



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
COL. LINDAVISTA **07738**
MÉXICO, DF.

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

**ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RELAJACIÓN EN
MATERIALES COMPLEJOS PLEXOPLEGABLES**

Presenta:

M. en C. FRANCISCO HERNÁNDEZ MÉNDEZ.

Director de Tesis

Dr. ORLANDO SUSARREY HUERTA.

MÉXICO, D.F. ENERO DE 2012.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 12:00 horas del día 12 del mes de Enero del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. para examinar la tesis titulada:

“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RELAJACIÓN EN MATERIALES COMPLEJOS PLEXOPLEGABLES”.

Presentada por el alumno:

HERNÁNDEZ
Apellido paterno

MENDEZ
Apellido materno

FRANCISCO
Nombre(s)

Con registro: **A 0 8 0 3 9 5**

aspirante de:

DOCTOR EN CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Director(a) de tesis

DR. ORLANDO SUSARREY HUERTA

Presidente

DR. ALEXANDER BALANKIN

Tercer Vocal

DR. MIGUEL ÁNGEL MARTÍNEZ CRUZ

Segundo Vocal

DR. ERNESTO PINEDA LEÓN

Secretario

DR. DIDIER SAMAYOA OCHOA

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. JAIME ROBLES GARCIA



Handwritten initials



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL "ADOLFO LOPEZ MATEOS"
COLONIA LINDAVISTA 07738 MÉXICO, D.F.
SECCION DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

CARTA DE SESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de México Distrito Federal, el día 9 de diciembre del año 2011 el que suscribe M. en C. FRANCISCO HERNÁNDEZ MENDEZ alumno del programa en el Doctorado en ciencias con especialidad en ingeniería mecánica con número de registro A080395, adscrito a la sección de estudios de posgrado de investigación de la ESIME unidad ZACATENCO, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de tesis bajo la dirección del Dr. Orlando Susarrey Huerta. Y cede los derechos del trabajo titulado: "ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA RELAJACIÓN DE MATERIALES COMPLEJOS PLEXOPLEGABLES" al INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Lo usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual graficas o datos del trabajo sin permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo la siguiente dirección: Unidad Profesional "Adolfo López Mateos, Edificio numero 5, 3er piso Col. Linda Vista. C.P. 07738 México, D.F. Tel. 5729600 ext: 54586 Fax: 57296000 ext: 54588. Sus comentarios pueden ser recibidos en los correos pacohernandez10@hotmail.com y osusarrey@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente de la misma.

M. en C. FRANCISCO HERNÁNDEZ MENDEZ.

Nombre y Firma

RESUMEN

La investigación de materiales de todo tipo se ha estudiado en diferentes ámbitos, por ello se ha elegido esta investigación para realizar un análisis profundo en la relajación de materiales plexoplegables ya que hay materiales que se pueden comportar de manera similar entre sí, deduciendo posibles aplicaciones para los diferentes papeles a ensayar.

La investigación en principio está basada en analizar una membrana fibrosa conformada de manera esférica. Por medio del arrugado manual se logra dicho conformado de tal manera que se examina como absorbe y libera energía de manera muy lenta; este trabajo se sustenta en la idea preliminar; tomando en cuenta todos los parámetros que requiere una investigación de laboratorio como la temperatura la humedad, las vibraciones y todo lo que en conjunto lleva cada prueba para realizar lo más apegado a contexto real con lo que sucede con cada una de las probetas y sus respectivos análisis.

En el trabajo se analizaran variables como humedad temperatura y diferentes problemas externos que llegaran a interferir en las pruebas como vibraciones repentinas, ya que las pruebas son muy sensibles y el material es muy higroscópico.

También se realizó un estudio experimental en microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido, para analizar en las mismas condiciones de humedad y temperatura de los ensayos para obtener resultados más contundentes, posteriormente se analizaron los resultados experimentales mediante métodos teóricos matemáticos y probabilísticos con ayuda de programas (EXCEL E IMAGE PRO PLUS 7.0) para la resolución de la investigación.

Además se hizo un ensayo mecánico (tensión) de todos los tipos de papel para obtener el módulo de elasticidad, esfuerzo de cedencia, esfuerzo de ruptura, resiliencia y tenacidad para usar esto de referencia en el análisis.

Cabe señalar que el interés que se tuvo para utilizar el papel es por su bajo costo y fácil adquisición además de que muchos papeles son muy similares entre sí además es de fácil manejo teniendo en cuenta la humedad y temperatura en el ambiente.

En este trabajo multidisciplinario que involucra diferentes áreas correspondiente como la mecánica, física, química, matemática, ciencias de materiales e ingeniería de materiales por el proceso de fabricación de papel, el acabado, el acomodo y distribución de las fibras y otros ámbitos del propio papel.

Para obtener una adecuada estructuración de este trabajo, este se definió de la siguiente manera en el primer capítulo se presentan reseñas históricas importantes en el área industrial, experimental y teórica que explican la forma de fabricación, el proceso del papel y comprende algunos desarrollos tecnológicos y mejoras en cuanto a la calidad del papel que son realizados antes durante y después del acabo del proceso del papel.

Además explican en pasos simples cómo se debe manejar el papel dentro de sus estándares de calidad del mismo papel ya sea con compuestos químicos o variables del medio ambiente y de la manufactura y composición de muchos procesos en un solo material, los conceptos, tipos y explicaciones se denotan por separado de los diferentes compuestos que tiene el papel.

De la misma forma en el segundo capítulo se hace un estudio generalizado sobre los compuestos más usados en los diferentes papeles estudiados, identificando el tamaño de fibra y todos los aspectos físicos como el tamaño de fibra y sus ventajas al usar cada tipo de papel. En el tercer capítulo se describe el desarrollo experimental y todos los pasos a seguir en el desarrollo de la investigación así como la caracterización de los compuestos de los papeles Kraft, Plasil, Lustre y América.

Finalmente, se evalúan los resultados obtenidos en los ensayos propuestos y a partir de los resultados experimentales se desarrollaron modelos matemáticos y estadísticos que describen el comportamiento de los papeles analizados y las propiedades encontradas.

Además se señalan los puntos más relevantes de la presente investigación y en los anexos se dan a conocer algunos puntos y graficas que sustentan más la investigación y la información evaluada de los datos encontrados y los logros obtenidos al final.

ABSTRACT

Materials research of all types has been studied in different areas, so this research has been chosen to perform a deep analysis on relaxation plexoplegables materials as there are materials that can behave similar to each other, less potential applications for to test the different roles.

The research is based on analyzing first a fibrous membrane formed on a spherical, wrinkled hand through said forming is done so that examines and releases energy as it absorbs very slowly, this work is based on preliminary idea; taking into account all the parameters needed for laboratory research as temperature moisture, vibration and everything that brings together each test to make it more attached to real context to what happens with each of the specimens and their respective analysis.

The variables were analyzed as different temperature and humidity external problems that cause interference with the tests as sudden shocks, since the tests are very sensitive and very hygroscopic material.

We also performed an experimental study in light microscopy and scanning electron microscopy, to analyze the same conditions of humidity and temperature tests to obtain more conclusive results, then analyzed the experimental results with theoretical mathematical and probabilistic methods using programs (Excel and Image Pro Plus7.0) for the resolution of the investigation.

In addition there was a mechanical testing (tension) of all types of paper for the elastic modulus, yield strength stress, breaking strength, resilience and tenacity this reference in the analysis.

Note that the interest was to use the paper is its low cost and easy acquisition is that many roles are very similar is also easy to use, taking into account humidity and temperature in the environment.

This multidisciplinary approach involving different relevant areas such as mechanics, physics, chemistry, mathematics, materials science and engineering of materials for the manufacturing of paper, finishing, and distribution arrangement of the fibers and other areas of the paper itself.

For a proper structuring of this work, this was defined as follows in the first chapter presents important historical reviews in the industrial, experimental and theoretical that explain the manner of manufacture, the process of paper and includes some technological developments and improvements in the quality of paper that are made before, during and just after the paper process.

It explains in simple steps should be handled as role within quality standards of the same paper with either chemical or environmental variables and the manufacturing and composition of many processes in a single material, concepts, types and explanations are denoted separately from different compounds having the paper.

