparición de la falla por fatiga:

- Valor elevado de esfuerzo (σ) o deformación (ϵ) (que exceda el límite a la fatiga);
- Fluctuación en el valor de la tensión aplicada, y;
- Mayor o menor número de ciclos de aplicación de carga o deformación.

El proceso de rotura por fatiga está caracterizado por tres etapas distintas: comenzando con la iniciación de la grieta, en donde se forma una grieta pequeña en

alguna región de alta concentración de tensiones; luego la propagación de la grieta, durante la cual ésta avanza de forma gradual en cada ciclo de carga y culminando con la fractura súbita causada por el crecimiento inestable de la grieta. La primera etapa puede ser de corta duración, mientras que la segunda etapa implica la mayor parte de la vida de la pieza y la tercera etapa es de muy corta duración. [5]

Inicio de la Grieta

Las grietas asociadas con la rotura por fatiga casi siempre se inician (o nuclean) sobre la superficie de un componente en alguna zona donde exista concentraciones de tensión y en la superficie exterior donde las fluctuaciones de tensión por lo general son más elevadas. Una o más grietas se desarrollan en el material. Las grietas pueden aparecer por muchas razones: imperfecciones en la estructura microscópica del material, ralladuras, arañazos, muescas y entallas causados por las herramientas de fabricación o medios de manipulación. Además, las cargas cíclicas pueden producir discontinuidades superficiales microscópicas a partir de escalones producidos por deslizamiento de dislocaciones, los cuales pueden actuar como concentradores de la tensión, y por tanto como lugares de nucleación de grietas.

El inicio de grieta también puede producirse por defectos del material, como por ejemplo, poros o inclusiones y discontinuidades geométricas. [5]

Propagación de la Grieta

Una vez que se ha nucleado una grieta, entonces se propaga muy lentamente, esto se denomina, a veces, etapa I de la propagación. Esta etapa puede constituir una fracción grande o pequeña de la vida total a fatiga, según el nivel de la tensión y la naturaleza de la probeta; tensiones elevadas y la presencia de entallas influyen una

etapa de corta duración. La superficie de fatiga que se forma en esta etapa de propagación tiene aspecto plano y con pocos detalles importante. [5]

Eventualmente, empieza una segunda etapa de propagación, etapa II, en la cual la velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto comienza un cambio en la dirección en la propagación de la grieta, para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo normal máximo. [5]

La región de una superficie de fractura que se formó durante la etapa II de propagación se puede caracterizar por dos tipos de marcas unas definidas como marcas de playa y las otras como estrías. Las marcas de playa son de dimensiones macroscópicas y pueden verse a simple vista, mientras que las estrías de fatiga son de tamaño microscópico y se observan en un microscopio electrónico. Es importante notar que aunque tanto las estrías como las marcas de playa son aspectos de la superficie de fractura que tienen apariencia similar, parecen crestas concéntricas que se expanden desde los puntos de iniciación son, sin embargo, diferentes tanto en origen como en tamaño. Puede haber miles de estrías dentro de una marca de playa. Sin embargo, la ausencia de ambos tipos de marcas no excluye que la causa de la fractura sea por la fatiga; estas marcas parecen ser menos comunes cuando son roturas rápidas. [5]

Rotura de la Pieza

La pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático, produciéndose la rotura por fatiga. [5]

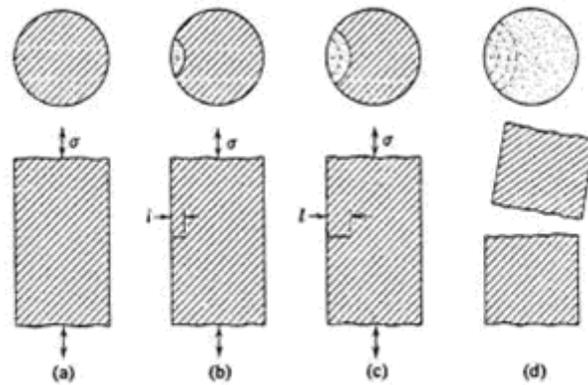


Figura 2.1. Propagación de la grieta. Inicio (a), Propagación (b y c) y Rotura (d).

2.2. Indentación

El ensayo de indentación, consiste en presionar un indentador sobre la superficie de prueba, dejando una impresión sobre el material. Dependiendo de la carga máxima aplicada y de la geometría de la huella dejada, se puede obtener el valor de la dureza.

El ensayo por indentación se puede realizar también de manera dinámica, consiste en hacer repetidas indentaciones manteniendo siempre el indentador sobre la superficie del material a ensayar, utilizando una carga cíclica de amplitud constante. La carga variará entre un valor máximo y un valor mínimo. La razón entre la carga mínima y la carga máxima se denomina razón de esfuerzo (o de carga) y se denota con la letra R .

2.3. Dureza

La dureza es una propiedad que puede ser definida como la resistencia que presenta un material a ser penetrado. Es un ensayo simple y de alto rendimiento ya que no destruye la muestra. [25]

La dureza se calcula por la relación entre la fuerza aplicada y la superficie representativa de la zona indentada.

Los métodos existentes para la medición de la dureza se distinguen básicamente por la forma de la herramienta empleada (indentador), por las condiciones de aplicación de la carga y por la propia forma de calcular la dureza. La elección del método para determinar la dureza depende de factores tales como tipo, dimensiones de la muestra y espesor de la misma. [25]

Entre los diferentes tipos de ensayos por penetración, se tiene:

- Dureza Brinell.
- Dureza Rockwell.
- Dureza Vickers.
- Dureza Knoop.
- Dureza Berkovich.

Ensayo de Dureza Brinell

Se denomina dureza Brinell a la medición de la dureza de un material mediante el método de indentación, midiendo la penetración de un objeto en el material a estudiar. Este ensayo se utiliza en materiales blandos (de baja dureza) y muestras delgadas. El indentador usado es una bola de acero templado de diferentes diámetros. [25]

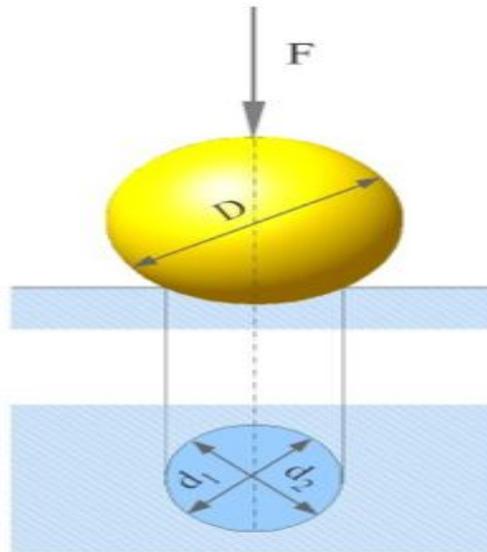


Figura 2.2. Ensayo de Dureza Brinell

El número de dureza Brinell, o simplemente el número Brinell, se obtiene dividiendo la carga aplicada, en kilogramos, por la superficie real de la huella, en milímetros cuadrados.

$$HB = \frac{2P}{\pi \cdot D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)} \quad [2-1]$$

Este ensayo sólo es válido para valores menores de 600 HB en el caso de utilizar la bola de acero, pues para valores superiores la bola se deformaría y el ensayo no sería válido. Este método es considerado muchas veces como un ensayo no destructivo. [25]

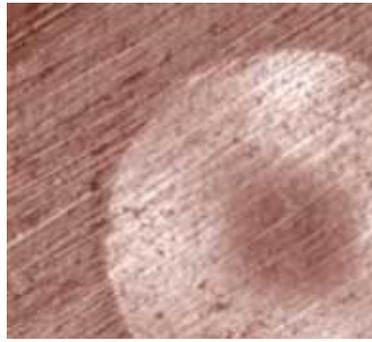


Figura 2.3. Huella en material sometido a ensayo Brinell



Figura 2.4. Tipos de puntas normalizadas para ensayos Brinell

Ensayo de Dureza Rockwell

El ensayo de dureza Rockwell, se basa en la medición de la profundidad de penetración de una determinada herramienta bajo la acción de una carga prefijada. Se determina la profundidad de penetración de un indentador bajo ciertas condiciones arbitrarias de prueba. El indentador puede ser una esfera de acero endurecido de algún diámetro especificado, los cuales varían entre 1/16 pulg. (1.58 mm) a 1/2 pulg. (12.7 mm), o un diamante cónico de punta esférica, llamado Brale, con un ángulo de 120° y un radio en la punta de 0.2 mm. [26]

El penetrador de diamante permite probar fácilmente los aceros más duros y los de esfera grande permiten probar materiales blandos e incluso plásticos.

El número de dureza Rockwell (HR) se mide en unidades convencionales y es igual al tamaño de la penetración sobre cargas determinadas.

Una de las ventajas de la prueba Rockwell es que el valor de dureza se puede leer directamente en un medidor graduado, en el durómetro correspondiente. [26]

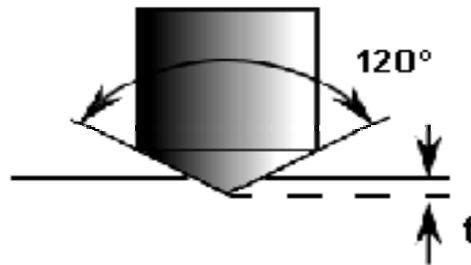


Figura 2.5. Indentador Rockwell C

Muestra del funcionamiento del ensayo Rockwell. El penetrador precarga, luego carga, y luego descarga; la relación entre la precarga más la carga y la descarga indica la dureza del material. [26]

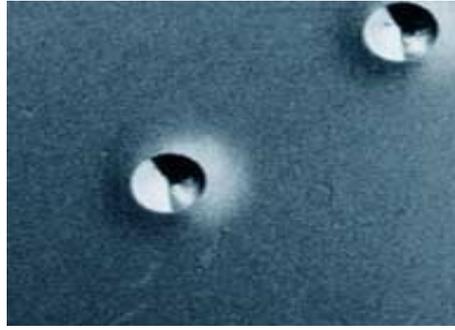


Figura 2.6. Huella dejada en material sometido a ensayo Rockwell

Ensayo de Dureza Vickers

El método Vickers para probar la dureza es semejante en principio al método Brinell en que se expresa el resultado en función de la presión originada bajo el indentador y usa las mismas unidades, kilogramos por milímetro cuadrado. El indentador es un diamante en forma de pirámide de base cuadrada con un ángulo en el vértice de 136° , las cargas son mucho más ligeras, variando de 5 a 125 Kg. (de cinco en cinco), y la impresión no se lee directamente en la máquina, se mide por medio de un microscopio de mediano aumento. Se puede emplear para láminas tan delgadas como 0.006 pulg. [25]

Para determinar el número de dureza se aplica la siguiente fórmula:

$$HV = 1,854 \frac{P}{d^2} \left[\frac{Kg}{mm^2} \right] \quad [2-2]$$

HV se expresa en Kgf/mm^2 si la carga P se da en gf y la diagonal de la huella d en μm . A veces, la cantidad de dureza se expresa en GPa. En este caso, la carga P se expresa en Newtons (N) en la relación. [25]

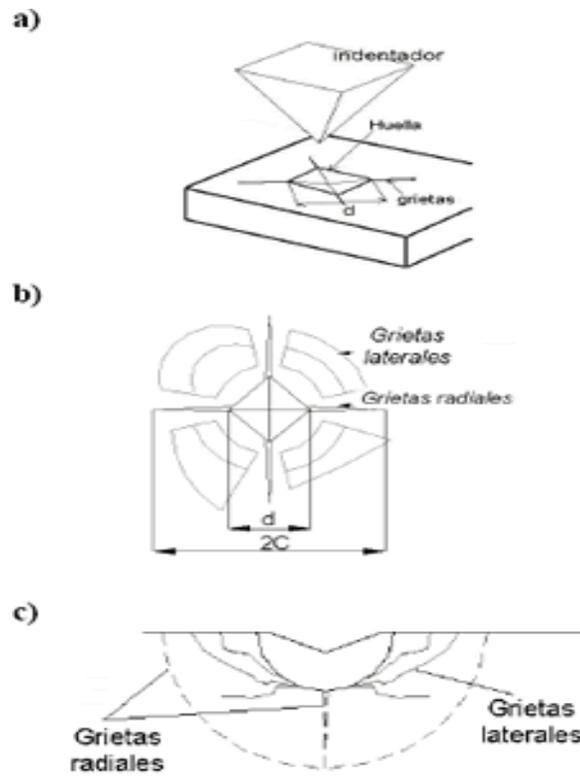


Figura 2.7. Ensayo de Dureza Vickers

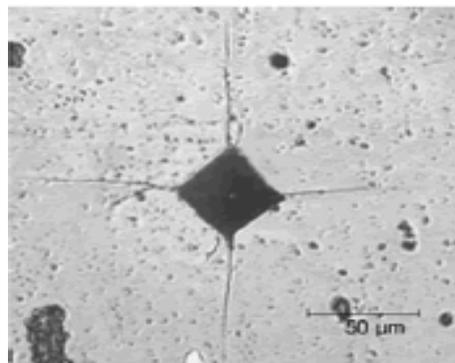


Figura 2.8. Huella dejada en Ensayo de Dureza Vickers

2.4. Curvas Esfuerzo – Número de Ciclos

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

- La primera, que los esfuerzos principales necesarios para provocar la ruptura con cargas dinámicas son inferiores a las necesarias en el caso estático, y
- La segunda que existe un umbral por debajo del cual las probetas no se rompen, de hecho se conoce como el límite a la fatiga. [27]

El método fundamental para representar los datos de fatiga es la curva Wöhler, también llamada simplemente curva de fatiga o curvas S-N. Aquí se representa la duración de la probeta, expresada en números de ciclos (N) hasta la rotura, para la máxima tensión aplicada. [9]

Se realizan una serie de ensayos a la fatiga en varias de las probetas del material a diferentes grados de esfuerzo. Por la selección de esfuerzos cada vez más bajos, puede encontrarse un valor que no producirá falla (límite a la fatiga), independientemente del número de ciclos aplicados. [2]

El diagrama se llama diagrama de esfuerzos – número de ciclos o diagrama S-N. En lugar de registrar los datos en coordenadas cartesianas, el esfuerzo se traza contra el logaritmo del número de ciclos, o tanto el esfuerzo como los ciclos se trazan a escalas logarítmicas. [2]

El límite de fatiga puede establecerse para la mayor parte de los aceros entre 2 y 10 millones de ciclos. En general, los metales no ferrosos no muestran claramente definido el límite a la fatiga. Las curvas S-N, en estos casos, indican una disminución

continua de valores de esfuerzo hasta varios cientos de millones de ciclos, y debe informarse tanto el valor del esfuerzo como el número de ciclos sostenidos [2].