Likewise in the second chapter is a general study on the compounds used in the different roles studied, identifying the size of fiber and all the physical aspects such as fiber size and advantages in using each type of paper. In the third chapter describes the experimental development and all steps in the research development and characterization of the compounds of kraft paper, Plasil, Lustre and America

Finally, evaluate the results of the proposed tests and from the experimental results and statistical developed mathematical models that describe the behavior of the papers analyzed and the properties found.

Also outlines the highlights of this research and annexes are released a few points and graphs to support more research and information evaluated data and achievements found at the end.

NOMENCLATURA

L Longitud calibrada del papel

δ Espesor del papel

S Superficie de la hoja

M Masa de la hoja

R Diámetro de la hoja

\bar{P} Diámetro promedio

(β) Exponente de escalamiento de la fuerza aplicada

ρ_a Densidad del papel

σ_s Desviación estándar

λ Factor de escalamiento en las hojas de papel

EL Módulo de elasticidad longitudinal

ET Módulo de elasticidad transversal

σ_y Esfuerzo de cedencia

σ_u Esfuerzo último

T₀ Tenacidad

U₀ Resilencia

h Altura entre platinas

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se muestra un estudio del fenómeno de relajación en materiales plexoplegables y se definió en diferentes ensayos mecánicos, propiedades físicas, y elementos estadísticos, cuyo objetivo principal es caracterizar y explicar el fenómeno de relajación, la investigación está basada conceptos teóricos y prácticos, como auto-similitud y autoafinidad, humedad y temperatura que se utilizan para explicar características y comportamiento de los materiales en las diferentes pruebas a las que se sometieron. Debido a que son aspectos del material (papel) que están presentes en el análisis de los diferentes tipos de papel.

Este trabajo se presenta dentro del marco de las líneas de investigación de materiales plexoplegables en los que se emplean materiales fibrosos, anisotrópicos (papel) para el análisis. Además se da a conocer un enfocado análisis del comportamiento del fenómeno de (liberación de energía).

Se diseñó una metodología para realizar la caracterización y ensayos del material la cual engloba varias etapas como la evaluación teórica; la selección del material (PAPEL KRAFT, PAPEL PLASIL, PAPEL LUSTRE Y PAPEL AMERICA) por tener un fácil acceso y bajo costo, la medición de espesores, la elección del tamaño de la hoja cuadrada(con medidas de 100mm x 100mm, 200mm x 200mm, 300mm x 300mm Y 400mm x 400mm)para cada tipo de papel, por último el tamaño de la bola corrugada de papel. En la evaluación experimental se utilizó la microscopia óptica, la microscopia electrónica de barrido posteriormente, un análisis de imágenes para medir el tamaño de fibras del material anisotrópico, los poros y los huecos del material, después se sometió el material a ensayos mecánicos de tensión (esfuerzo – deformación) para obtener el módulo de elasticidad, esfuerzo de cedencia, esfuerzo de ruptura, tenacidad y resiliencia.

Posteriormente, de los datos obtenidos en los ensayos de relajación terminados se llevó a cabo el análisis estadístico y matemático de los diferentes papeles para obtener la Ec. General del ensayo de relajación que explica cómo se comporta la liberación de energía.

JUSTIFICACIÓN

LA SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN DE LA ESIME IPN en específico el grupo de mecánica fractal se ha planteado el reto de llevar a cabo un programa de investigación en la ramo de la geometría fractal y el comportamiento de materiales, con el fin esencial de examinar materiales con estructura compleja y a su vez darle una aplicación real.

En México en la última década se han utilizado muchos materiales fibrosos tanto en la industria manufacturera, en la industria automotriz según las necesidades de cada función en que se emplee el material, por ello existe una gran necesidad de usar materiales ligeros, menos costosos y de fácil acceso.

La finalidad de este estudio es analizar y evaluar el comportamiento de materiales con estructura compleja en este caso en particular en ensayos de relajación libre, relajación a esfuerzo constante y relajación a deformación constante, por tal motivo se realizó un análisis previo de sus propiedades de cada material como; módulo de elasticidad, esfuerzo de cedencia, esfuerzo de ruptura, resiliencia y tenacidad elección del tamaño de la hoja cuadrada, diámetro promedio, densidad del material, espesor, dimensión fractal de masa y el exponente de escalamiento de la liberación de energía.

Para los diferentes tipos de papeles se propusieron diferentes tipos de materiales fibrosos como el papel Kraft, Plasil, Lustre y América. El papel en general es un producto compuesto obtenido de la pasta o pulpa derivada de la madera de forma delgada y flexible. Algunas de las propiedades físicas del papel son sensibles a los cambios de temperatura pero sobre todo de humedad; sin embargo, todos estos fenómenos se tomaron en cuenta para la experimentación, las ventajas de trabajar con papeles son las siguientes, que se pueden conseguir sin ningún problema, un manejo sencillo, factible para realizar estudios de rugosidad, medidas exactas al momento del corte, y elaboración de diferentes tamaños de probetas de forma muy económica.

Este tipo de análisis mencionados con anterioridad arrojará los datos tanto del ensayo de tensión y los datos del ensayo de relajación donde el material absorbe y libera la energía absorbida. En conclusión se busca darle aplicación a dichos materiales o compararlos con materiales similares de estructura compleja.

Además de que hay que diseñar materiales que puedan ser empleados en un futuro, para las diferentes necesidades que tienen, con características esenciales y propias que puedan sustituir otros materiales con un costo más elevado y darle un uso correcto, así mismo se han destacado diversos resultados, para exponerlos en congresos de calidad y realizar artículos de alto nivel.

OBJETIVOS

Objetivo general

Realizar un estudio experimental para la caracterización mecánica y física en el ensayo de relajación de materiales con estructura compleja conformados de manera esferoidal, utilizando análisis de microscopía óptica, microscopía de barrido, ensayos mecánicos y los programas Excel e image pro plus 7.0 para analizar los datos e imágenes como sus propiedades y conocer su comportamiento mecánico (liberación de energía).

Objetivos específicos

Analizar las propiedades de cada tipo de material papel Kraft, Plasil, Lustre y América, además de examinar sus propiedades microestructurales, físicas y mecánicas para darle en un futuro una aplicación tecnológica o industrial.

Examinar y evaluar los valores experimentales de cada material con los métodos de ensayo mecánicos, análisis de microscopía óptica y de barrido para obtener resultados certeros.

Determinar con el programa Excel el modelo de estadístico del material y con el programa de analizador de imágenes image pro plus 7.0 medir el tamaño de fibra, los espacios entre ellas y los poros internos de la misma para obtener un panorama más amplio de que se está evaluando y qué condiciones están presentes el material.

1.- ESTADO DEL ARTE

En 1975 **BENOIT MANDELBROT** denominó fractales (del latín fractus, irregular) al conjunto de formas que generadas normalmente por un proceso de repetición, se caracterizan por poseer detalle a toda escala, por tener longitud infinita por no ser diferenciables y por exhibir dimensión fraccional (**Mandelbrot,1967**)[1]. Adicionalmente construyó con ellas un conjunto de nuevas reglas para explorar la geometría de la naturaleza y las reconoció como herramientas potencialmente útiles para analizar un gran número de fenómenos físicos (**Peitgen, 1986**) [2].

El interés de **Mandelbrot** en los fractales nació de su certeza de que “las nubes no son esferas, las montañas no son conos, las costas no son círculos, como la corteza de un árbol no es plano, ni un rayo viaja en línea recta. La naturaleza no solamente exhibe un grado mayor si no también un nivel diferente de complejidad (**Mandelbrot, 1984**) [3].

Hoy día se han identificado innumerables manifestaciones naturales de estructuras. Se sabe que su geometría está presente en depósitos y agregados coloidales (como los generados por el polvo y el smog), poliméricos y electroquímicos. (**Sander, 1987**) [4]. De manera similar, hay evidencia de que la localización geográfica, de epicentros y temblores exhibe un patrón fractal. (**Bak, 1991**) [5], y en la actualidad la dimensión fraccional (dimensión fractal) de la superficie irregular de una falla en material ya se utiliza como medida indirecta de su resistencia y dureza. (**Peterson, 1988**) [6].