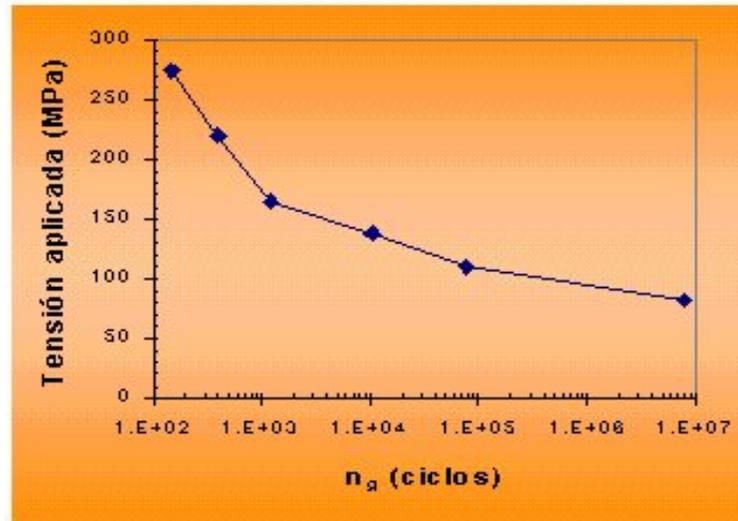


Figura 2.9. Curvas Esfuerzo – Número De Ciclos

Es conveniente definir brevemente los tipos comunes de fluctuación de esfuerzos que pueden producir fatiga.

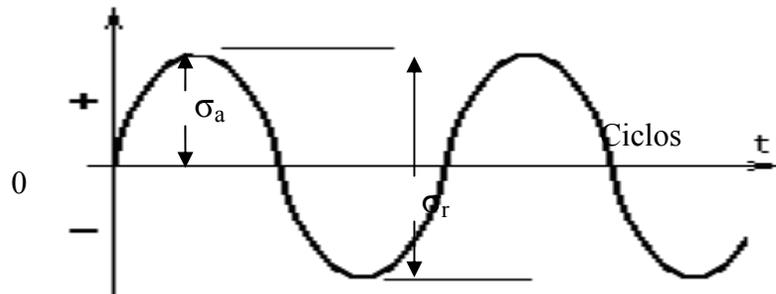


Figura 2.10. Ciclo de inversión completa del esfuerzo de forma sinusoidal.

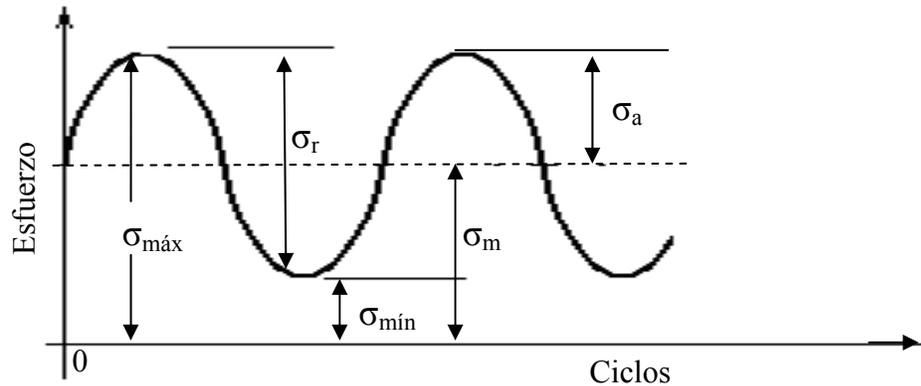


Figura 2.11. Ciclos de esfuerzos a tracción.

Un ciclo de esfuerzos fluctuantes puede considerarse constituido por dos componentes: un esfuerzo medio, o estacionario y otra alterna o variable. Hay que considerar también el intervalo de esfuerzos definido como la diferencia algebraica entre el esfuerzo máximo y mínimo del ciclo:

$$\sigma_r = \sigma_{\text{máx}} - \sigma_{\text{mín}} \quad [2-3]$$

El esfuerzo alterno es igual a la mitad del intervalo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} \quad [2-4]$$

El esfuerzo medio es la media algebraica del esfuerzo máximo y mínimo del ciclo:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\text{máx}} + \sigma_{\text{mín}}}{2} \quad [2-5]$$

Otra cantidad que se emplea generalmente al presentar los datos de fatiga es la relación de esfuerzos R. Se define con la siguiente ecuación:

$$[2-6]$$

$$R = \frac{\mathcal{G}_{\min}}{\mathcal{G}_{\max}}$$

3. METODOLOGÍA

3.1. Ensayo de Prueba

Para dar cumplimiento a los objetivos planteados y previstos al inicio de la presente investigación, resulta imperiosa la necesidad de determinar el estado del equipo a utilizar, en este caso una máquina de indentación dinámica. Dicho equipo fue diseñado y construido por los estudiantes de la Escuela de Ingeniería Mecánica, De Amicis A. y Fuenmayor J.

Para conocer el estado y el nivel de funcionamiento en el que se encontraba la máquina, ubicada en el laboratorio de ensayos mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, y verificar que permitiese la ejecución de diversos ensayos para analizar el comportamiento de los materiales sometidos a estudio, se ensayo una probeta de Aluminio 6063 previamente pulida con lijas de un tamaño de grano de 80, 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200 y alúmina de 0,3 micras. La máquina se colocó a una frecuencia de 9,17 Hz con una duración aproximada de 6 horas, mientras la máquina trabajaba, se pudo observar ciertas deficiencias, siendo estas importante de modificar para llevar a cabo la investigación.

3.1.1. Acondicionamiento de la Máquina de Indentación Dinámica

Debido a los resultados del ensayo de prueba, se pudo definir el estado de la máquina, determinando así, que no solo era necesario un simple acondicionamiento si no que se debían rediseñar y sustituir algunas partes de la misma, por lo que se hace imprescindible mejorar los siguientes aspectos, la inclusión de un dispositivo que permita medir la fuerza aplicada debido a la necesidad de conocer a que carga se esta realizando el ensayo, y sustituir el resorte original por otro ya que la poca

resistencia que éste producía ocasionaba que la carga no fuese suficiente para provocar una grieta en el material a ensayar.

3.1.2. Dispositivo para Medir la Fuerza Aplicada

El acondicionamiento de la máquina de indentación dinámica se realizó basándose en la metodología del diseño, teniendo ésta diferentes etapas a desarrollar. Primero se debe definir el problema, luego generar distintas soluciones y evaluar cada una de ellas, para así realizar una selección de la solución más factible, a la que luego se estudiará con detenimiento para hacer una mejora del diseño y finalizar con su construcción. Este método es ampliamente utilizado para los diseños de ingeniería, ya que es una respuesta directa a las necesidades específicas de un problema, englobadas en pasos y actividades a realizar para obtener la solución final.

La generación de soluciones se llevó a cabo con ayuda de algunos profesores de la Escuela de Ingeniería Mecánica y de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, después que se le fue explicado el funcionamiento de la máquina y descrito el problema.

De la tormenta de ideas se seleccionaron las siguientes:

- (a) Diseñar un portaindentador cilíndrico con diámetro 18,95 mm y 81,35mm de longitud, en el cual se pueda introducir una pequeña celda de carga en el cuerpo de la pieza antes del agarre del indentador.

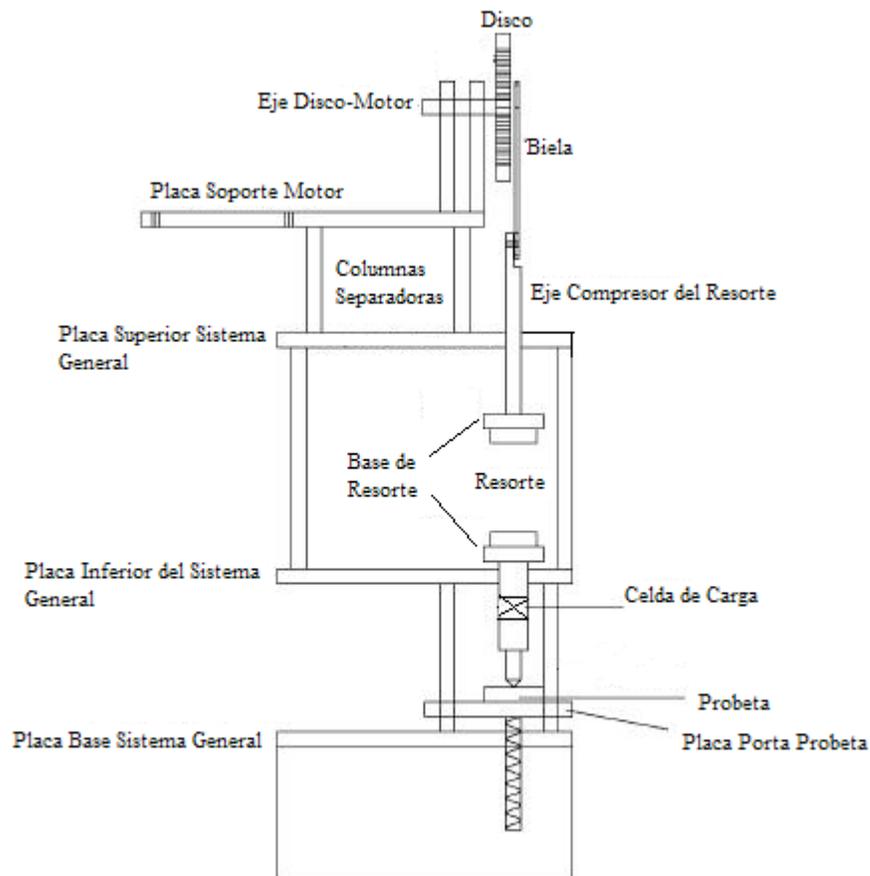


Figura 3.1. Diseño de Máquina de Indentación Dinámica. Propuesta (a)

(b) Diseñar una pieza cilíndrica con diámetro de 16 mm y longitud 75 mm, que sustituya al portaprobeta, ya que en la parte superior de la misma se encontrará apoyado el indentador y en su lado inferior estará vinculada por medio de un tornillo a la celda de carga, la cual se encontrará en la base de la máquina.

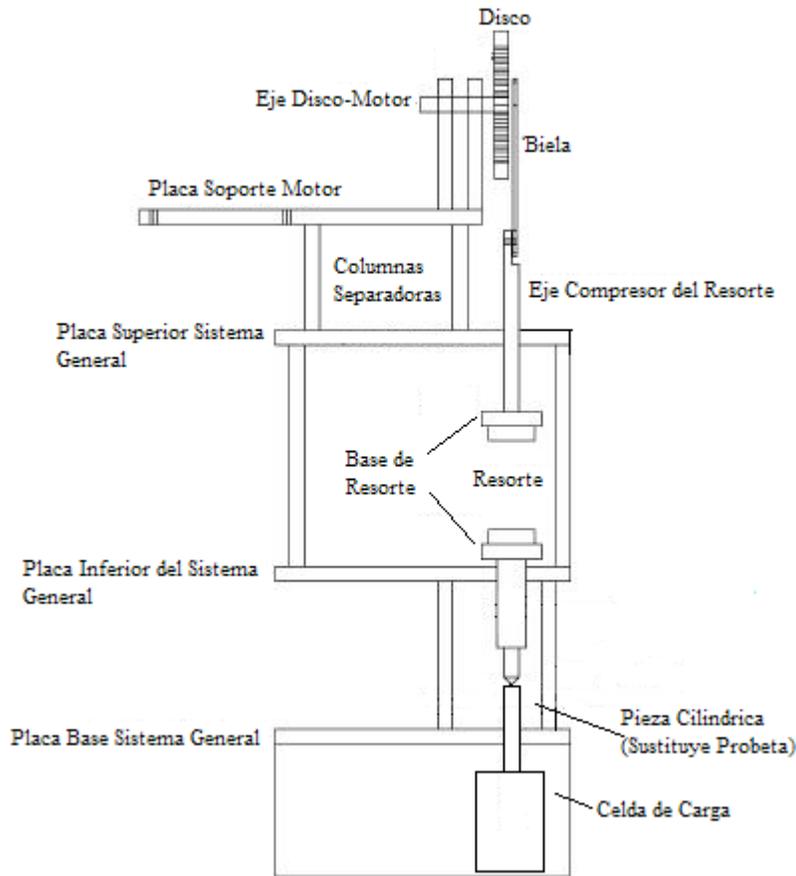


Figura 3.2. Diseño de Máquina de Indentación Dinámica. Propuesta (b)

Evaluando las propuestas se tomó en cuenta diferentes aspectos:

- La celda de carga a utilizar en la propuesta (a) requiere un tamaño específico, por lo que se debe mandar a fabricar, generando costos e inversión de tiempo que retardaría la investigación; mientras que la propuesta (b) permite tamaños y formas variables de la celda de carga, y no se necesita ser tan riguroso para la selección de la misma.
- En la propuesta (a) se requiere construir un portaindentador cuya fabricación es complicada por las especificaciones del diseño, en la propuesta (b) se

utilizará el portaindentador existente y la pieza cilíndrica que se debe construir es sencilla de realizar.

- Una vez obtenidas todas las piezas necesarias para el montaje del dispositivo, la propuesta (a) permite medir la fuerza de manera directa y cuando la máquina se encuentre encendida o apagada. En la propuesta (b) se debe desarmar la máquina y sustituir el portaprobeta por la pieza cilíndrica cada vez que se requiera medir la fuerza y la máquina se debe encontrar apagada.

Luego de la evaluación y tomando en cuenta diferentes aspectos se hizo la selección de la propuesta (b) ya que pareció ser la más factible y mucho más económica, por las siguientes razones:

- La celda de carga que se utilizará se encuentra disponible en el Laboratorio de Fotoelasticidad del Departamento de Diseño de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela, ésta es una celda marca BHL electronics, tipo U3G1B, serie 92843 y con una capacidad de 100 lbf y va conectada a un lector de celda de carga de marca Photolastic, que permitirá la lectura de la fuerza máxima y mínima utilizada en la máquina de indentación dinámica.
- La pieza cilíndrica que irá conectada a la celda de carga se fabricará de aluminio ya que es un material que se mecaniza con facilidad y es relativamente económico.

3.1.3. Sustitución del Resorte

Al realizar el ensayo de prueba se pudo observar que el resorte de la máquina no contaba con la rigidez necesaria para ejercer la fuerza requerida para los

ensayos, por lo que fue reemplazado por otro que cumple con las siguientes características:

- Tamaño:
 - Diámetro interno (\varnothing_i)= 28.6 mm.
 - Diámetro externo (\varnothing_e) = 34.77 mm.
 - Diámetro del alambre (\varnothing_a) = 3.5 mm.
 - Longitud máxima del resorte= 92.25 mm.
 - Longitud mínima del resorte = 33.8 mm.
 - Desplazamiento (x) = 58,45mm
- Número de espiras = 11 espiras.
- Paso del resorte = 9.4 mm.

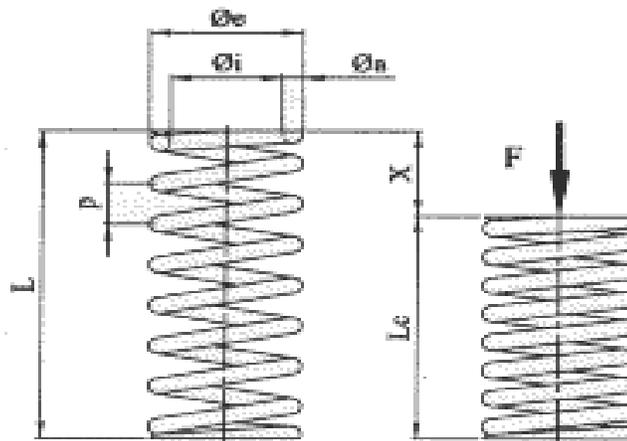


Figura 3.3. Esquema del Resorte

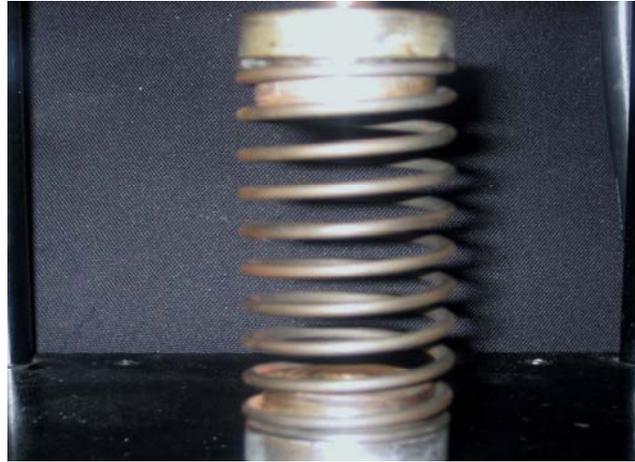


Figura 3.4. Fotografía del Resorte

3.2. Procedimiento para la Medición de la Fuerza

Para realizar la medición de la fuerza es necesario desarmar la máquina, ya que se amerita retirar el portaprobeta y sustituirlo por la pieza de aluminio que se fabricó, y ésta a su vez irá conectada con la celda de carga.

Por la antigüedad de ambos aparatos (celda de carga y lector de la celda de carga), no existía un manual que describiese como se debía conectar la celda de carga al aparato encargado de traducir su señal en un valor medible. En las figuras 3.5 y 3.6 se muestran ambos aparatos.



Figura 3.5. Lector de la Celda de Carga.



Figura 3.6. Celda de Carga

Debido a esto, fue necesario realizar algunas pruebas que permitiesen comprobar cual era la señal de salida que transmitía cada cable y de esta manera poder identificar de que forma se conectarían a la celda de carga de lectura. Para ello se busco la ayuda del Prof. Napoleón Malpica y el Prof. Pedro Pinto, en el Laboratorio de Potencia de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Central de Venezuela. Utilizando un multímetro se midió la resistencia individual de cada cable de la celda de carga, luego se realizaron varias combinaciones entre los cables y se fueron midiendo dichas resistencias, hasta que se encontró la correcta y se descifró la manera como se deben colocar los cables y de esta forma permitir que la celda envíe la señal correcta al lector de la celda de carga.

La manera de hacer la conexión se muestra en la figura 3.7 donde los círculos con las letras representan los puertos de la celda de carga de lectura y los colores concuerdan con los de los cables salida de la celda de carga.

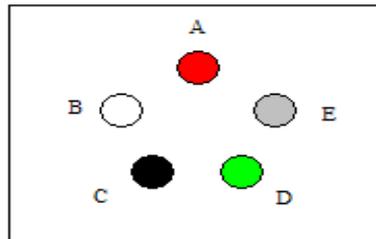


Figura 3.7. Conexión de la celda de carga con el lector de la celda de carga.

Antes de medir la fuerza se debía calibrar la celda de carga que es simplemente el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que debería indicar de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido. Se indica los resultados como el error del instrumento: valor indicado- valor de referencia.

Para realizar la calibración se utilizaron pesas de diferentes valores y un peso debidamente calibrado. Las pruebas se realizaron y repitieron cuatro veces, ciertos se hicieron cargando y descargando la celda, para conseguir resultados, se encontró que el error promedio de la lectura era de 0,36 aunque este valor es superior al esperado, los resultados ofrecieron una idea de la fuerza que ejerce la máquina, estos se muestran en la siguiente tabla.

Separación del portaprobeta (mm)	Fuerza (N)		
	Mínima	Media	Máxima
46,2	2,86	53,64	110,13
48,2	7,76	53,20	114,17
50	10,40	55,42	121,25
52	13,37	57,47	128,32

Tabla 3.1. Medidas de las Cargas

Debido al error encontrado se consiguió otro método para realizar la medida de la fuerza y así comparar los resultados. Este método consistió en caracterizar el resorte y calcular su constante elástica, la cual obtuvo un valor de 2706,6 N/m, luego de esto se midió el desplazamiento del resorte en las diferentes posiciones, y utilizando la fórmula (3.1), se encontró la fuerza que ejerce el resorte. A esto se le sumó el peso del portaindentador cuyo valor es de 1,96 N. Los resultados de este método se muestran mas adelante luego de haber decidido cuales eran las alturas a las que se ubicaría el portaprobeta.

$$F = K * X \quad [3.1]$$

Donde, K es la constante de rigidez y X el desplazamiento.

3.3. Ensayos Preliminares

Para realizar el ensayo preliminar se utilizó Aluminio 6063, aleación de aluminio con bajo contenido de manganeso. Es utilizado comúnmente en perfiles de carpintería metálica, puertas, ventanas, carcasas para motores eléctricos, elementos

especiales para maquinaria, tubos de riego, instalaciones neumáticas y en general para aplicaciones industriales donde la resistencia mecánica requerida sea moderada.

La primera actividad realizada para llevar a cabo los ensayos preliminares, fue la preparación de las probetas las cuales se pulieron utilizando lijas con un tamaño de grano de 80, 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200 y alúmina de 0,3 micras, luego se procedió a realizar el ensayo de indentación dinámica a las probetas, ajustando la maquina a una frecuencia de 9,17 Hz con una duración aproximada 60 hora lo que implica $1,98 \cdot 10^6$ ciclos.

Ya completado el ensayo en cada una de las probetas, fueron observadas las huellas dejadas por el indentador a través del microscopio.

Una vez finalizados estos ensayos se llegó a la conclusión que la máquina no se encuentra en condiciones óptimas de funcionamiento, ya que en las huellas no se observaron grietas. Esto es debido a que este material es muy dúctil y requiere cargas mucho más grandes para poder obtener alguna grieta, y la máquina no esta en capacidad de trabajar con cargas tan elevadas. En consecuencia, se descartó el uso del Aluminio. En la figura 3.8 se presenta una foto tomada en una de las probetas.



Figura 3.8. Huella dejada por el indentador en la probeta de Aluminio 6063

La siguiente prueba que se realizó fue con el Acero AISI 4140 bonificado (templado y revenido). Muy resistente a la torsión; buena resistencia al desgaste y al impacto. Este acero tiene amplia aplicación en la construcción de engranajes y motores, también se utiliza para fabricar piezas de maquinarias y repuestos, tales como árboles de transmisión, brazos de ejes, ejes de bomba, ejes de cardán, cigüeñales, pernos y tuercas, entre otras aplicaciones.

Posteriormente se procedió a estudiar el material con distintos tratamientos térmicos, a saber: temple en agua y temple en aceite, para así obtener distintas condiciones de dureza. El tratamiento térmico en el material es uno de los pasos fundamentales para que pueda alcanzar las propiedades mecánicas para las cuales está creado. La clave de los tratamientos térmicos consiste en las reacciones que se producen en el material y ocurren durante el proceso de calentamiento y enfriamiento de las piezas, con unas pautas o tiempo establecido. En este caso se tomó en cuenta las siguientes especificaciones para tratamiento térmico:

- Forjar: 1050 – 850 °C. Enfriamiento lento en el horno.
- Normalizar: 840 – 880 °C.
- Temple, enfriamiento en agua: 820 – 850 °C.
- Temple, enfriamiento en aceite: 830 – 860 °C.
- Revenido: según necesidad.
- Nituración: 550 °C.
- Recocer en blando: 680 – 720 °C.

Una vez realizado el temple, se pulieron las probetas utilizando lijas con un tamaño de grano de 80, 180, 220, 360, 400, 500, 600, 1200 y alúmina de 0,3 micras, hasta que se obtuvo una superficie especular y se comenzó a ensayar, con una frecuencia de 9,17 Hz y se dejó funcionando. A medida que las horas transcurrían la máquina fue presentando una serie de inconvenientes, el ensayo se detuvo porque el

motor de la máquina se recalentó, el acoplamiento entre el eje del motor y el eje que esta ajustado a la leva se aisló y el resorte utilizado fallo por fatiga.



Figura 3.9. Fotografía del Resorte Fracturado



Figura 3.10. Indentador Vickers (deteriorado)

Debido a estas adversidades no se pudo seguir utilizando el material destinado para el ensayo ya que requería demasiadas horas y la máquina no se

encontraba en capacidad de hacerlo, ésta probeta esta se pudo ensayar unas 62 horas aproximadamente y no se encontraron grietas.

Debido a esto se puede decir que la máquina amerita un acondicionamiento especial que permita mejorar su eficiencia para poder alcanzar con éxito los objetivos planteados en esta investigación. A sabiendas que la máquina no puede operar por largos períodos y que los esfuerzos aplicados no pueden ser elevados, se decidió utilizar materiales menos dúctiles para los ensayos tales como el vidrio comercial y el plexiglass.

3.4. Arreglo a la Máquina de Indentación Dinámica

Lo primero que se hizo fue ajustar el acople entre el eje del motor y el eje del disco de la máquina, haciendo tres perforaciones en la pieza que los une. Esto se realizó utilizando un taladro y haciendo una rosca interna con un macho, una vez lista la rosca se ajustaron los tornillos allen, penetrando la pieza hasta los ejes. Esto fue suficiente para obtener un buen ajuste entre las piezas antes mencionadas.

Además se mandó a fabricar dos resortes con las mismas características del descrito anteriormente. También se hizo el cambio de indentadores de uno Vickers por otro Rockwell C, debido a que la punta de este se encontraba deteriorada. La selección del penetrador Rockwell C fue por ser el único disponible en el mercado.

3.5. Ensayos de Indentación Dinámica

3.5.1. Materiales

En ingeniería, las propiedades mecánicas de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otro, desde el

punto de vista del comportamiento mecánico de los materiales, también hay que tener en cuenta el comportamiento que puede tener un material en los diferentes procesos de mecanizado. El material que se destinó para realizar los ensayos, fue vidrio comercial y plexiglass.

El vidrio es un material duro pero frágil, es decir, no son fácilmente rayados por una punta de acero pero no resisten cargas de impacto.

Sus características mecánicas son importantes de mencionar:

- Densidad: $2,49 \text{ g/cm}^3$
- Módulo de elasticidad: 71.9 kPa.
- Resistencia a la tracción: 90000 kPa. [50].

Las aplicaciones de este material son abundantes y dependen del compuesto del vidrio, por ejemplo es utilizado para, ventanales, puertas, lentes para cámaras fotográficas, también para la elaboración de utensilios de cocina para el horno y de material de laboratorio, vidrio blindado para seguridad, entre otras. [11].

El Polimetilo Metacrilato o mejor conocido por su nombre comercial Plexiglass o Perpex es un material que presenta ciertas características resaltantes como, gran transparencia, acabado brillante, rigidez elevada, resistencia a la intemperie, dureza elevada, superficie apta para pulir, apto para contacto con alimentos y resistente a disolventes polares.

Entre las características mecánicas del material destacan:

- Esfuerzo en punto de fluencia: 65 MPa.
- Alargamiento a la rotura: 3 – 10 %.
- Módulo de elasticidad a la tensión: 3000 MPa.
- Resistencia al impacto: 18 kJ/m^2 .

Las aplicaciones de este material, abarca desde acristalamientos altamente transparentes y extremadamente resistentes a la intemperie para invernaderos y la construcción privada hasta edificios industriales, pasando por rótulos luminosos omnipresentes, bañeras y platos de duchas de diseño moderno, cubiertas para camas bronceadoras, pantallas acústicas protectoras, acristalamiento de acuarios de grandes dimensiones, complejas piezas técnicas, así como atractivos muebles y encimeras de fácil limpieza y resistentes al rayado, es un material muy versátil. [12 y 13].

3.5.2. Preparación de las probetas

Tanto con el vidrio como con el plexiglass, se utilizaron las mismas dimensiones para realizar las probetas. En el caso del vidrio solo se realizó el corte del espécimen a la medida predeterminada y se lijaron un poco por los bordes para eliminar algún filo existente.

En el plexiglass se cortaron las probetas dimensionadas y el material fue pulido previamente a la realización de los ensayos de indentación, a fin de obtener una superficie brillante, para esto se utilizaron lijas con un tamaño de grano de 1200 y 1500. Luego se utilizó alúmina de 0,3 micras para así terminar con la preparación de las probetas.

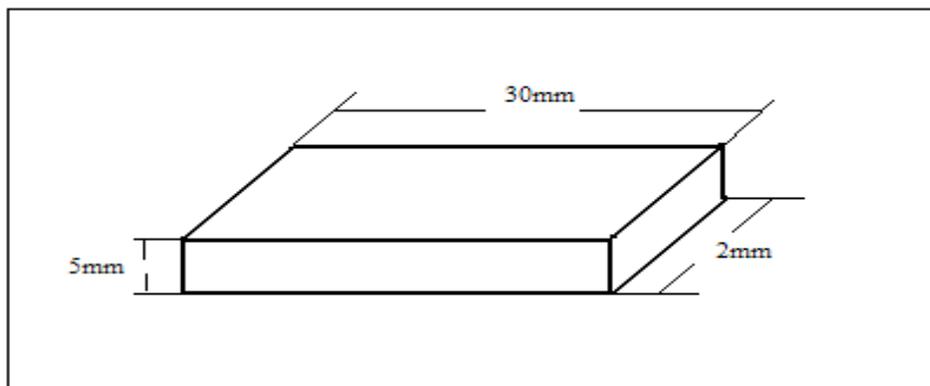


Figura 3.11. Plano de la Probeta

3.5.3. Montaje y Ensayos

La preparación de la máquina para comenzar los ensayos consiste en ajustar la fuerza, esta varía ajustando el portaprobetas a una altura determinada, y cambiando el radio de la biela en el disco (leva). En estos ensayos se colocó la biela en la apertura mas cercana al centro del disco, y se posicionó el portaprobetas en tres alturas 46,2 mm, 50 mm y 56,8 mm medidas desde la placa base del sistema general, obteniendo así los siguientes valores de fuerza.

	Separación del portaprobeta (mm)	Fuerza (N)		
		Mínima	Media	Máxima
Carga 1	46,2	1,96	36,06	72,6
Carga 2	50	16,85	38,5	89,92
Carga 3	56,8	26,32	40,8	104

Tabla 3.2. Fuerza Aplicada

Para efectos de este trabajo la fuerza media de 36,06 N será llamada Carga 1, la de 38,50 N Carga 2 y la de 40,80 N Carga 3.

En el variador de frecuencia se ajustan los valores de las siguientes funciones, con el valor de los parámetros:

Número de parámetro	Función	Valor
1	Velocidad mínima	21.1
2	Velocidad máxima	60.0
3	Velocidad de aceleración	12.1
4	Velocidad de deceleración	6.9
5	Referencia de velocidad	Pad
6	Intensidad nominal del motor	1.90
7	Velocidad nominal del motor	975
8	Tensión nominal del motor	150
9	Factor de potencia del motor	0.85

Tabla 3.3. Valores de los Parámetros

Ajustados todos los parámetros, la frecuencia que fue medida a través de un circuito de 9 voltios conectado a un osciloscopio, se mantiene durante todos los ensayos en un valor promedio de 10,54 Hz para esta investigación. Luego se coloca la probeta en su lugar y utilizando un cronómetro se toma el tiempo desde el momento en el cual se enciende la máquina.