Los fractales mostraron su actualidad por primera vez cuando se generó con ellos un modelo simple para la aparición de ruido en ciertas líneas de transmisión en sistemas de comunicación digital. (**Peterson, 1988**) [6].

El mundo de los fractales está en pleno desarrollo en la actualidad. Así como la naturaleza parece haberlos elegido para generar formas complejas y únicas a través de un mecanismo de repetición muy simple, los seres humanos se sirven de ellos para almacenar y reproducir imágenes (**Dewdney,1990**[7]; **Jurgens, 1990**) [8], hacer modelos teóricos y experimentales de cuerpos irregulares (**Peterson, 1988**) [6] desenmarañar la estructura de procesos dinámicos caóticos. (**Ford, 1989**[9]; **Rietman, 1989**) [10].

Cuando **BENOIT MANDELBROT** publicó en 1975 su primer ensayo sobre fractales no se atrevió realmente a dar una definición matemática formal que caracterizara a estos objetos; decidió simplemente utilizar el término para dominar las formas que compartían la característica común de ser a la vez *rugosas y autosimilares*.

MANDELBROT, buscaba otorgarles una categoría intermedia entre los cuerpos euclidianos regulares y lisos que no son comunes (círculo, triángulo, esfera, etcétera), y las figuras que hoy en día se denominan *geoméricamente caóticas* y cuya experiencia es rugosa, pero sin exhibir ningún patrón geométrico regular.

Hacia 1977, el matemático se vio forzado a dar una definición formal que permitiera distinguir con más claridad una entidad fractal. Así recurrió al antiguo concepto de dimensión de Hausdorff y en respuesta al pragmatismo definió; en general, todos los fractales como el conjunto de formas con dimensión fraccional. Mandelbrot era perfectamente consciente de que esta definición, si bien establecía una frontera bien delimitada con la geometría euclidiana de los conos y las esferas (en la que los cuerpos tienen una dimensión de Hausdorff entera), dejaba una puerta abierta hacia la región del caos geométrico. Sin embargo, a la espera de mejores definiciones, inició el trabajo que con hechos y con el lenguaje de las imágenes le mostraría al mundo el verdadero significado del término *fractal*. Sus resultados abrieron la puerta de un mundo impresionante donde habita el verdadero sentido de la palabra obsesión, donde las matemáticas se confunden con el arte, y la ciencia ha encontrado nuevas respuestas.

En 1994 se realizó un estudio sobre el almidón catiónico y fue encontrado que para aumentar la fuerza de fichas técnicas por el aumento de la fuerza de adherencia por unidad de área óptica en régimen de barrido ('b') de la hoja, en lugar de la relación de la probeta total. Los primeros 0,5% de almidón, además tiene el mayor efecto. Este efecto se comparó con el efecto del almidón sobre la vinculación a redes de fibra de vidrio de bajo gramaje. Aquí, 'b' se encuentra como una constante, independientemente de la adición de almidón, mientras que el aumento de la superficie en condiciones de barrido. [11].

Hay investigaciones de 1996 en que se muestra, la adsorción de bases y almidón de maíz catiónicos en fibras de Termo pastas mecánicas (PGT) estudiados, se ha dividido en dos partes. En la primera parte, la adsorción de diferentes cargas de almidones de base catiónica en la fracción de fibra de una blanqueada con peróxido **Thermo Mechanical Pulps** TMP que fue analizado. Los resultados muestran que la adsorción puede ser vista como un proceso de intercambio iónico en el que las cargas aniónicos en las fibras son neutralizados por las cargas catiónicas de la fécula. Los experimentos con diferentes concentraciones de electrolitos muestran que la adsorción del almidón sobre este tipo de fibra sigue las teorías de adsorción polielectrolito. Cuando las Sustancias coloidales y disolvente **Dissolved and Colloidal Substances** (DCS) de dicho Plan se introduce en los experimentos de estas conclusiones ya que no son válidos por que la formación de complejos entre el almidón y el DCS se convierte en el proceso dominador.

En 1970 se publican los resultados de la segunda parte muestra la gran influencia de las restricciones de celulosa y DCS en la cantidad de fécula que puede ser adsorbida en las fibras. Dado que tanto las restricciones y DCS tienen una carga mayor densidad y una mayor área de superficie específica de las fibras, que pueden absorber cantidades significativamente mayores de almidón y por lo tanto, puede aumentar la cantidad total de almidón adsorbido en las fibras, a condición de las restricciones y DCS puede mantenerse a las fibras constantes. La fracción de las restricciones se mantiene a las fibras por un tipo de mecanismo de transición mientras que el DCS-fracción se mantiene a través de neutralización de la carga de los rangos de la DCS-fracción por los cargos de la fécula. La fécula de base era un poco más eficiente que el almidón de maíz en la neutralización de los efectos de la DCS-fracción. © Verlagsgesellschaft VCH: mbH. [12].

En 1996 se encontró que el almidón catiónico mejora la resistencia seca de papel fino de pasta química blanqueada, pero tiene un efecto diferente en las hojas hechas de pasta mecánica. En este último caso los principales beneficios son la mejora de la retención y del enlace interno. La diferencia se debe a la gran proporción de su importe en una pasta mecánica, a su contenido de lignina, y la gran cantidad de dispersión y disolución de carga negativa material en una suspensión mecánica. [13].

En 1996 La incorporación cada vez mayor de fibras recicladas y mayores niveles de cierre de sistema de agua blanca, en el resultado de la fabricación de papel alcalino en sistemas con mayores concentraciones disueltos del material la conductividad aumenta, lo cual afecta significativamente la retención y el rendimiento de la ayuda de drenaje. En los últimos años, los sistemas de micropartículas se desarrollaron para mejorar la retención y drenaje de la fabricación de papel fino proporcionado. Sin embargo, todos estos sistemas de micropartículas incluidos poliacrilamidas lineales que tienden a formar específicos "témpanos de tipos". Un sistema nuevo de micropartículas se propone para mejorar la retención de carbonato de calcio precipitado (PCC) de relleno, drenaje y propiedades de la hoja. Dos nuevas poliacrilamidas catiónicas junto con una micropartícula de bentonita se compararon con un sistema de micropartículas tradicionales. Los resultados mostraron que un floculante catiónico ramificado de poliacrilamida se utiliza junto con bentonita y mejora la retención de primer paso, primero para pasar la retención de cenizas y de drenaje sobre el sistema de micropartículas tradicionales. También se constató que los polímeros ramificados se vieron menos afectados por la turbulencia mayor en comparación con la poliacrilamida lineal. [14].

En 1970 la comprensión de la relajación de la tensión de las cadenas de papel húmedo mejora la maquinabilidad tanto en máquina de papel como en la eficiencia de producción. Para esta relajación final de las simulaciones de red de fibras no enlazantes se llevaron a cabo en todo el proceso, y en comparación con escala de laboratorio en experimentos de relajación en papel mojado. Estudios numéricos y experimentales muestran que la fuerza de tracción se relaja de forma lineal en función del tiempo logarítmico [15].

En 1980 se realizó un estudio de el efecto de la humedad, temperatura y presión sobre las dimensiones del papel se ve afectado significativamente por la fatiga. Estos efectos como la moderación durante el secado y deformación plástica producida por difundir a la tracción esfuerzo tensiones internas que se pueden soltar por la alta humedad y temperatura. El alivio de tensión por la humedad y el calor son aparentemente asociados. La deformación simple de papel de pasta mecánica y la observada en los cambios de temperatura y la humedad se comparan. El aumento de las cepas no recuperables se produce cuando se produjo la migración de humedad durante el ciclo. Las relaciones demuestran que existe entre el alivio de la tensión y la relajación en términos de historia - fatiga. La experimentación de relajación en la tensión de flexión son resultados del rendimiento de deformaciones similares a los observados en tensión. ©. [16].

En 1984 los términos de fluencia acelerada de ciclos de humedad ya ha sido estudiado y es un fenómeno establecido, pero poca o ninguna referencia se ha hecho al calor fluencia acelerada. Este informe proporciona datos sobre el calor fluencia acelerada y propone una idea de cómo analizar la fluencia acelerada.