Ensayos con Vidrio:

Para obtener una idea inicial del comportamiento del vidrio sometido a indentación dinámica se realizaron los ensayos a las tres cargas anteriormente nombradas, utilizando una probeta por cada tiempo, a un ciclo, 5, 10, 20, 30, 40 y 50 minutos. También se colocó una probeta que se dejó por 9 horas, que implica un número de $3,41 \cdot 10^5$ ciclos, a la carga 3 para obtener una idea del comportamiento del material a un tiempo prolongado. Luego a cada probeta se le colocó líquido

penetrante para poder observar así las grietas con mayor facilidad. Por medio del microscopio óptico ubicado en el Laboratorio de Lubricación y Desgaste de la Escuela de Ingeniería Mecánica y el programa PixeLink se procedió a tomar fotos de las huellas dejadas en cada una de las probetas. Luego de analizar las fotos y observar que era factible el estudio, ya que se logran obtener grietas y se puede estudiar el avance de la falla, se procedió a buscar una metodología para estudiar el comportamiento de la huella y su seguimiento a lo largo de un tiempo determinado.

Debido al hecho que el estudio requería observar el comportamiento y el avance de la falla, la probeta y la huella en observación debía ser la misma, y en la máquina de indentación la probeta no puede ser retirada de su lugar durante el ensayo, ya que se pierde la exactitud de la posición entre la huella y el indentador, razones por las que se hizo necesario buscar un método para medir el diámetro de la indentación a medida que transcurría el tiempo en la que no se retirara la probeta de la máquina. En la búsqueda de la solución a este problema se decidió utilizar replicas para cumplir con ese propósito.

Para hacer las replicas se utilizaron láminas de acetato de 0,3 mm de espesor, cortadas a un tamaño de 10 x10 mm, las cuales se colocan sobre la huella previamente humedecida con acetona, cuya acción hace que la lámina se disuelva y al secarse luego de 3 a 4 minutos aproximadamente, quede en ella grabada todos los detalles de la superficie.

Observando los resultados de los ensayos de prueba con el vidrio y estudiando el comportamiento del material ante la indentación, se definió como parámetro de falla cuando el área de la zona afectada alcanza el valor de 1 mm² por motivos que serán explicados con detalle en el análisis de resultados. Debido a esto, los tiempos de los ensayos se establecieron en 1 ciclo, 5, 10, 20 min y de aquí cada 10 minutos hasta llegar al valor del área definido. En cada uno de estos tiempos se tomaron 2 replicas, y posteriormente fueron observadas en el microscopio y se tomaron las fotos respectivas.

El diámetro de las huellas se midió utilizando el programa SigmaScan Pro 5 por medio de las fotos. Para obtener un valor real de referencia se colocó una rejilla milimetrada en el microscopio y se le tomaron fotos con todos los lentes de aumento, que luego fueron medidas con el software y sirvió como escala para transformar los pixeles a milímetros.

En las fotos se determinaron los dos diámetros mas grandes y se definieron como horizontal y vertical, se les hizo seguimiento a cada uno de estos diámetros a través de todo el tiempo del estudio, y se eligió el que mayor crecimiento mostró, ya que para esta investigación era importante tener el diámetro de la circunferencia que abarcara toda el área afectada.

Los datos de la gráfica área vs número de ciclos se obtuvieron de la siguiente manera: con los diámetros de las huellas, se procedió a sacar el área de la circunferencia [3.2]. Luego se obtuvo el aproximado del número de ciclos multiplicando la frecuencia promedio de 10,54 hertz por el tiempo en segundos.

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad [3.2]$$

$$\text{Número de ciclo} = f \cdot t \quad [3.3]$$

Para las gráficas de esfuerzo vs número de ciclos, el esfuerzo se calculó dividiendo la fuerza media de las tres cargas entre el área efectiva [3.4]. El diámetro que se tomó para calcular esta área efectiva, fue el diámetro de la huella producida a la carga 3, de 40,80 N, transcurrido un ciclo. Se tomó esta ya que es la fuerza mayor a la que esta sometida la probeta, y el indentador deja una mejor impresión, además se escogió un ciclo ya que es el tiempo en el que se puede asegurar que la huella no se había descascarado.

$$s = \frac{F}{A} \quad [3.4]$$

Ensayos con Plexiglass.

En el estudio del comportamiento del plexiglass, se comenzó realizando el mismo procedimiento que se hizo con el vidrio, se utilizaron las mismas cargas, y se mantuvo los parámetros de la máquina a los mismos valores que los ensayos del vidrio y por lo tanto la frecuencia promedio también permaneció igual.

Se realizó un primer ensayo de prueba a la carga 2, y se fueron haciendo las respectivas replicas, pero una vez observadas estas en el microscopio se pudo percibir que la acetona daña la pieza ya que desquebraja su superficie, debido a esto no se pudo utilizar dicho método.

En este caso el diámetro de la huella dejada por el indentador esta bien demarcada y se puede desmontar el ensayo; de esta forma se pueden tomar las fotos necesarias para el estudio y luego se puede volver a calzar el indentador y la huella en el mismo lugar, para seguir indentando.

Luego de definir la metodología se procedió a montar los ensayos, esta vez se tomaron fotos de la huella a 1 ciclo, y cada 10 min hasta que en la indentación se observara una grieta con un tamaño de 0,1 mm, este fue el parámetro de falla definido ya que este tamaño podría asegurar que lo observado sea una grieta. También se colocó una probeta a la carga 3 con una duración de 1334 min que es aproximadamente igual a un número de 843.622 ciclos, para observar que sucedía con las grietas transcurrido un tiempo prolongado.

Para realizar la curva esfuerzo- número de ciclos, se utilizaron las mismas ecuaciones usadas para el vidrio y se tomó el diámetro de la huella realizada a la carga 3 transcurrido un ciclo para calcular el área efectiva y de esta forma estimar los esfuerzos.

4. ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Comportamiento del Vidrio Bajo Indentación Dinámica.

En los ensayos de prueba del vidrio a indentación dinámica, se observó que para las tres cargas destinadas a estudio, al transcurrir sólo un ciclo en la probeta, se formaban diversas grietas radiales. La aparición de grietas en el primer ciclo nos indica que se trabajó a cargas por encima de la carga crítica, sin embargo se continuó el estudio ya que se tornó interesante estudiar el comportamiento del vidrio bajo estas condiciones.

En la figura 4.1 se pueden detallar las huellas dejadas por la indentación:



Figura 4.1. Huella dejada en la probeta a 1 ciclo, carga 1, 2, 3.

En las probetas sometidas a indentación dinámica por 5 minutos, equivalente a 3.162 ciclos, se pudo observar que para la carga 1 y 2 no aparecían grietas, en cambio en la probeta sometida a la carga 3 tiene una grieta que parece ser profunda y una amplia zona de daño. Se muestran las fotos en la figura 4.2.



Figura 4.2. Huella dejada en la probeta a los 3.162 ciclos, carga 1, 2, 3.

En la figura 4.3 se muestra la probeta que estuvo bajo la carga 3 durante 10 minutos, es decir igual a un número de 6.324 ciclos, en ella se ve como dos grietas se encuentran y hacen que el material se descascare.



Figura 4.3. Huella dejada en la probeta a los 6.324 ciclos, carga 3.

Durante todo el tiempo del ensayo para las tres cargas se observó como aparecían grietas en algunas probetas y luego para otras en las que se esperaba

encontrarlas por estar sometidas a la indentación dinámica durante un tiempo mas prolongado no se encontraban grietas, si no una huella con un área afectada mas grande y zonas descascaradas. A continuación en la figura 4.4. se muestra la gráfica del diámetro mayor del área afectada contra el número de ciclos, para las tres cargas estudiadas.

Número de ciclos	Diámetro (mm)		
	Carga 1	Carga 2	Carga 3
1	0,212	0,249	0,312
3162	0,670	0,733	0,843
6324	0,665	0,777	1,207
12648	0,621	1,050	1,120
18972	0,644	0,770	1,183
25296	0,607	1,042	1,264
31620	0,705	1,342	1,449

Tabla 4.1. Diámetro – Número de ciclos

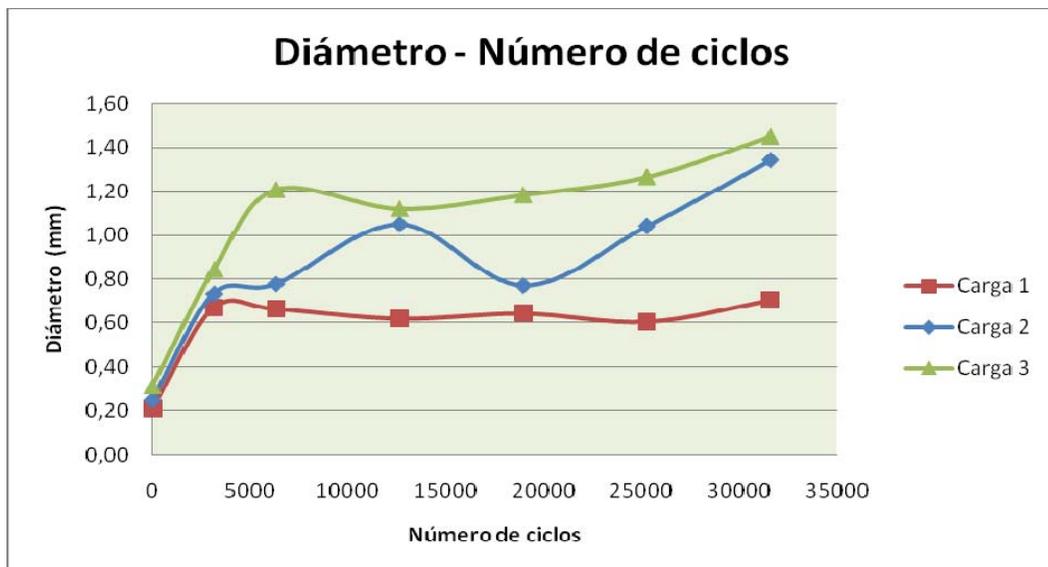


Figura 4.4. Gráfica Diámetro – Número de ciclos

De esta gráfica solo se puede inferir que el diámetro del área afectada aumenta cuando se aumenta la carga y que el diámetro tiene una cierta tendencia a aumentar a medida que transcurre un mayor número de ciclos. Estos ensayos se realizaron en diferentes probetas y no muestran el crecimiento de una sola huella, esto explica porque en la gráfica se muestra que los diámetros disminuyen en algunos puntos, por los que los resultados de estos ensayos de prueba no pueden ser concluyentes.

Debido a que estos ensayos de prueba se realizaron hasta un número de 31.620 ciclos, y se quería ver que sucedía en la probeta transcurrido un tiempo prolongado, para verificar si se podría lograr la fractura del material a ensayar, se dejó una probeta por 341.496 ciclos (9 horas) a la carga 3, en esta se observó que las grietas son mucho más profundas y el diámetro del área afectada alcanzó un valor de 1,80 mm, no mucho mayor al valor del diámetro alcanzado a los 50 minutos bajo la carga 3 que fue de 1,45 mm. Valores que en conjunto con la gráfica 4.4. parecen mostrar que el aumento del diámetro es muy rápido en los primeros ciclos y que al pasar los ciclos el aumento es mucho más lento.

Ya que el área afectada a los 341.496 ciclos era de apenas 0,42 % del área total de la probeta, se decidió definir para los ensayos el parámetro falla cuando el área de la zona afectada alcanzará un valor de 1mm^2 .



Figura 4.5. Huella dejada en la probeta a los 341.496 ciclos.

Es importante recalcar que para estos primeros ensayos las probetas se retiraban de la máquina cada vez que se cumplía el tiempo de estudio por lo que las imágenes mostradas no representan el seguimiento del crecimiento de una sola huella a través del tiempo, para poder estudiar el comportamiento de la indentación a través del tiempo y verificar los resultados anteriores, se utilizaron las replicas y los resultados de estos ensayos se muestran a continuación.

Para la carga 1 en la que se aplicó una fuerza media de 36,06 N, se midieron dos diámetros, a los cuales se le observó su crecimiento a lo largo de 150 minutos, lo que duró de este ensayo, que es igual a 94.860 ciclos, ya que a ese número de ciclos fue que el área afectada alcanzó el 1 mm². En las figuras 4.6. se puede observar que en el primer ciclo aparecen grietas en el lugar de la indentación, luego transcurridos los ciclos la huella varía su contorno con grietas que crecen y luego forman zonas descascaradas.

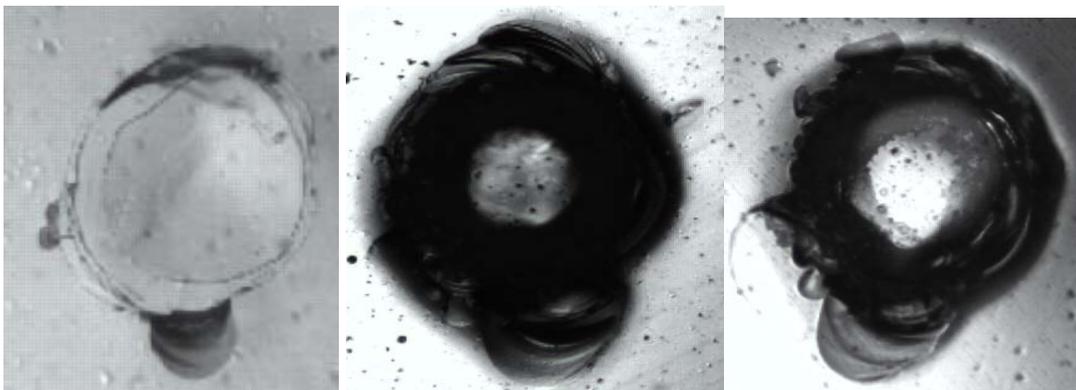


Figura 4.6. Replicas, transcurridos 1, 6.324 y 18.972 ciclos, carga 1.



Figura 4.7. Replicas transcurridos 31.620, 56.916 y 75.888 ciclos, carga 1.

En la figura 4.8. se puede observar que para la carga 1 el diámetro aumenta a medida que aumentan el número de ciclos de una manera casi constante, luego de pasados los primeros ciclos en los que se puede observar que el aumento del diámetro es casi exponencial.

Tiempo (mín)	Número de ciclos	Diámetro mayor (mm)
0	1	0,164
5	3162	0,778
10	6324	0,799
20	12648	0,809
30	18972	0,832
40	25296	0,900
50	31620	0,912
60	37944	0,923
70	44268	0,926
80	50592	0,946
90	56916	0,965
100	63240	0,982
110	69564	1,000
120	75888	1,093
130	82212	1,113
140	88536	1,125
150	94860	1,145

Tabla 4.2 Diámetros carga 1.

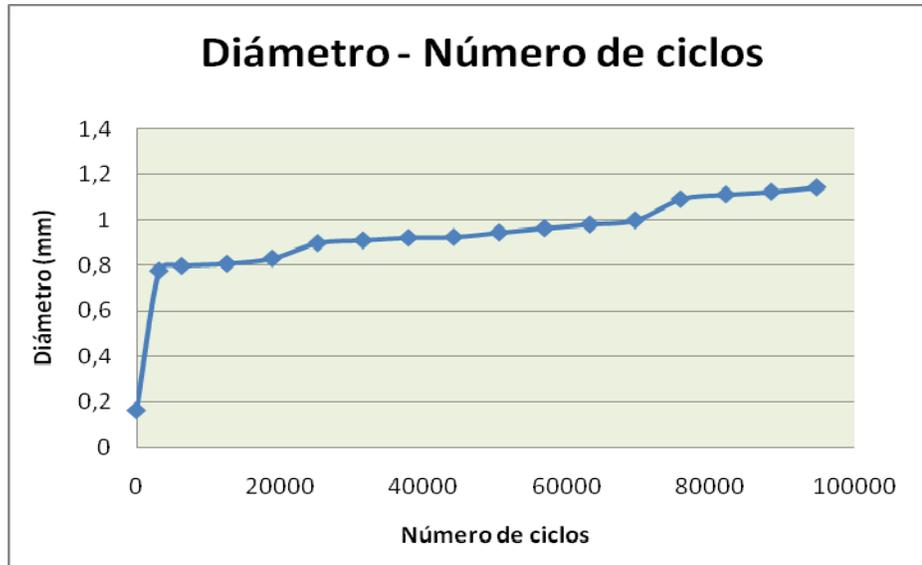


Figura 4.8. Gráfica Diámetro- Número de ciclos, carga 1.

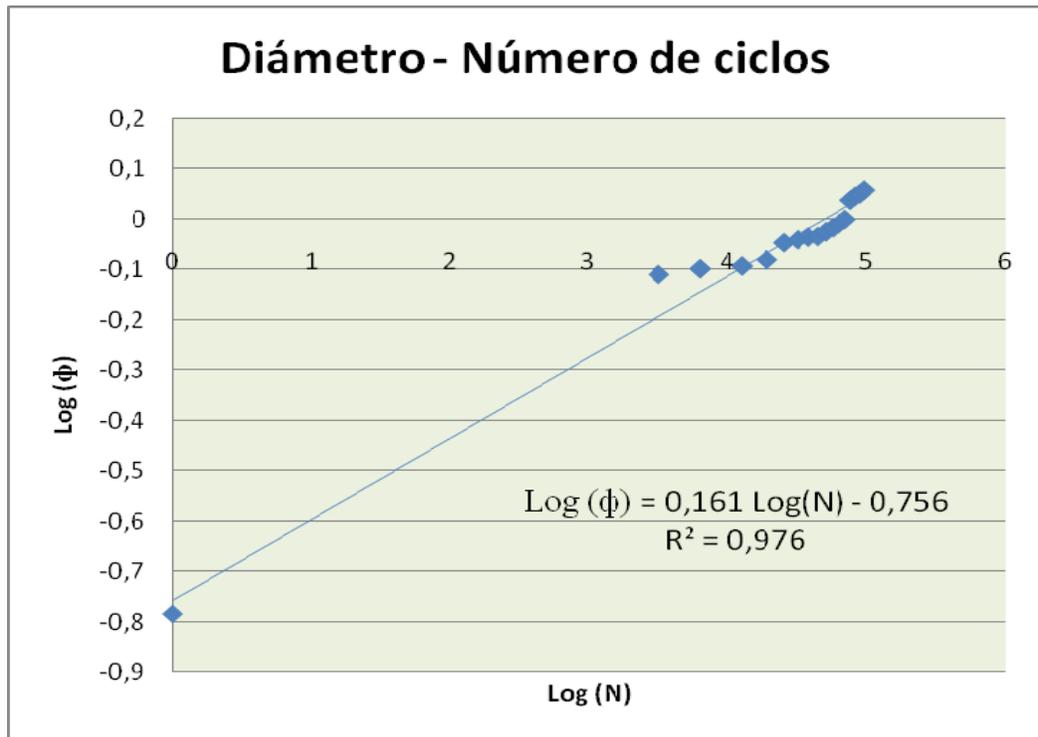


Figura 4.9. Gráfica Diámetro- Número de ciclos, carga 1.

En las replicas de las probetas bajo la carga 2 se puede observar que al primer ciclo se forman algunas grietas radiales, transcurridos unos ciclos la huella va aumentando su tamaño y cambiando su forma constantemente.



Figura 4.10. Replicas transcurridos 1, 6.324 y 12.648, ciclos carga 2.



Figura 4.11. Replicas transcurridos 25.296 y 44.268 ciclos, carga 2.

En la figura 4.11 se puede ver que el diámetro para la carga 2 aumenta su tamaño a medida que aumenta los ciclos Para observar el crecimiento del diámetro de

la huella, en esta se puede observar que el crecimiento de grieta se vuelve casi lineal, pareciera que aumentara a una razón constante.

Tiempo (min)	Número de ciclos	Diámetro mayor (mm)
0	1	0,190
5	3162	0,915
10	6324	0,947
20	12648	0,965
30	18972	0,972
40	25296	1,037
50	31620	1,040
60	37944	1,060
70	44268	1,115
80	50592	1,153
90	56916	1,201

Tabla 4.3 Diámetros carga 2.

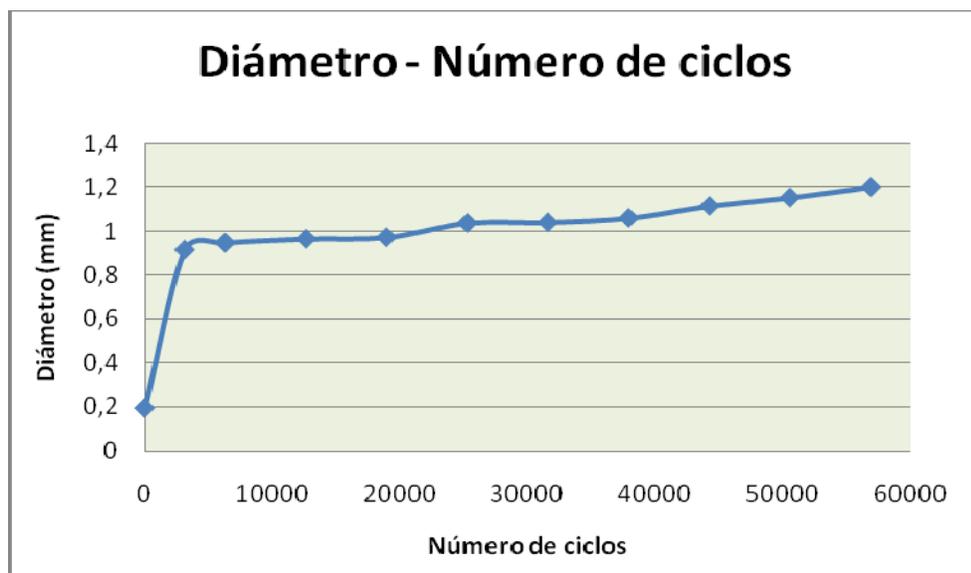


Figura 4.12. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 2.

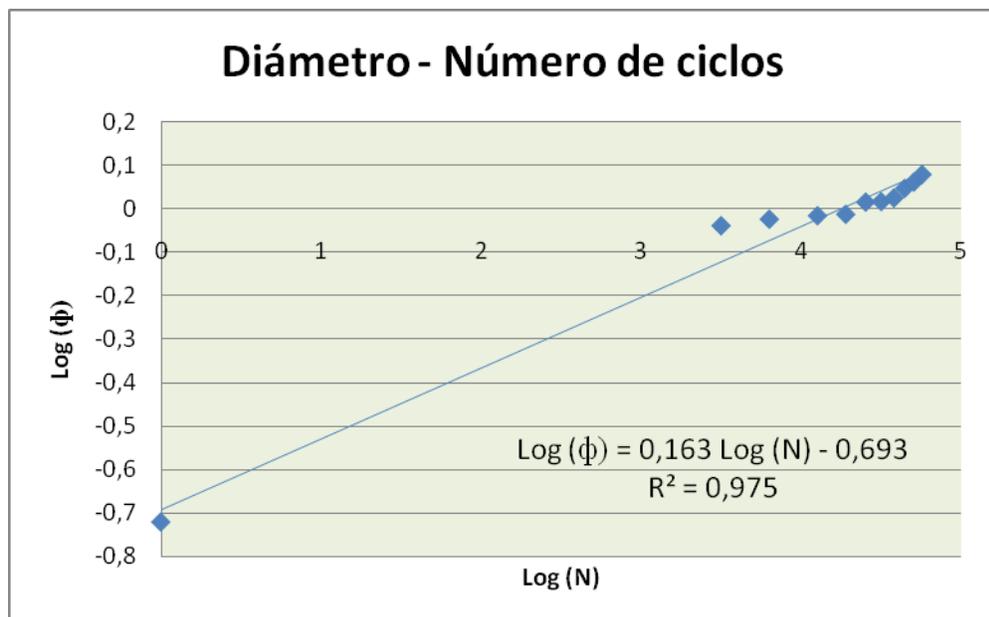


Figura 4.13. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 2.

En las probetas sometidas a la carga 3 se pueden observar grietas radiales en el primer ciclo, luego se ve como la huella aumenta su tamaño y durante su crecimiento se van desarrollando otras grietas.

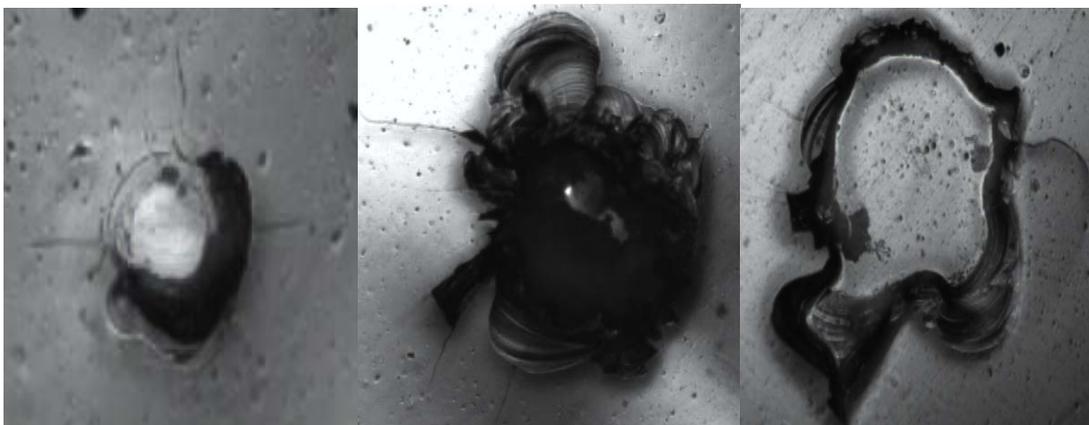


Figura 4.14. Replicas transcurridos 1, 3.162 y 12.648 ciclos, carga 3.



Figura 4.15. Replicas transcurridos los 25.296 y 31.620 ciclos, carga 3.

En la figura 4.14 se puede nuevamente verificar que el diámetro aumenta con el numero de ciclos.

Tiempo (min)	Número de ciclos	Diámetro mayor (mm)
0	1	0,393
5	3162	1,003
10	6324	1,038
20	12648	1,075
30	18972	1,205
40	25296	1,221
50	31620	1,353

Tabla 4.4 Diámetros carga 3.

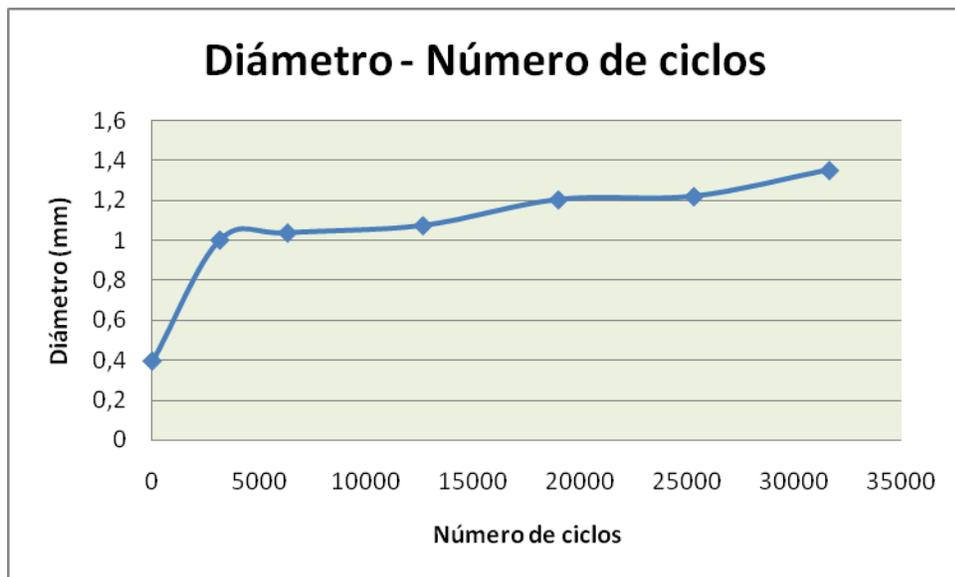


Figura 4.16. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 3.

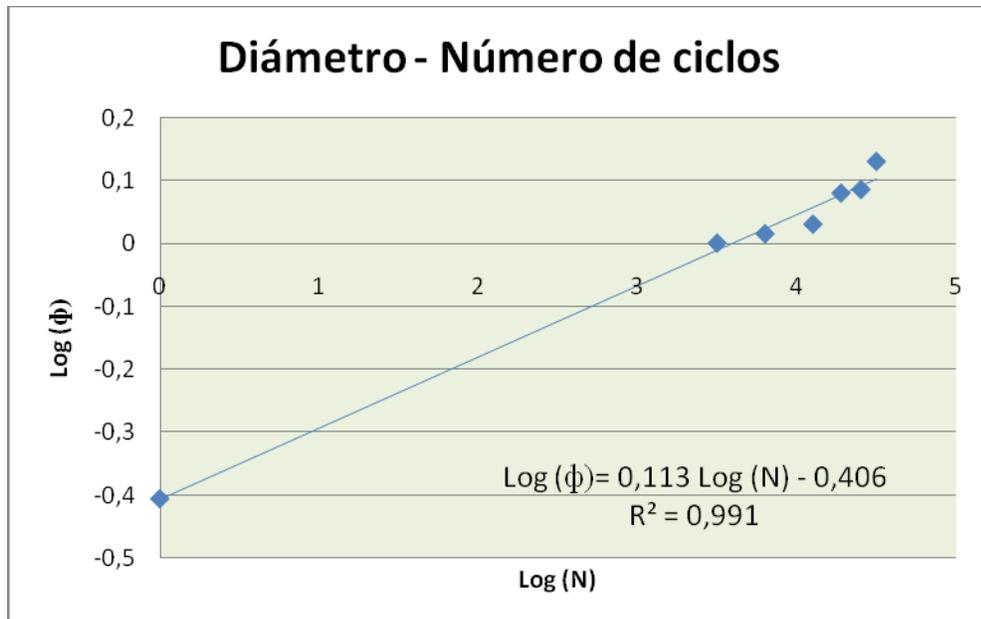


Figura 4.17. Diámetro – Número de Ciclos a la carga 3.