Cuando una muestra de fluencia ha sido calentada rápidamente o humedecida, el alargamiento que se necesite en la carga de prueba se hace mayor. Como resultado de la muestra se extiende a compensar esto, un movimiento hacia el equilibrio, el aumento de la fluencia más allá de lo que normalmente se ve a HR (humedad relativa) constante o temperatura. [17].

En 1986 Para estudiar la influencia combinada de la humedad y la temperatura sobre las propiedades de resistencia del papel, especialmente en el módulo de elasticidad y propiedades de tracción se han medido en el rango de temperatura -25 C° a 65 C° y con contenidos de humedad de cero a 20%, correspondiente a una rango de 0% a 95% de humedad relativa.

Los datos arrojados se presentan para el módulo específico de elasticidad en esta humedad y temperatura para un papel kraft para sacos y en 20 C° para otros papeles. Se muestra que el agua actúa como suavizante para el papel, que influyen en la transición vítrea de los componentes de celulosa en una medida se predijo a principios utilizando el enfoque de Kaelble. Los efectos de la cristalinidad de papel también se discuten de acuerdo con esta opinión. [18].

En 2004 se realizaron experimentos que ayuden a aclarar los mecanismos de fluencia acelerada. El enfoque se mezcla para formar hojas y hojas de varias capas, de hecho proporciona compuestos de fibras de higroexpansividad diferente, o la capacidad de absorber agua y se expanden. Estas hojas a las hojas de hechos de un tipo de fibra aislada se compararon después de correr las pruebas de fluencia acelerada. Los resultados muestran que la práctica de diferentes capas proporciona en el tablero de contrachapado múltiple (acabado especial del papel) pueden contribuir a la falla prematura de los productos de cartón cuando la humedad relativa es la variación entre las condiciones de baja y alta. [19].

En 1995 la distribución a través del espesor en el plano de la tensión residual se ha determinado mediante pruebas de laboratorio hechas en cartones, para estudiar las causas de estas tensiones. El grado de restricción durante el secado no se muestra para influir en las tensiones residuales de una manera significativa. Sin embargo, un mayor nivel de superación de la pulpa genera un aumento de las tensiones residuales. El gradiente de secado a través de la hoja junto con la contracción de papel a medida que disminuye el contenido de humedad se propone como el principal motivo de tensiones residuales (acumulación). No afecta a una contracción libre cuando se trata de limitar los gradientes de secado al disminuir el gramaje, en la experimentación del ciclo. [20].

En 1995 la variación de las propiedades elásticas medidas en diversos papeles y su relación con las variaciones de la tensión de secado en la dirección del grosor del papel es la principal preocupación de esta investigación. Una variación significativa en la tensión interna (usado como una medida para el secado de la tensión) y las tensiones residuales en la dirección del espesor se han determinado según la relajación de la tensión y las medidas de la curvatura, respectivamente. Estos hallazgos pueden tener importancia para la conversión y las propiedades de uso final del papel y cartón. [21].

En 1996 la capacidad de un aparato de laboratorio para control de fatiga y las tensiones de un papel durante el secado se examinaron. Los resultados mostraron que, independientemente del secado en la estrategia utilizada, el parámetro de control para la

rigidez a la tracción muestra la cantidad de tensión impuesta durante el secado. [22].

En 1997 la contracción, el secado y el comportamiento de la junta de tres capas, se estudió examinando el comportamiento de las distintas capas por separado y simular el desarrollo de la sequedad y la contracción por secado del desarrollo de tensión dentro de la Junta Combinada durante el secado del cilindro. En la superficie de cartón en hojas secas primero y tienden al disminuir en primer lugar, que también tienen un mayor potencial de contracción. Los resultados experimentales en combinación con la simulación sugieren grandes diferencias en la sequedad y el secado en fatiga del comportamiento de contracción entre la superficie y capas medias. También el considerable descenso de la tensión de las capas superficiales se predijo en cada área de trazo libre. En general, las diferencias fueron mayores cuando la sequedad bordo promedio es 75-85%. [23].

El efecto de las tensiones causadas por esfuerzo mojado y secado de retención en la hoja en la máquina de papel se ha estudiado de forma hoja de papel con orientación de las fibras al azar. El aumento de la resistencia a la tensión normal y cero están asociados con aumentos en la moderación parece ser debido a: enderezamiento de los segmentos de fibra entre los sitios aumenta causando una igualdad de distribución de esfuerzos y aumentar la resistencia a la tracción en la fibra debido a la estabilización de las tensiones entre los subelementos de la fibra.

Una mayor resistencia a la tracción span cero es necesaria para obtener una determinada resistencia a la tensión normal, la mayor será el grado de secado - tensión. De esto se infiere que el cambio en la distribución de poros no es un factor pertinente en el aumento de la tensión obtenida con moderación aumentada.

En 1998 para un determinado grado de restricción que existe una correlación fuerte entre el módulo de elasticidad y el volumen de hoja. El secado de retención a lo largo de figura no afectan materialmente a la (perpendicular a la dirección de la restricción) resistencia a la tracción. El esfuerzo de la hoja seguido de la retención total de secado produce una disminución sustancial de la resistencia a la tracción de la fuerza de goteo es aumentada ligeramente por la moderación y del goteo disminuye.

Para las condiciones de la vinculación interfibras e igualdad de handsheets se han hecho sin restricciones, la aplicación de la restricción parece dar aumento de resistencia a

la tracción para las hojas de pasta refinada que la de las hojas reforzadas por la adición de almidón. [24].

En el 2001 se dedujo la absorción capilar por una hoja porosa inicialmente seca o superficie se examina. La hoja absorbe la humedad de un extremo, mientras que la evaporación tiene lugar a través de su superficie. Estamos interesados en el efecto de la evaporación en el progreso y la distribución de la humedad en la hoja, como el perfil de humedad de equilibrio.

El proceso se realiza con una aproximación analítica algebraica se obtiene sobre los parámetros físicos diferentes, así como una solución exacta para las propiedades de estado estacionario arbitrario. El problema se resuelve numéricamente completo. Es un buen acuerdo obtenido entre las soluciones analíticas y numéricas. [25].

En el 2003 el desempeño de muchos productos tales como los fabricados con cartón corrugado o cartones otros es sensible a la humedad. Perfiles transitorios de humedad como resultado heterogeneidades en las propiedades mecánicas y, a menudo puede conducir a una falla catastrófica. Visto como un medio poroso compuesto el sistema comprende fibras higroscópicas y espacios vacíos los cuales son continuos. Además, tanto la humedad conducta por fases por difusión y cartones para la difusión a través de la típica matriz de fibras con predominio en el contenido de humedad alta y difusión en fase de vapor a través del espacio vacío es dominante a valores menores. La ruta predominante para el transporte de humedad puede sufrir un cambio de las fibras de los espacios vacíos en las diferencias de humedad de gran tamaño. Otra característica interesante es el desarrollo de los mínimos en el flujo de humedad en comparación con las curvas de tiempo, que son sensibles a la difusión y absorción de los parámetros locales. Mínimos de Seguimiento de estas actividades pueden proporcionar un buen método para ajustar los parámetros del modelo sobre la base de datos de flujo experimental. [26].

En el 2004 el papel de la región interfacial entre las capas puede afectar a la resistencia global y modificar los perfiles de contenido de humedad de manera significativa. Dado que los modelos similares de dos ecuaciones se han propuesto para el transporte de otros procesos como el calor y la transferencia de momento, estos resultados pueden tener una aplicación más amplia.

En particular, los perfiles de equilibrio y la inestabilidad de los flujos y puede ser explotado para obtener información acerca de los coeficientes de transporte local y global para el medio heterogéneo que se trate. [26].

En el 2006 las ecuaciones macroscópicas que gobiernan los procesos de uno y de flujo de dos fases a través de medios porosos heterogéneos se obtienen mediante el método de escalas múltiples. Las ecuaciones resultantes son matemáticamente similares a las ecuaciones de momento, con la diferencia fundamental de que las permeabilidades locales son reemplazadas por parámetros efectivos. El método permite la determinación de estos parámetros a partir del conocimiento de la estructura geométrica del medio y sus heterogeneidades. La técnica se aplica para determinar los parámetros para una efectiva y en dos fases fluye a través de medios porosos heterogéneos formado por dos medios porosos homogéneos. [27].

En el 2006 los procesos de transporte en medios porosos heterogéneos se tratan a menudo en términos de modelos de una sola ecuación. Este tratamiento supone que la velocidad, presión, temperatura y concentración se puede representar en términos de uno a gran escala la cantidad promedio en regiones de muy diferentes propiedades como químicas, mecánicas y térmicas. En este trabajo describimos el proceso de una sola fase de flujo en un modelo de dos regiones de medios porosos heterogéneos. El dominio de validez de la teoría ha sido identificado en términos de una serie de longitud y las limitaciones de escala de tiempo. En la segunda parte de la teoría se ha probado, en ausencia de parámetros ajustables, en comparación con experimentos numéricos para el flujo utilizado, un poco de aire en ambos modelos estratificados y nodular heterogénea de medios porosos. La congruencia entre teoría y experimento se obtiene de los sistemas de nodular y estratificada, y coeficientes de transporte eficaz para una amplia gama de condiciones, se presentan sobre la base de soluciones de cierre de los tres problemas que aparecen en la teoría. Parte de este artículo se refiere al principio de equilibrio mecánico a gran escala y la región de un promedio de forma de la ley de Darcy. El coeficiente asociado al modelo de dos regiones del transporte de solutos con la adsorción. [28].

En esta investigación se estudia el fenómeno de compactación de las bolas de papel y la liberación de energía que resulte de ellas, por tal motivo se analizaran 4 diferentes tipos de papeles, ya que es conocido como un material poroso, con estructura anisotrópica asociada con una orientación asimétrica en la distribución de sus fibras debido a los diferentes tipos de fabricación.

Las hojas de papel después de haber sido arrugadas manualmente sufren deformaciones plásticas que se ven reflejadas en unas pequeñas marcas o huellas sobre el papel, estas marcas se pueden observar después de extender la hoja.

En el 2006 las membranas arrugadas presentan una alta resistencia a la compresión debido a la resistencia que ofrecen los pliegues a ser deformados, así también, presentan una alta eficiencia en la absorción de energía debido a las deformaciones que se generan durante el proceso de arrugado. El estudio de las membranas arrugadas ha tomado suma importancia en los últimos años y ha sido estudiado por diversos investigadores. La dimensión fractal de membranas arrugadas comenzó a ser estudiada en 1987 con Gomes, quien relacionó el tamaño del papel (diámetro de las bolas arrugadas) y su masa; definiendo con esto la dimensión fractal de masa [29].

En 1989 Gomes determinó la deformación de las bolas de papel aluminio, cuando son sometidas a diferentes cargas. Para este efecto, describe el comportamiento de ocho relaciones escalares, relacionadas con las fuerzas, deformaciones, superficies escalares y variables de la geometría de la superficie arrugada [30]. Al mismo tiempo Gomes en colaboración con Soares proponen el uso de resistencia eléctrica, en función de la deformación de las superficies arrugadas en papel grafito, estos resultados los comparan con predicciones teóricas [31].

En 1988 Cerda y Mahadevan estudian la geometría y la elasticidad de una hoja arrugada dando una solución analítica, para una forma universal de un cono que caracteriza la singularidad de los filos vértices y de algunas de sus predicciones experimentales se verifican cualitativamente. También dan una relación escalar para el tamaño del centro del cono. [32].

En 1995 Lobkovsky publica la propiedad escalar que gobierna el estado de una hoja arrugada de un material sólido, que contiene pares de aristas por medio de puntos. Sus resultados exponen que cuando el tamaño lineal x aumenta suficientemente. La energía de deformación crece, sin embargo, esta energía disminuye cuando se concentra en un fragmento de la hoja a pesar de esta concentración la deformación local disminuye. [33].

En 1996 Plouraboué y Roux realizan estudios a superficies arrugadas aleatoriamente, presentan un análisis experimental de las superficies arrugadas, que muestran una geometría auto-afín con un exponente cerca de la unidad. Introduciendo así, un modelo simple para mostrar una posible fuente de correlación a lo largo de la geometría analizada. [34].

En 1999 Chaoñe y Melo examinan las arrugas empalmadas casi planas o cilíndricas en regiones plegadas encorvadas a lo largo de las líneas de los fillos estirados o puntos como son las singularidades cónicas. Para este efecto se realizaron dos experimentos con

modelos simples, donde aíslan una o dos singularidades para una demostración sencilla. [35].

En el 2001 Didonna demuestra la inestabilidad del pandeo del filo, que este solo depende de la proporción de tensión a lo largo de la curvatura del filo de las arrugas. [36].

En el 2003 Matan observó que las hojas corrugadas tienen una alta resistencia a la compresión. Esto lo realizaron por medio de esferas corrugadas de Mylar, bajo diferentes condiciones de carga. [37].

En el 2003 Janh y Trunckenbrodt obtuvieron un procedimiento simple y confiable para la determinación de parámetros fractales. Este procedimiento es conveniente para los perfiles y está basado en la ley de potencias de fractales auto-afines estadísticamente y ha mostrado que este procedimiento proporciona, casi la misma dimensión fractal que los métodos conocidos. [38].

En el 2004 Blair y Kudrollin publican las mediciones geométricas realizadas a los vértices del papel arrugado por medio de un rayo laser. [39].

En el 2004 Janh y Trunckenbrodt realizaron un procedimiento para el análisis fractal de superficies arrugadas, basándose en la ley exponencial estadísticamente de funciones auto-afines, así mismo se percataron que el esfuerzo es pequeño comparado con los métodos de evaluación fractal. [40].

En el 2005 Sultan y Bouchaoud realizaron estudios 1D (Dimensión uno), para mostrar la transacción de la carga distribuida de un logaritmo gama así como su predicción, usando argumentos analógicos mezclados. [41].

En el 2006 Kvamme muestra que dentro de la geología se observa que la característica de algunos paisajes y zonas montañosas pueden tener un aspecto muy similar al comprimido y arrugado de materiales delgados, el autor realiza algunas predicciones de la forma en que se evoluciono y continuara evolucionando algunos paisajes y zonas montañosas. [42].

En el 2007 Balankin y Susarrey estudiaron las características de escalamiento de esferas o bolas de papel aluminio corrugado aleatoriamente en diversos espesores y tamaños. Encontrado así que la dimensión fractal y el escalamiento son independientes del espesor de la hoja de aluminio. [43].

1.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES

En esta sección se estudiará algo relacionado a lo anterior, tomándose en cuenta diferentes parámetros que ya se emplearon anteriormente en experimentos y análisis mencionados en estudios previos, por ejemplo características como espesor, diámetro, rugosidad aleatoria de las bolas, intercalando variables como temperatura, humedad combinándolos con diferentes tipos de papeles y diferentes tamaños de la misma probeta.

1.2 Concepto de Fractal a

Un fractal es un objeto geométrico cuya estructura básica, fragmentada o irregular, se repite a diferentes escalas (**BENOIT MALDENBROT**). [44]. El término propuesto por el matemático Benoit Mandelbrot en 1975 y deriva del latín Fractus, que significa quebrado o fracturado. A un objeto geométrico fractal se le atribuyen las siguientes características (**FALCONER, KENNETH**). [45].

Demasiado irregular para ser descrito en términos geométricos tradicionales (geometría euclidiana).

Posee detalle a cualquier escala de observación.

Es autosimilar (exacta, aproximada o estadística).

Se define mediante un simple algoritmo recursivo.

No basta con una sola de estas características para definir un fractal. Por ejemplo, la recta real no se considera un fractal, pues a pesar de ser un objeto autosimilar carece del resto de las características exigidas.

1.3 AUTO-SIMILARIDAD

Según **B. Mandelbrot**, un objeto es auto-similar o auto-semejante si sus partes tienen la misma forma o estructura que el todo, aunque pueden presentarse a diferente escala y pueden estar ligeramente deformadas. Los fractales pueden presentar tres tipos de auto-similitud:

1.3.1 Auto-similitud exacta: este es el tipo más restrictivo de auto-similitud: exige que el fractal parezca idéntico a diferentes escalas. A menudo se encuentra en fractales definidos por sistemas de funciones iteradas.