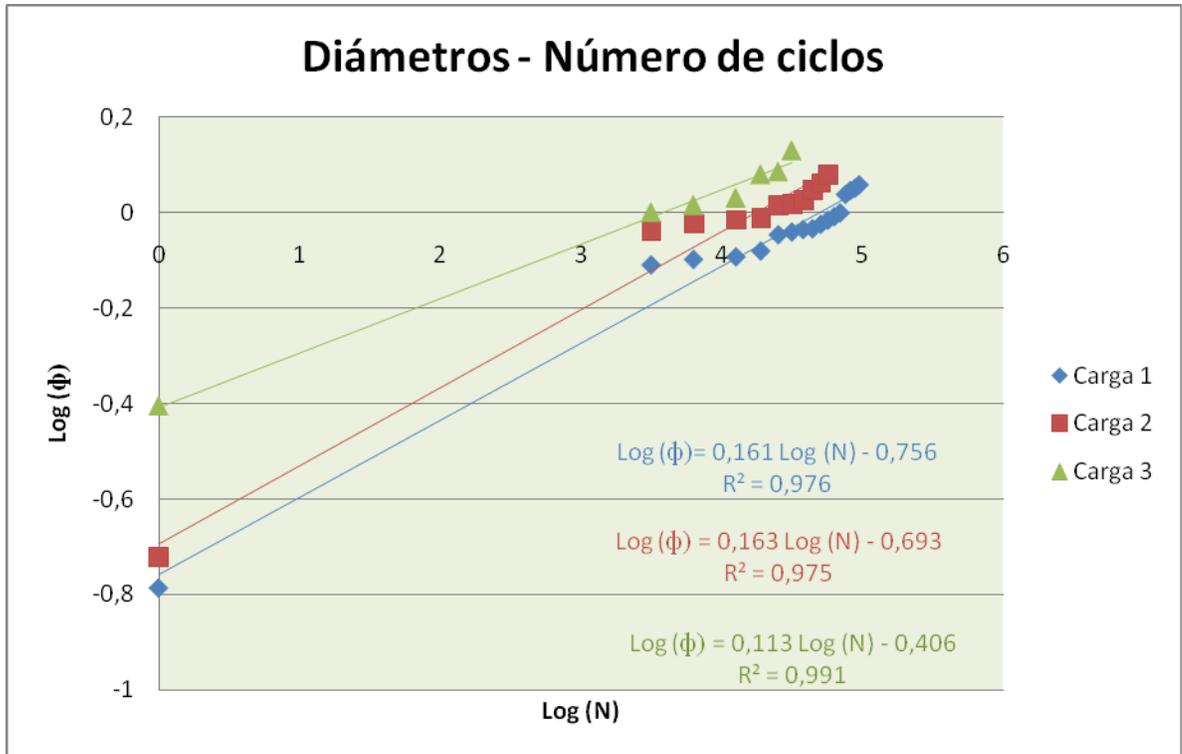


Figura 4.18. Diámetros – Número de Ciclos (Log-Log).

Debido a estos resultados, se puede inferir un comportamiento de falla del vidrio sometido a indentación dinámica. La falla parece iniciarse con la formación de grietas radiales a la huella, que al pasar los ciclos crecen y se unen con otras haciendo que el material se descascare, éste proceso hace que se pierda material y que por consiguiente la huella aumente su diámetro. Este comportamiento difiere al de falla a fatiga convencional, esto se debe a que el material es muy frágil y pierde material fácilmente.

De la figura 4.18, se aprecia que los datos tienen una tendencia lineal, para las cargas, los valores R que representan la exactitud de la tendencia son valores muy cercanos al ideal que es igual a uno.

La función potencial a la que se quiere modelar es $\phi = K N^a$ donde k es una función del esfuerzo y el material, y “a” es característica del material debido a que las

líneas de tendencia son casi paralelas entre sí, el valor de “a” se obtuvo a través del promedio de las pendientes de las ecuaciones de las rectas de tendencia de las tres cargas y dio un valor de 0,14. La función potencial queda:

$$\phi = f(\sigma, \text{material}) N^{0,14} .$$

La función de K también se modeló como potencial $K = A \sigma^n$ para obtener los valores de A y n se graficó los valores de K, obtenidos de las ordenadas de las rectas de tendencia anteriores, con el esfuerzo en Log-Log como se muestra en la Figura 4.18.1 de donde se obtuvo los valores de la función quedando esta de la siguiente forma:

$$K = 4,265 \text{ E-}23 \sigma^{8,76}$$

El modelo propuesto es :

$$\phi = 4,265 \text{ E-}23 \sigma^{8,76} N^{0,14} .$$

Esfuerzo (Mpa)	K
291,500	0,175
301,560	0,203
320,540	0,392

Tabla 4.4.1. Esfuerzo vs K

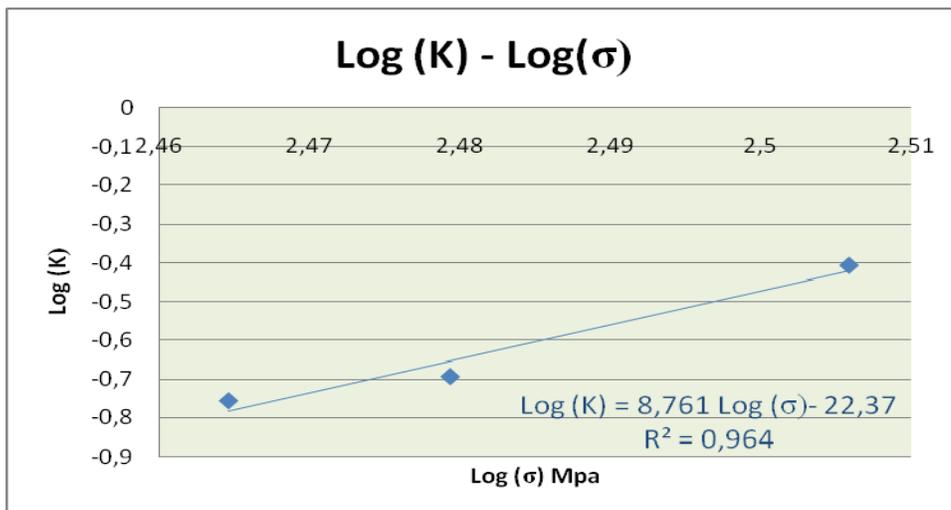


Figura 4.18.1. Esfuerzo vs K (Log-Log)

En la figura 4.19 se puede observar como el área va aumentando en los primeros ciclos de una manera casi exponencial desde 1 hasta 10³ ciclos aproximadamente, luego se mantiene una razón relativamente constante de aumento.

También se observa que la carga influye sobre el área de falla, ya que a cargas superiores las zonas afectadas también aumentan.

Número de Ciclos	Área (mm ²)		
	Carga 1	Carga 2	Carga 3
1,0E+00	0,021	0,028	0,121
3,2E+03	0,476	0,657	0,790
6,3E+03	0,502	0,704	0,845
1,3E+04	0,514	0,732	0,907
1,9E+04	0,544	0,743	1,140
2,5E+04	0,636	0,844	1,172
3,2E+04	0,653	0,849	1,437

Tabla 4.5. Área – Número de Ciclos.

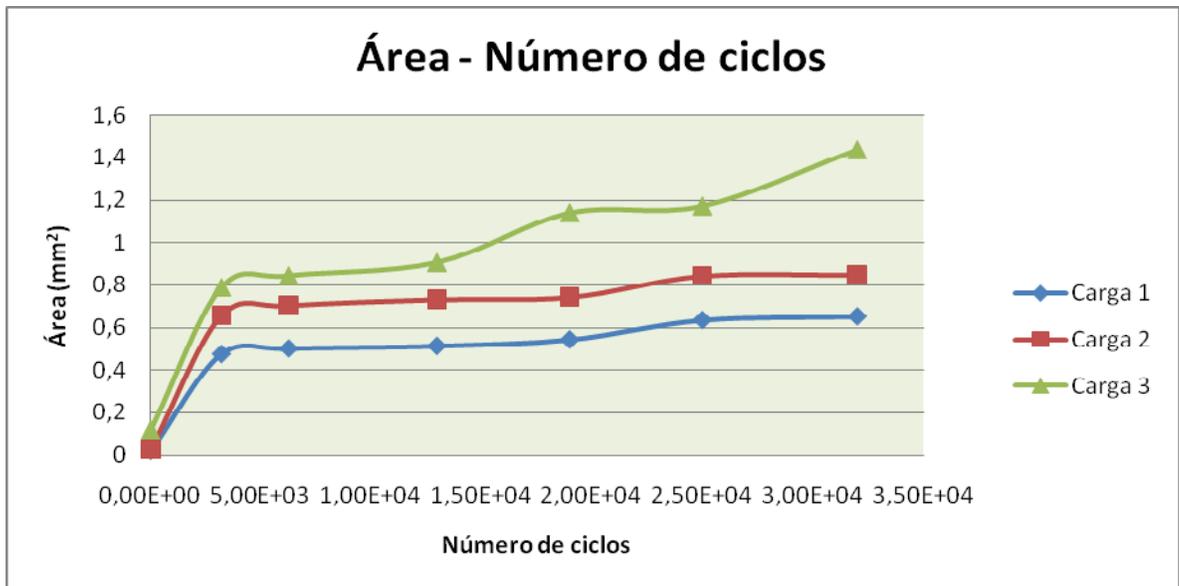


Figura 4.19 Gráfica Área –Número de ciclos.

En la figura 4.16 se puede ver la grafica esfuerzo – número de ciclos para el vidrio, en la cual se tomo como parámetro de falla cuando el área de la zona afectada alcanzó 1 mm^2 .

Número de ciclos	Esfuerzo Medio (Mpa)
1,90E+04	320,54
5,06E+04	301,56
9,49E+04	291,51

Tabla 4.6 Esfuerzo medio- número de ciclos

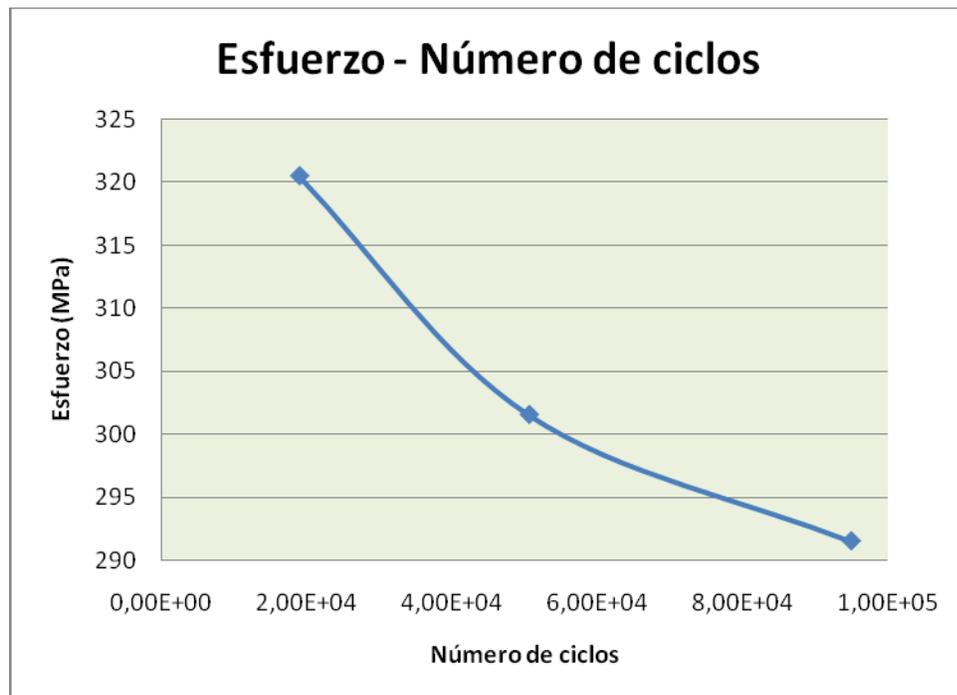


Figura 4.20 Curva Esfuerzo – Número de ciclos.

En esta curva se puede observar el comportamiento natural de este tipo de gráficas en donde a medida que se disminuye el esfuerzo el número de ciclos aumenta. Esto resultados los encontro Wöhler en sus investigaciones.

Estos resultados demuestran que utilizando la máquina de indentación dinámica se pueden obtener las curvas esfuerzo deformación.

4.2. Comportamiento del Plexiglass Bajo Cargas de Indentación Dinámica.

En los primeros ensayos de plexiglass, en los cuales se utilizaron las replicas se pudo observar que la acetona dañaba las probetas agrietándolas, y debido a que el material estaba sometido a un ataque químico en conjunto a la indentación dinámica las grietas radiales se extendían rápidamente, de modo que en los primeros 12.648 ciclos se pudo observar grietas que abarcaban toda el área de la probeta. En la figura 4.21 muestra la foto de la probeta bajo el efecto de la acetona.

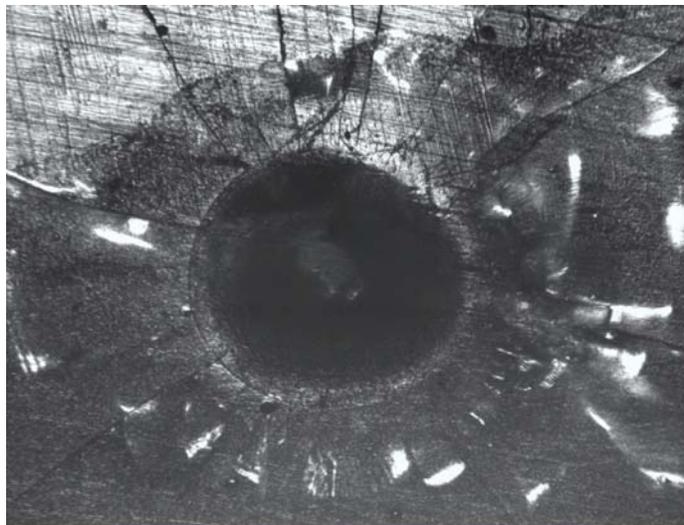


Figura 4.21. Probeta dañada por la acetona.

Para verificar que sucedía en el material sin el efecto de la acetona, se sometió una probeta a la carga 3, durante 843.622 ciclos y se fue estudiando su

comportamiento a lo largo del ensayo, se pudo observar que las grietas no aparecían hasta transcurridos unos ciclos y su crecimiento era muy lento, esta probeta de prueba estuvo sometida a la indentación por 1186 minutos y como se puede ver en la figura 4.22. solo una grieta sale de la huella y se propaga, las demás grietas no muestran un gran crecimiento.

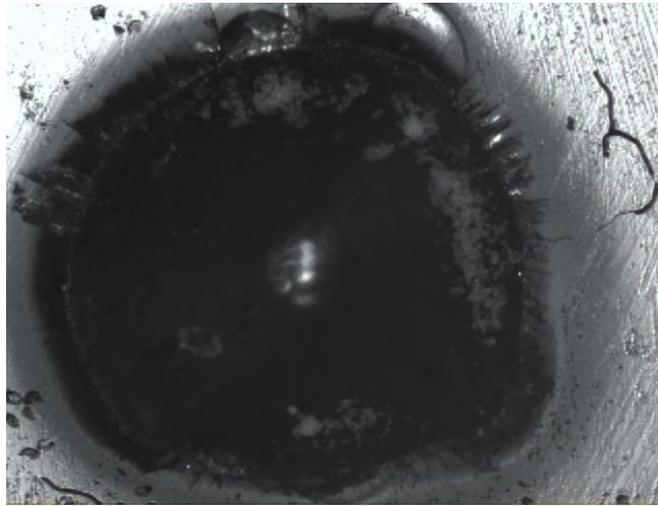


Figura 4.22. Probeta transcurrido 843.622 ciclos.