1.3.2 Cuasi auto-similitud: exige que el fractal parezca aproximadamente idéntico a diferentes escalas. Los fractales de este tipo contienen copias menores y distorsionadas de sí mismos.

1.3.3 Auto-similitud estadística: Es el tipo más débil de auto-similitud: se exige que el fractal tenga medidas numéricas o estadísticas que se preserven con el cambio de escala.

1.3.4 Auto-afin: un fractal auto-afín solo es auto-similar al expandirse más en una dirección que en otra y requieren un segundo parámetro, llamado TOPOTHESY, que describe la escala en una dirección utilizada para preservar la autosimilitud, el tamaño lateral permanece casi constante mientras que aumenta el tamaño vertical.

1.4 TIPOS DE FRACTALES

Los fractales se pueden clasificar de dos maneras, una como fractales lineales y la otra como no lineales. Los fractales lineales son aquellos que presentan en su geometría un patrón de repetición a cualquier escala de amplificación (auto-similitud exacta), por otro lado se encuentra a los fractales no lineales que son todos aquellos que no presentan un patrón de repetición exacto, pero que pueden presentar cuasi auto-similitud o auto-similitud estadística.

1.4.1 Dimensión fractal

La **Dimensión Fractal** está representada por un número fraccional que sirve para cuantificar o medir el grado de irregularidad de una geometría o de un objeto. Puede estar entre 0 y 1, como el conjunto de Cantor; entre 1 y 2; como el triángulo de Sierpinski; y entre 2 y 3, como las bolas de papel estudiadas en este trabajo.

1.4.2 Relajación de materiales

El estudio de materiales delgados corrugados o arrugados manualmente es muy común ya que al corrugar el material la energía se concentra las líneas y los puntos de intersección y al aplicar una fuerza externa después de comprimido el material se disipa la energía generada, de ahí la importancia de este tipo de análisis.

Cuando una hoja delgada elástica de membrana compleja es comprimida en forma de esfera, los pliegues forman crestas que son imperfecciones irregulares formadas por líneas y puntos de intersección debido a la compresión del material. Las deformaciones plásticas obtenidas presentan un formidable problema para la mecánica debido a que se puede estudiar el comportamiento de estos fenómenos por medio de modelos idealizados que contengan las características esenciales de hojas comprimidas. Todo este estudio es de gran importancia debido al fenómeno que se presenta de disipación de energía, se analiza

la forma de diseñar materiales o mecanismos para estructuras mecánicas así como amortiguar el impacto mecánico en impactos bruscos y repentinos.



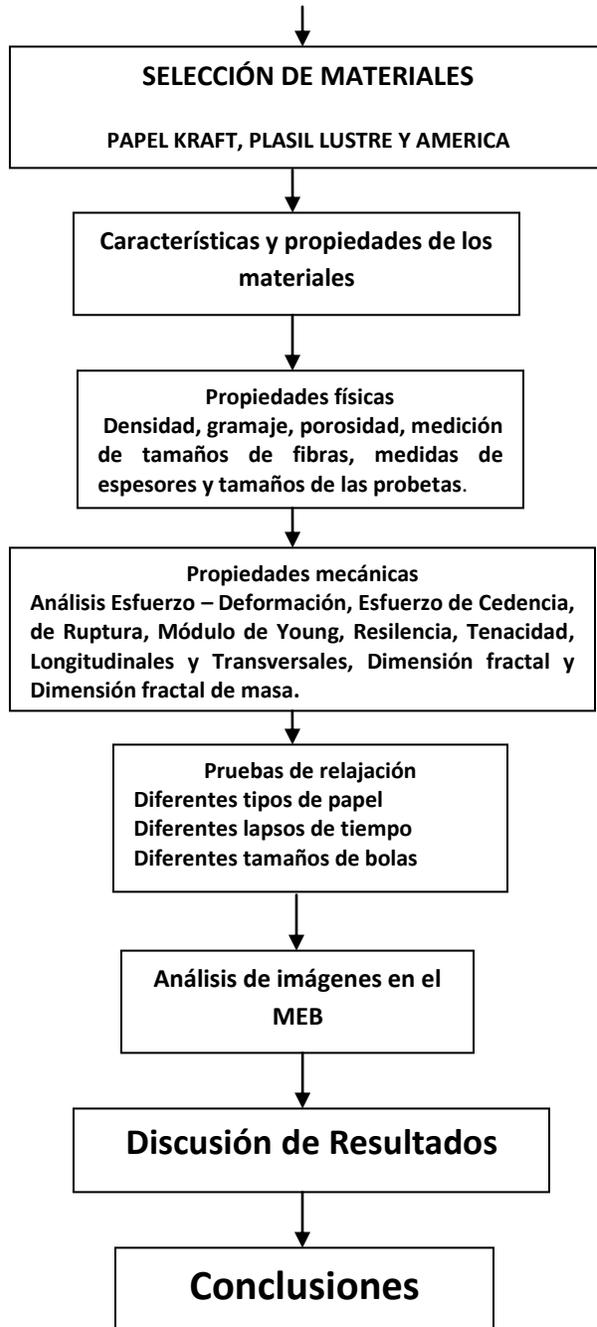
Fig.1 Hoja corrugada manualmente. [46].

La disipación de la energía de las membranas corrugadas ha sido poco investigada, en este caso se analizará a fondo este fenómeno utilizando diferentes métodos de relajación para comprender en cada ejemplo según sea el caso y el tipo de material sus características.

2.-METODOLOGÍA

2.1 Diagrama de flujo.

METODOLOGÍA



2.2 Selección de materiales

La selección de los materiales de membranas complejas, fibrosos y anisotrópicos se definió en utilizar papeles de espesor delgado, por ejemplo: PAPEL KRAFT, PLASIL LUSTRE Y AMERICA.

2.3 Características y propiedades de los materiales

2.3.1 Propiedades físicas

2.3.2 Densidad

La densidad o masa específica (ρ) es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia, también se le denomina, como una medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es la cantidad de masa por unidad de volumen.

2.3.3 Gramaje

Es una medida que se le da al papel en gramos por centímetro cuadrado o metro cuadrado ejemplo: el gramaje del papel plasil es de $75\text{g}/\text{m}^2$ aproximadamente

2.3.4 Porosidad ϕ

Es la cantidad de espacios o pequeños huecos que existen en un material, en el tipo de materiales higroscópicos tiene gran importancia por el tamaño de la partícula del agua que alcanza a penetrar en el material.

2.3.5 Medición de tamaños de fibras

Este análisis se llevará a cabo en el MEB, luego se analizará y medirá en el programa image proplus 7.0 para obtener la porosidad promedio y observar el espacio entre las fibras.

2.3.6 Medidas de espesores

La medida de los espesores es importante en la investigación ya que determinará el área en principio y después para los diámetros de las probetas.

2.3.7 Tamaños de las probetas

El tamaño de las probetas es importante para llevar un orden y observar el escalamiento ($\lambda=10, 20, 40$ y 60) estadístico en cada tipo de papel para el ensayo de relajación.

2.4 Propiedades mecánicas

2.4.1 Análisis Esfuerzo – Deformación: La definición de esfuerzo, se determina como el resultado de la división entre una fuerza y el área en la que se aplica. Se distinguen dos direcciones para las fuerzas, las que son normales al área en la que se aplican y las que son paralelas al área en que se aplican. Las unidades de los esfuerzos son las mismas que para la resistencia de los materiales a utilizar en la estructura, es esencial para inferir los esfuerzos y posibles deformaciones que describen el comportamiento de los miembros estructurales ante la acción de cargas. La presión, fuerza dividida por área, se utilizan con frecuencia: MPa, psi, Kpsi, Kg/mm², Kg/cm².

2.4.2 Esfuerzo de Cedencia F_y : En múltiples aplicaciones el factor que limita la vida útil de un componente no es su fractura, si no que puede ser cierto grado de desgaste o el desarrollo de una grieta de cierto tamaño. El abanico de posibilidades se abre aún más cuando se considera la naturaleza de las sollicitaciones mecánicas que deben de ser soportadas. Éstas pueden ser constantes en el tiempo o variables, en este último caso, la velocidad de variación puede ser reducida o elevada, pueden actuar de forma localizada o distribuida en el material. Y, en este último caso, la distribución de esfuerzos por el acomodo de las fibras en dirección transversal y longitudinal puede ser uniforme o no.

2.4.3 Esfuerzo de Ruptura F_u : Es el esfuerzo basado en la sección original, que produce la fractura del material en este caso que es la grieta, el esfuerzo último que soporta un material en el caso del papel es un valor pequeño comparado con otros materiales, este dato es de importancia para ver cómo se comporta cada material que se indicó. Significa encontrar los momentos y fuerzas inducidas por las cargas que soporta el material.

2.4.5 Módulo de Young E : Es el valor de la pendiente de la parte recta del diagrama esfuerzo v/s deformación. Un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza en este caso se tendrá en sentido longitudinal y transversal. **Material elástico – lineal, Material elasto – plástico , Material no – lineal** los materiales analizados son de forma elasto – plástica. La resistencia de los materiales a utilizar en la estructura, es esencial para inferir los esfuerzos y posibles deformaciones que describen el comportamiento de los miembros estructurales ante la acción de cargas.

2.4.6 Resiliencia UR : Es la capacidad de un material para absorber energía cuando es deformado elásticamente y devolverla cuando se elimina la carga.

2.4.7 Módulo de resiliencia: Corresponde a la energía de deformación por unidad de volumen requerida para deformar el material hasta el límite elástico

2.4.8 Tenacidad T_0 : Tenacidad a la tensión: capacidad de absorber energía en el campo plástico, antes de fracturarse (trabajo de fractura). Se determina como el área bajo la curva esfuerzo- deformación ingenieril. Esta superficie es una indicación del trabajo total, por unidad de volumen que puede realizarse sobre el material sin que se produzca rotura.

2.6 Dimensión fractal de masa

La dimensión de masa (que como se observar es casi idéntica a la definición de dimensión de autosimilaridad). Como escala la masa con el diámetro. Si se determina que el papel tiene una densidad homogénea, entonces, salvo un factor (la densidad), la masa y el volumen son idénticos.

2.7 PRUEBAS DE RELAJACIÓN

2.7.1 Relajación a deformación libre

Este método consiste en medir el aumento del tamaño de la probeta y es posible mediante un micrómetro laser* MITUTOYO ya que mide el diámetro y como aumenta respecto al tiempo que dura la prueba.

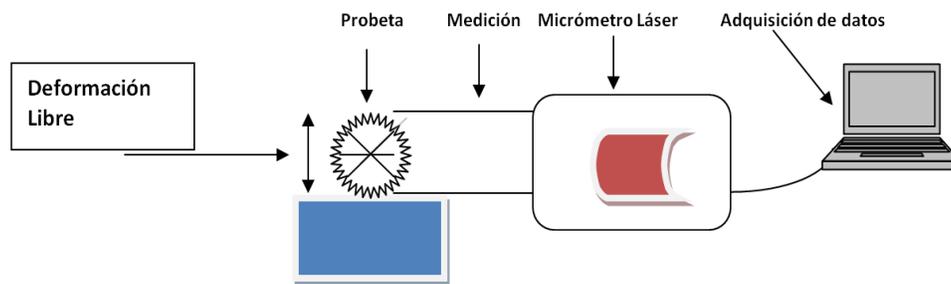


Fig.2 Deformación libre y descripción del ensayo.

2.7.2 Relajación a esfuerzo constante

Este tipo de ensayo es más indicado para pruebas largas es decir para lapsos de tiempos grandes y se observa que la relajación es lenta y constante donde varía el diámetro de la probeta cada determinado tiempo según el tipo de papel y ensayo.

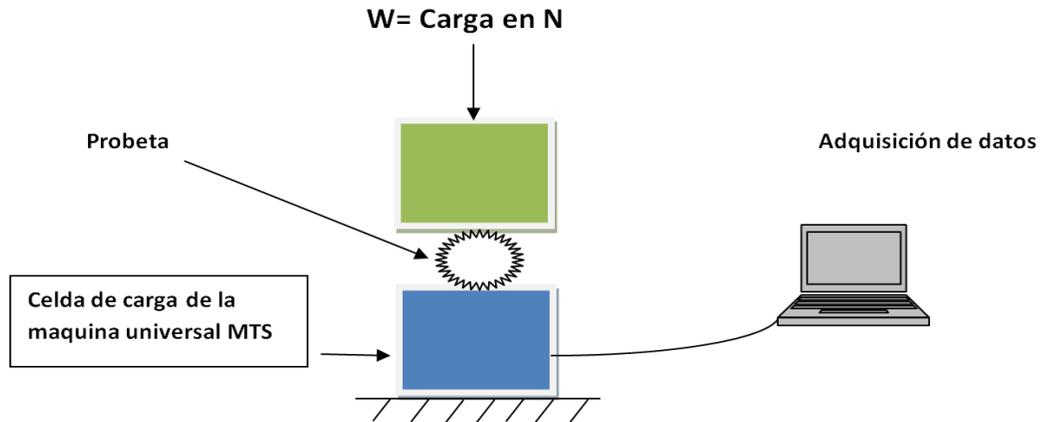


Fig. 3 Relajación a esfuerzo constante (carga no varía)

2.7.3 Relajación a deformación constante

En este caso en específico se mantiene constante la relajación que se encuentra en un dispositivo especial, además se introduce en una cámara cerrada transparente de acrílico para su visualización en donde se puede variar la humedad de forma controlada por que el material es altamente higroscópico.

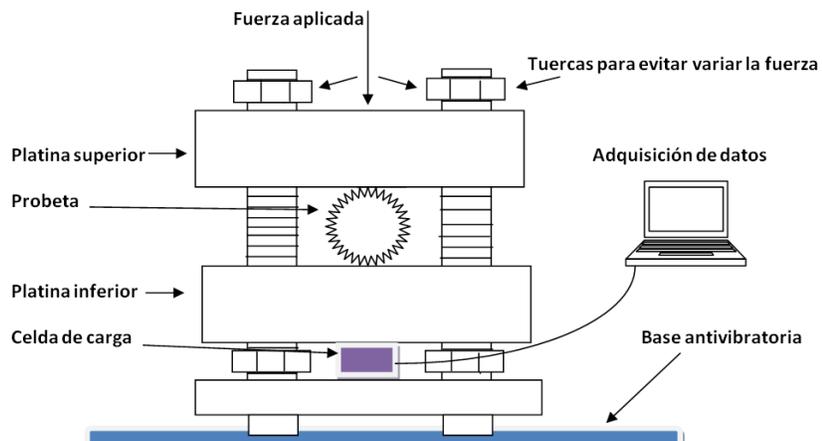


Fig.4 Relajación a deformación contante (se puede variar la temperatura).

3.-DESARROLLO EXPERIMENTAL

La investigación es el análisis de fenómenos científicos fundamentales. En la investigación en ingeniería se desarrollan experimentos y se efectúan mediciones para dar soportes o confirmar argumentos teóricos, las mediciones forman una parte esencial de la ciencia y la

ingeniería, porque las descripciones del mundo físico son imposibles sin ellas. Sin embargo, muchas fuentes contribuyen al error experimental, además de los errores de medición, análisis de muestreo, por ejemplo; se toma como variables la temperatura ambiente, la humedad, tipo y estado de material además en las condiciones que operan los equipos de medición, por estas razones se realizaron varios experimentos bajo las mismas condiciones para obtener resultados precisos.

3.1 Análisis Esfuerzo - deformación

Para medir el esfuerzo frente a la deformación existe una máquina universal de ensayos (MTS-858-5).

Dichas probetas están normalizadas, es decir, han de cumplir unas ciertas normas para que los resultados del ensayo a tracción se puedan comparar y esas normas son las siguientes: la probeta es de sección rectangular longitud calibrada 100mm de forma recta y el área se obtiene $A=W*\text{espesor del papel}$.