Debido a esto se decidió hacer los ensayos sin la utilización de replicas y se definió el parámetro de falla cuando el tamaño de la grieta fuese de 0,1 mm. Los resultados de estos nuevos ensayos se pueden apreciar en la figura 4.23. en las cuales se muestran las probetas transcurrido el primer ciclo en las tres cargas. En éstas no se observó grietas radiales, lo que significa que se está trabajando a cargas subcríticas.



Figura 4.23. Probetas a 1 ciclo, carga 1, 2 y 3

En la figura 4.23 se muestran las grietas de un tamaño aproximado de 0,1 mm producidas por las tres cargas estudiadas, para la carga 1 se llegó a este tamaño de grieta a los 220 minutos del ensayo, lo que es igual a 139.128 ciclos, para la carga 2 a los 134 min, es decir, 84.700 ciclos y para la carga 3 a los 50.592 ciclos (80 min).

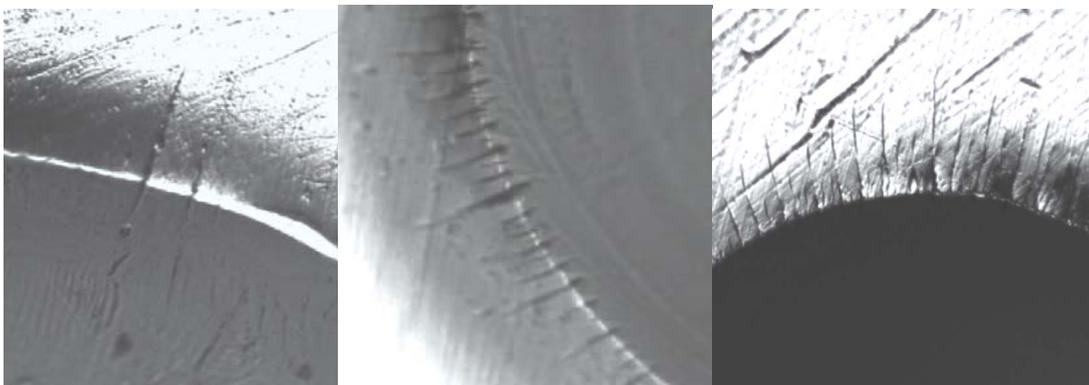


Figura 4.24. Probetas con grietas de aproximadamente 0,1 mm, carga 1, 2 y 3.

A continuación se muestran las tablas y las gráficas de los diámetros de la huella estudiados. Para la carga 1 se puede observar que el diámetro fue aumentando con el número de ciclos. De la figura 4.26. , la gráfica Log- Log , muestra que el diámetro aparentemente no puede ser una función potencial del número de ciclos, ya que la línea de tendencia muestra un R^2 de 0,938 , muy lejos de su valor ideal, uno

(1). Lo que quiere decir que hay poca exactitud y que la tendencia no es una línea recta.

Número de ciclos	Diámetro (mm)
1	0,312
18972	0,596
37944	0,643
50592	0,669
75888	0,713
113832	0,785
139128	0,889

Tabla 4.7. Diámetro – Nuúmero de ciclos, carga 1.

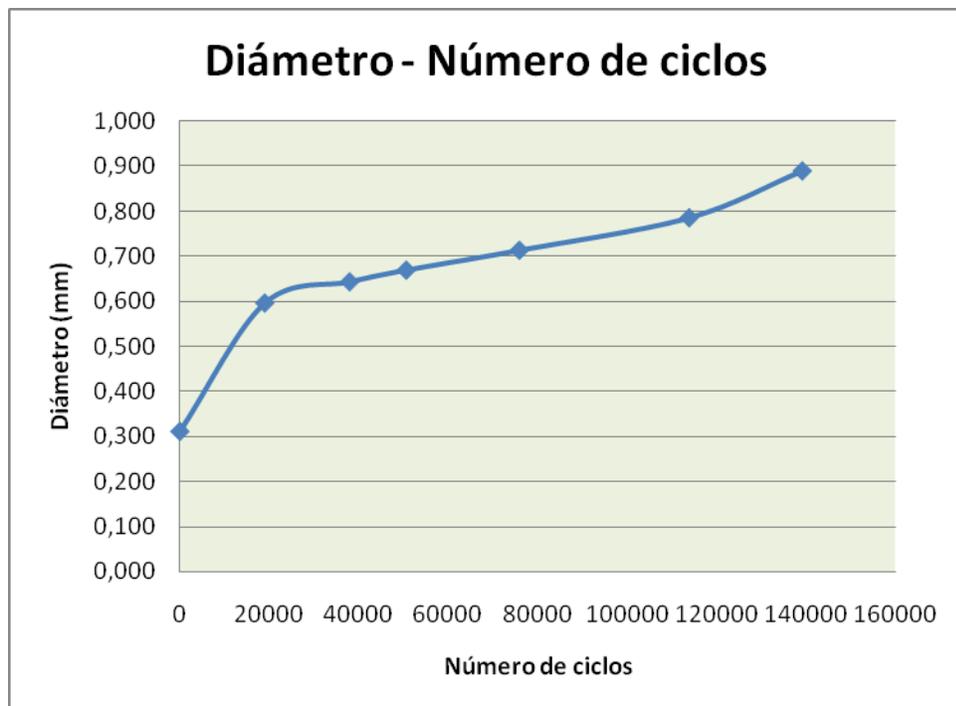


Figura 4.25. Gráfica Diámetro – Número de ciclos.

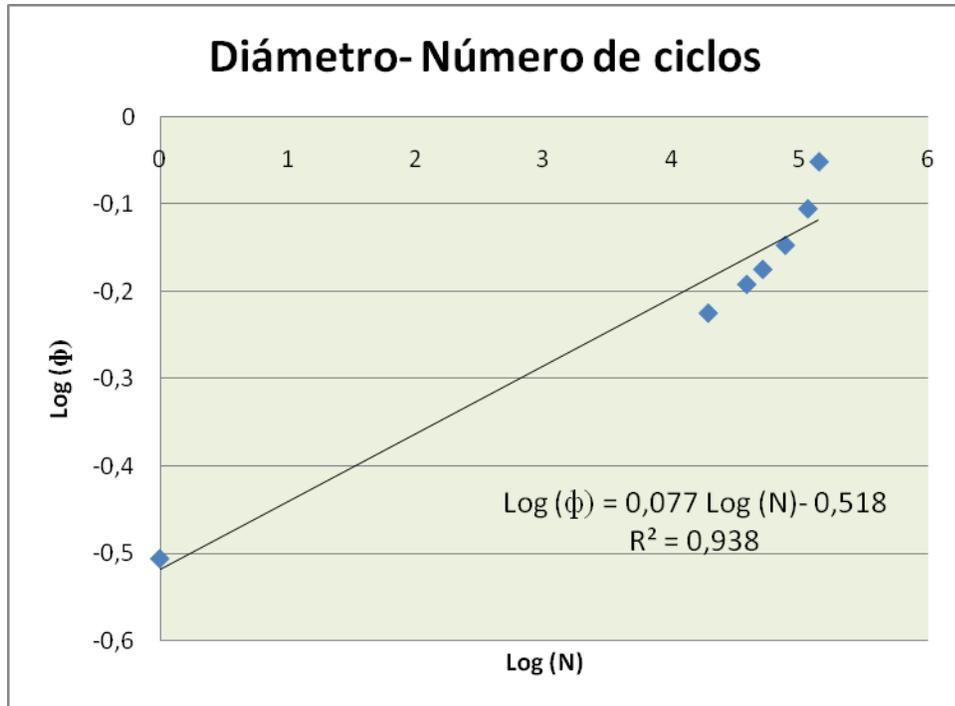


Figura 4.26. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log), carga 1.

Para la carga 2 se puede observar que el diámetro fue aumentando con el número de ciclos. De la figura 4.26. , la gráfica Log- Log , muestra que el diámetro aparentemente no puede ser una función potencial del número de ciclos, ya que la línea de tendencia muestra un R² de 0,938 Lo que quiere decir que hay poca exactitud y que la tendencia no es una línea recta.

Número de ciclos	Diámetro (mm)
1	0,626
12600	0,826
19000	0,844
25300	0,845
31600	0,863
63900	0,954
84700	1,121

Tabla 4.8. Diámetro – Número de ciclos, carga 2.

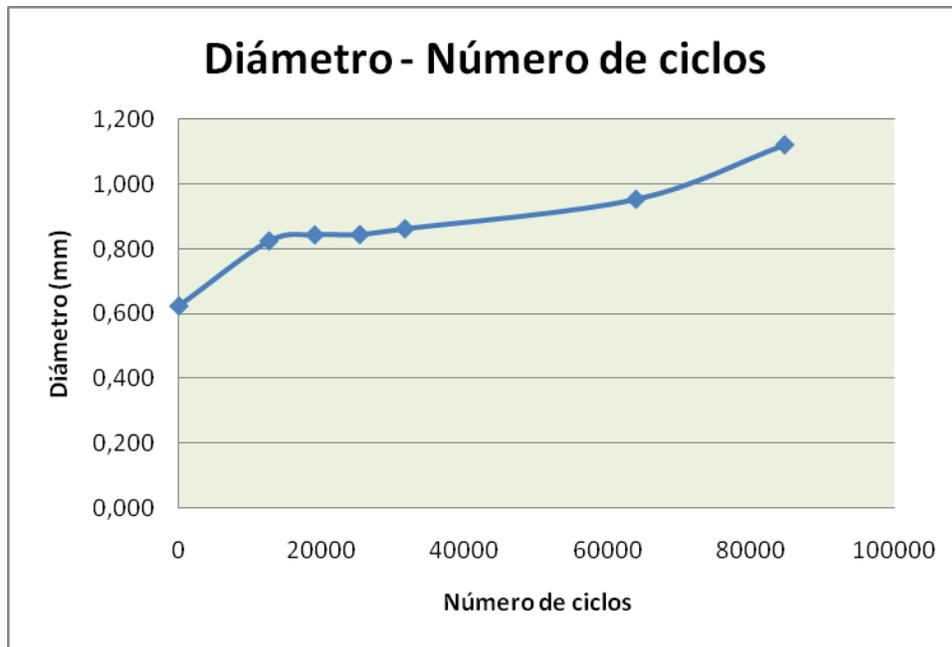


Figura 4.27. Gráfica Diámetro – Número de ciclos, carga 2.

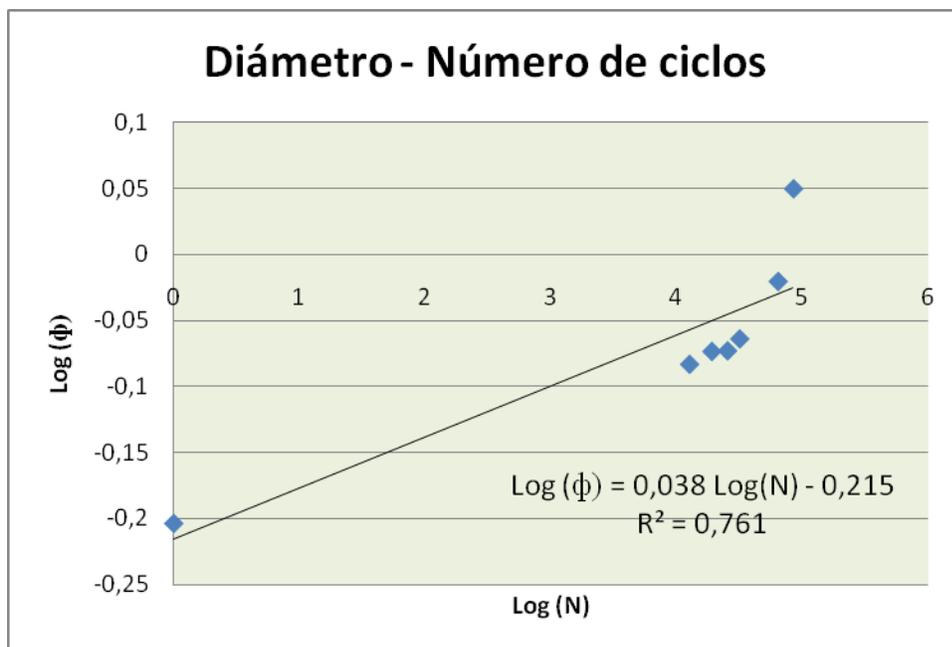


Figura 4.28. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log), carga 3.

Para la carga 3 se puede observar que el diámetro fue aumentando con el número de ciclos. En la figura 4.26., la gráfica Log- Log, muestra que el diámetro aparentemente no puede ser una función potencial del número de ciclos, ya que la línea de tendencia muestra un R^2 de 0,938, muy lejos de su valor ideal, uno (1). Lo que quiere decir que hay poca exactitud y que la tendencia no es una línea recta.

Número de ciclos	Diámetro (mm)
1	1,416
6324	1,796
12648	1,833
18972	1,854
25296	1,873
31620	1,888
50592	2,075

Tabla 4.9. Diámetro – Número de ciclos.

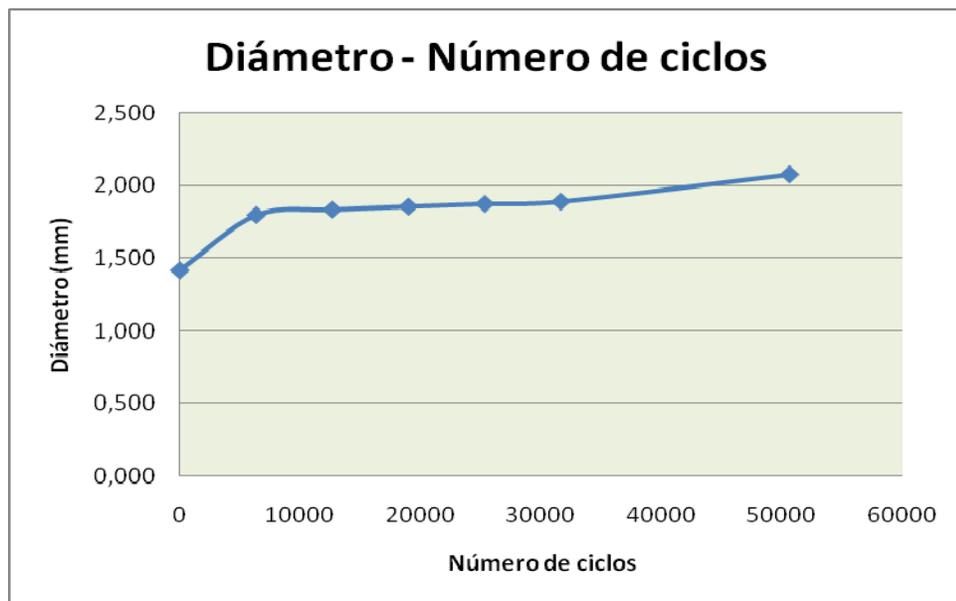


Figura 4.29. Gráfica Diámetro – Número de ciclos.

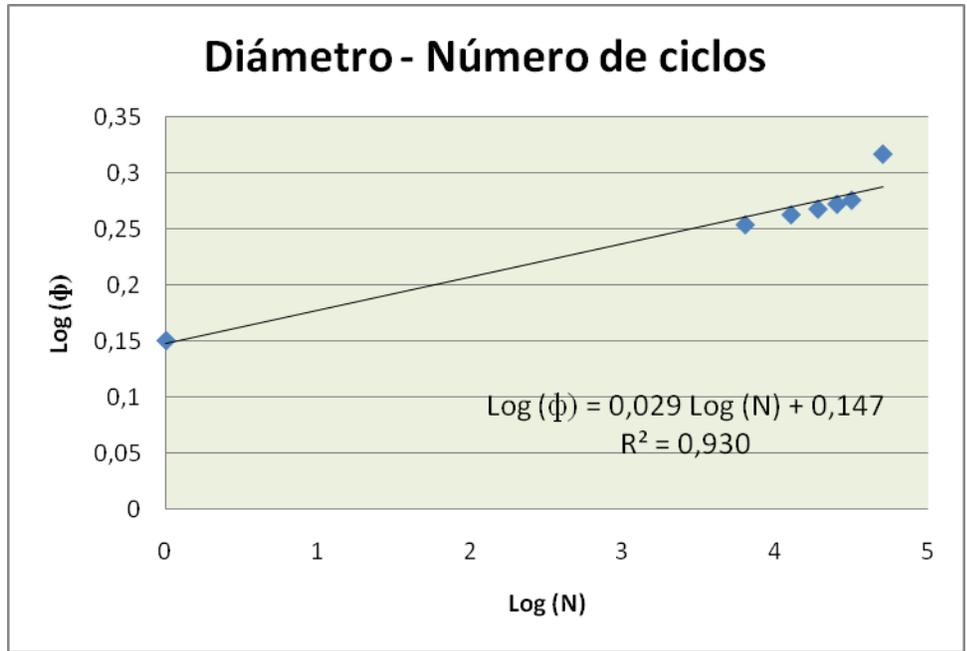


Figura 4.30. Gráfica Diámetro – Número de ciclos (Log-Log).

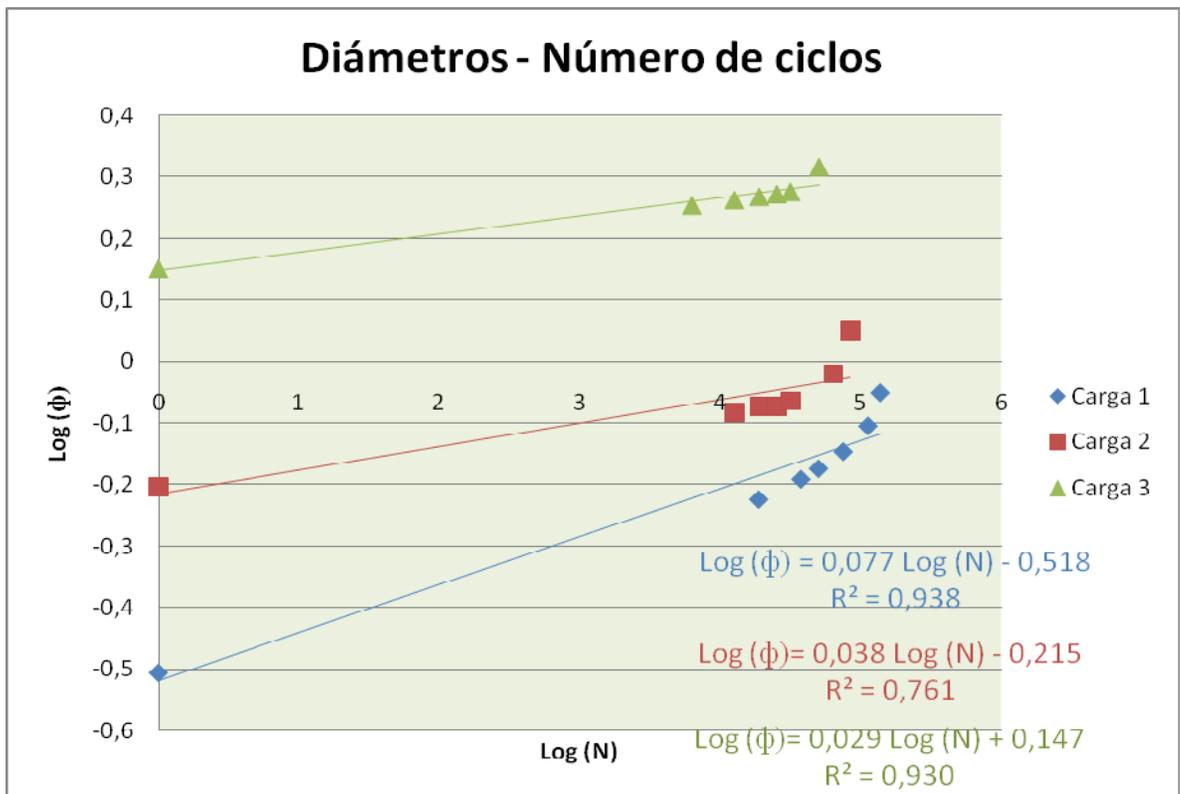


Figura 4.31. Gráfica Diámetros – Número de ciclos (Log-Log).

Debido que para todas las cargas no se logró aproximar los datos a una línea recta, no se puede modelar el diámetro como una función potencial del diámetro. Con el parámetro de falla determinado del tamaño de grieta de 0,1mm, se construyó la gráfica de esfuerzos contra números de ciclos, la cual siguió el comportamiento esperado ya que aumentó el número de ciclos a medida que se disminuye el esfuerzo. Esto se puede observar en la Figura 4.32.

Número de ciclos	Esfuerzo Medio (Mpa)
139128	116,04403
84742	123,896149
50592	131,297737

Tabla 4.3 Esfuerzo medio- número de ciclos

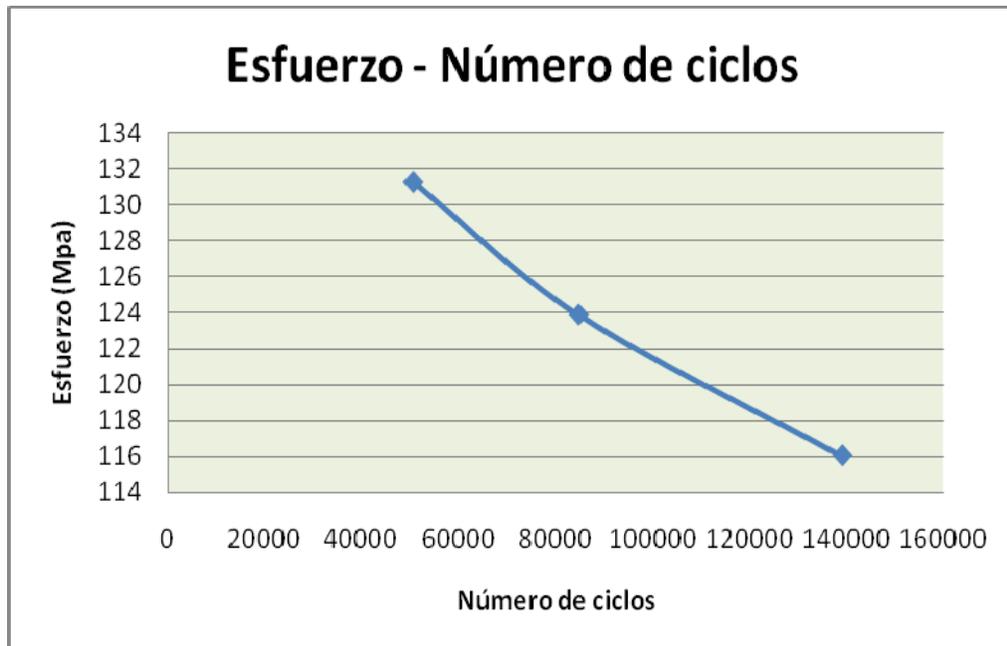


Figura 4.32 Curva Esfuerzo- Número de ciclos.

Se puede concluir que ambos materiales tanto el vidrio como el plexiglass aumentan su diámetro a medida que aumenta el número de ciclos. Estos resultados pueden ser comparados con los obtenidos en el estudio hecho por Banerjee y Kumar, en la cual demostraron que la longitud de la diagonal de la huella continuó aumentando con las repetidas indentaciones a cargas subcríticas por lo que concluyeron que el aumento de la región plástica era debido a la expansión progresiva de la impresión. Estos resultados son comparables a pesar que el vidrio, en este ensayo, estuvo sometido a cargas por encima de la crítica.

CONCLUSIONES

- Los ensayos con el vidrio se realizaron a esfuerzos por encima del esfuerzo crítico, ya que con las tres cargas aplicadas (uno, dos y tres), y sólo realizando un ciclo, se obtuvieron algunas grietas radiales.
- Se estudió el comportamiento del vidrio bajo cargas cíclicas, se iban observando las grietas, pero estas a su vez desaparecían, ya que en algunos casos las grietas llegaban a unirse y el material se descascaraba y de esta forma se perdía parte del material, lo que influye en el crecimiento del área afectada por la falla.
- En el vidrio se observó que el diámetro de la huella aumenta proporcionalmente al número de ciclos aplicados por ensayo.
- La curva esfuerzo - número de ciclos por indentación dinámica, presenta el comportamiento característico de las curvas wöhler.
- Se estudió el comportamiento del plexiglass por indentación dinámica, a tres esfuerzos aplicados (uno, dos y tres), éstos se encuentran por debajo del esfuerzo crítico. Se observaron huellas radiales a lo largo del ensayo, el diámetro de la huella permanece casi constante, es decir, su aumento es poco significativo. Se pudo observar que este material presenta una conducta muy similar a otros materiales trabajados a fatiga.
- La curva esfuerzo – número de ciclos por indentación dinámica se pudo estimar y observar que presenta el mismo comportamiento de una curva de fatiga realizada por otros ensayos.

RECOMENDACIONES

1. Rediseñar la máquina de indentación dinámica para la realización de futuras investigaciones, A continuación se nombran algunos aspectos a tomar en cuenta:
 - Es imprescindible la incorporación de un dispositivo que permita medir la fuerza aplicada por la máquina. Se pudiera utilizar la propuesta (a) que se planteó en la metodología.
 - Colocar una bocina entre el portaindentador y la placa superior del sistema general, para evitar el juego que existe entre dicha pieza y el orificio.
 - Sustituir el agarre de la probeta, colocando un agarre adicional que permita restringir el movimiento en dirección lateral.
 - Cambiar las bases de la máquina, ya que con el movimiento, peso y vibraciones tiene tendencia a doblarse. Además colocar en las bases fundas de gomas que permita adherirse a la mesa de trabajo, para así minimizar las vibraciones.
 - Modificar las base del portaprobeta, adicionando por lo menos dos tornillos para evitar movimientos en el mismo.
 - Mejorar el eje disco – motor. Dimensionar el eje del disco de manera que case con el eje del motor sin necesidad de utilizar tornillos, ya que con las vibraciones estos se van aflojando.
 - Incluir un dispositivo que permita medir el número de ciclos que la máquina realiza durante cada ensayo.

2. Verificar el modelo propuesto en este trabajo, realizando un mayor número de ensayos.
3. Realizar el ensayo de indentación dinámica utilizando otros indentadores como el indentador vickers, porque debido a su geometría existen concentradores de esfuerzos en sus vértices lo que permite la aparición de grietas en zonas determinadas, y el indentador plano el cual fue utilizado en trabajos previos en ensayos de indentación dinámica .

BIBLIOGRAFÍA

1. Askeland, D. (1985). *La Ciencia e ingeniería de los materiales*. U.S.A.: Grupo Editorial Iberoamérica.
2. Avallone, E. y Baumeister III, T. (1995). *Manual del ingeniero mecánico* (9^{na} ed.). México: McGraw-Hill.
3. Avilés, R. (2005). *Análisis de fatiga en máquinas*. España: Thomson.
4. Avner, S. (1966). *Introducción a la metalurgia física*. México: McGraw-Hill.
5. Callotter, W.D. (2005). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. España: Revertí. S.A.
6. Cazaud, R. (1957), *La fatiga de los metales*. Madrid: Aguilar.
7. Colangelo, V.J. y Heiser, F.A. (1974). *Analysis of metallurgical failure*. New York: A. Wiley- Interscience Publication.
8. Craig, R. Jr., *Mecánica de materiales* (2^{da} ed.).Cecsa. 2002.
9. Dieter, G. *Metalurgia Mecánica*.
10. Forrest, P.G. (1962). *Fatiga de los metales*, Urmo S.A.Ediciones.
11. Kocanda, S. (1978). *Fatigue failure of metals*. Warsaw: Sijthoff & Noordhoff International Publishers.
12. Lasheras, J. M. (1967). *Tecnología del acero* (2^{da} ed.). Zaragoza.
13. Thornton, P.A. y Colangelo, V.J. (1987). *Ciencia de materiales para ingeniería*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
14. Zolotarevski .*Pruebas mecánicas y propiedades de los metales*.

Referencias electrónicas:

15. Banerjee, R. y Kumar, B. (1997). *Crack initiation by indentation fatigue in lead Alkali and Soda-lime glass*. Journal, 80 (10), Disponible en <www.sciencedirect.com> Consultado [2007, 02, 15].
16. Fuqian, Y., Lingling, P. y Kenji, O. (2005). *Cyclic indentation in aluminum*. Springer Science+Business Media, 42 (4513-4520). Disponible en <www.springer.com.> Consultado [2007, 02, 15].
17. Xu, B.X., Yue, Z.F. y Wang, J. (2006). *Indentation fatigue behaviour of polycrystalline copper*. Sciencedirect 39 (1066-1080), Disponible en <www.sciencedirect.com> Consultado [2007, 06, 5].
18. Vega, X.; Martínez, A, *Indentación dinámica de láminas de termoplásticos*. Disponible en <www.sciencedirect.com> Consultado [2007, 03, 25].
19. Pane, I. y Blank, E (2004). *Role of plasticity in indentation behavior: Relations between surface and subsurface responses*. Internacional journal of solids and structures (43), Disponible en <www.sciencedirect.com> Consultado [2007, 11, 10].
20. *El curso de la ciencia de los materiales*. Disponible en <<http://personales.upv.es/~avicente/curso/unidad2/fatiga2.html>> Consultado [2007,11, 10].
21. Bove ag S.L. *Plásticos y elastómeros*. Plásticos mecanizables. Disponible en <<http://www.plasticos-mecanizables.com/metacrilato.html>.> Consultado [2008,06,14].
22. *Plexiglas*.Disponible en <http://www.plexiglas.de/methacrylates/es/plexiglas/aplicaciones/>>Consultado [2008, 06, 14].

23. *Tipos de vidrio*. Disponible en
<http://omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_5.htm1> Consultado [2008, 06, 14].
24. *Materiales II. Fatiga*. Disponible en
<<http://www.ing.unlp.edu.ar>> Consultado [2008, 05, 15].
25. *Ensayo de dureza superficial*. Disponible en
<<http://www2.ing.puc.cl/~icm2312/apuntes/materiales/materials6-2.html>>
Consultado [2007, 10, 24].
26. *Dureza Rockwell*. Disponible en
<http://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Rockwell> Consultado [2007, 10, 24].
27. *Fatiga de Materiales*. Disponible en
<http://es.wikipedia.org/wiki/Fatiga_de_materiales> Consultado [2007, 11, 05].
28. *Catálogo Ferrum aceros C.A.* Böhler Uddeholm.