Fig. 5 Máquina de ensayos universales MTS-858

3.1.1 Graficas esfuerzo deformación.

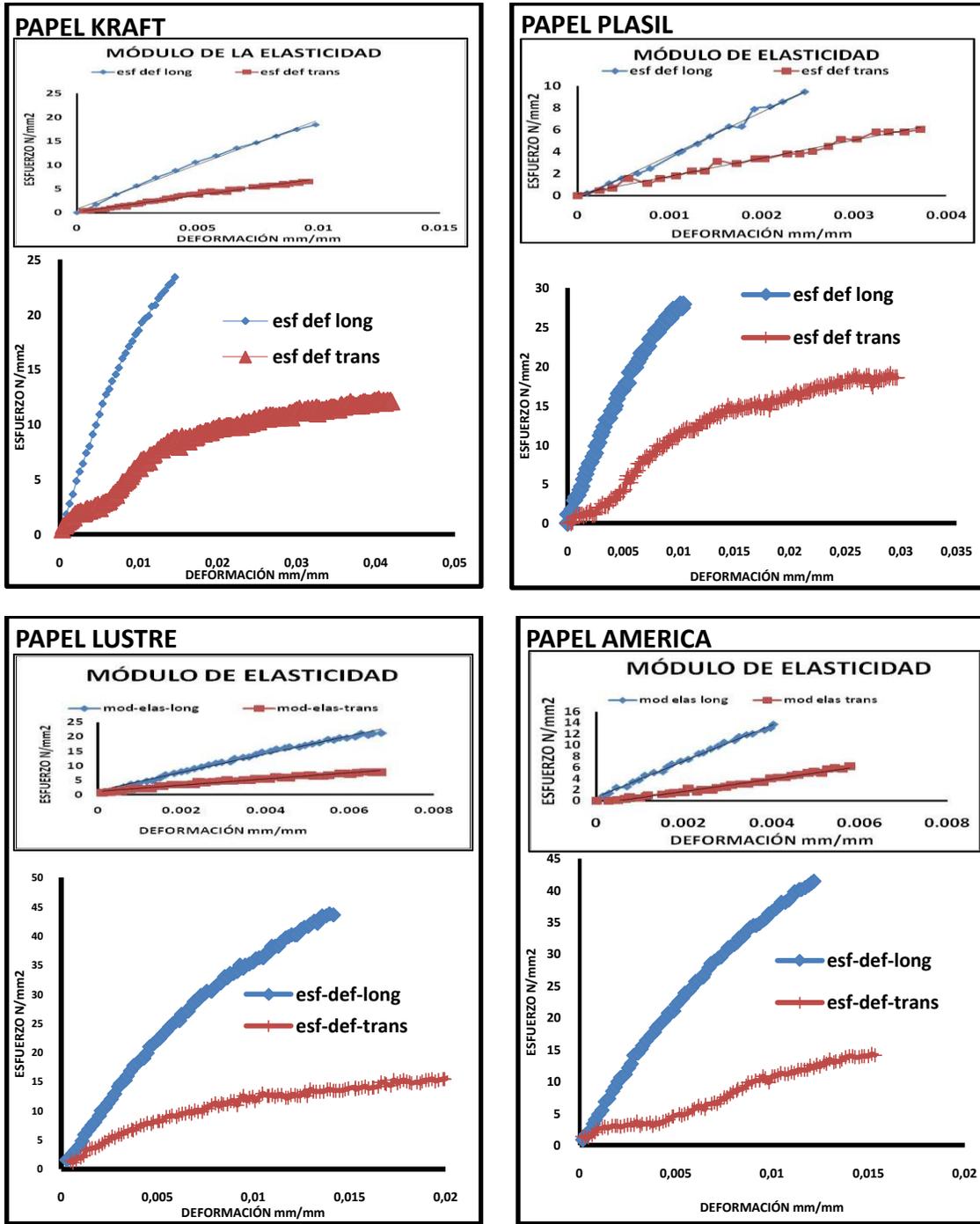


Fig. 6 Esfuerzo – deformación transversal, longitudinal y módulo de Young transversal y longitudinal.

3.1.2 Tabla. 1 Muestra los datos de los papeles ensayados (Kraft, Klasil, Lustre y América). (propiedades mecánicas).

Tipo de papel	Propiedades mecánicas					
	Módulo de elasticidad N/mm ²		Esfuerzo de cedencia N/mm ²		Esfuerzo de ruptura N/mm ²	
	L	T	L	T	L	T
Kratf	1790	612.9	12.6	6.4	26	11.8
Plasil	3276	880.2	24	14	37	23.6
Lustre	3188	1068	30.2	14	47.4	24
América	3471	909	28	12	46	20

3.1.3 Tabla. 2 Datos de Tenacidad y Resilencia.

Tipo de papel	Resilencia J/mm ³		Tenacidad J/mm ³	
	L	T	L	T
Kraft	0.945	0.131	0.670	0.130
Plasil	0.21	0.144	1.039	0.432
Lustre	0.211	0.14	0.836	0.679
América	0.258	0.096	1.071	0.107

3.1.4 Tabla. 3 Medidas de espesor, densidad.

Tipo papel	Kratf	Plasil	Lustre	América
Espesor t (mm)	0.142	0.077	0.096	0.104
Densidad ρ (gr/m ²)	83	75	78	80

3.2 Análisis de microscopia electrónica de barrido en papel.

El propósito de este análisis es observar las fibras, las microfibras, además del tamaño de las mismas así como sus huecos y poros internos de las fibras para observar que formas y propiedades tienen al respecto diferente o similar en los papeles escogidos en la investigación. Además de cómo afecta la humedad la temperatura y todas las variables que se puedan observar en este análisis.

En fibras naturales el Microscopio Electrónico de Barrido se utiliza para examinar:

- Detalles superficiales de fibras
- Modificaciones en las formas de las fibras o en detalles superficiales
- Dañado de fibras
- Construcción de tejidos y microfibrillas
- Fractografía de fibras rotas por diferentes causas
- Fractografía de fibras expandidas o ensanchadas por la humedad (Higroexpansividad)
- Dimensiones de características de fibras desde diferentes ángulos

3.2.1 Análisis de Absorción de agua

La cantidad de agua que puede absorber un papel dependerá de los tipos de fibras que lo constituyan (largas o cortas), del proceso de fabricación y de los ingredientes no fibrosos, como las cargas y los encolantes. De hecho, el agua puede ser absorbida por el papel, a nivel físico, en dos formas: una es por efecto capilar, penetrando entre las fibras y fibrillas, mientras que la otra se presenta cuando el agua se aloja en los huecos o poros grandes que existen entre las fibras, saturando todos los espacios disponibles. Cabe aclarar que el papel puede contener humedad entre las fibras y dentro de ellas y que para regular la absorción de agua del papel, el tamaño de la partícula de agua es de 0.001 micras que alcanza a penetrar en el poro.

El papel es un material altamente poroso, como se puede ver por su peso específico bajo, comparado con el de la celulosa, su principal componente. El peso específico del papel, de 0.5 a 0.8 g/cm³, es bastante menor que el de la celulosa, de 1.5. La porosidad se puede definir como la relación entre el volumen del espacio ocupado por aire en un papel y su volumen total.

El contenido de aire, en papeles comunes suele ser del 50% y puede llegar hasta un 70%. Este aire se encuentra en el papel, en 3 formas: 1) poros reales que son aberturas que

atraviesan la hoja, 2) poros superficiales que sólo están conectados con una de sus superficies y 3) huecos que contienen aire en el interior de la hoja. Existen estudios en los que se ha determinado que el volumen de poros reales en un papel común es solamente de un 1.6% del total del volumen de aire que contiene, correspondiendo el resto a los poros superficiales, que no atraviesan la hoja y a huecos en su interior. La porosidad es una propiedad muy importante; sin embargo, se le determina al papel muy pocas veces y sólo en estudios de laboratorio.

La porosidad de un papel depende de su composición y de su estructura, por lo tanto, depende tanto de los materiales empleados como de la forma en que ha sido fabricado. Entre las operaciones que influyen especialmente se encuentran: refinación, encolado, prensado y calandrado. Es evidente que un papel al ser recubierto, reducirá considerablemente su porosidad, debido a que el recubrimiento de la superficie, tapa los poros y a que sufre una compresión alta.

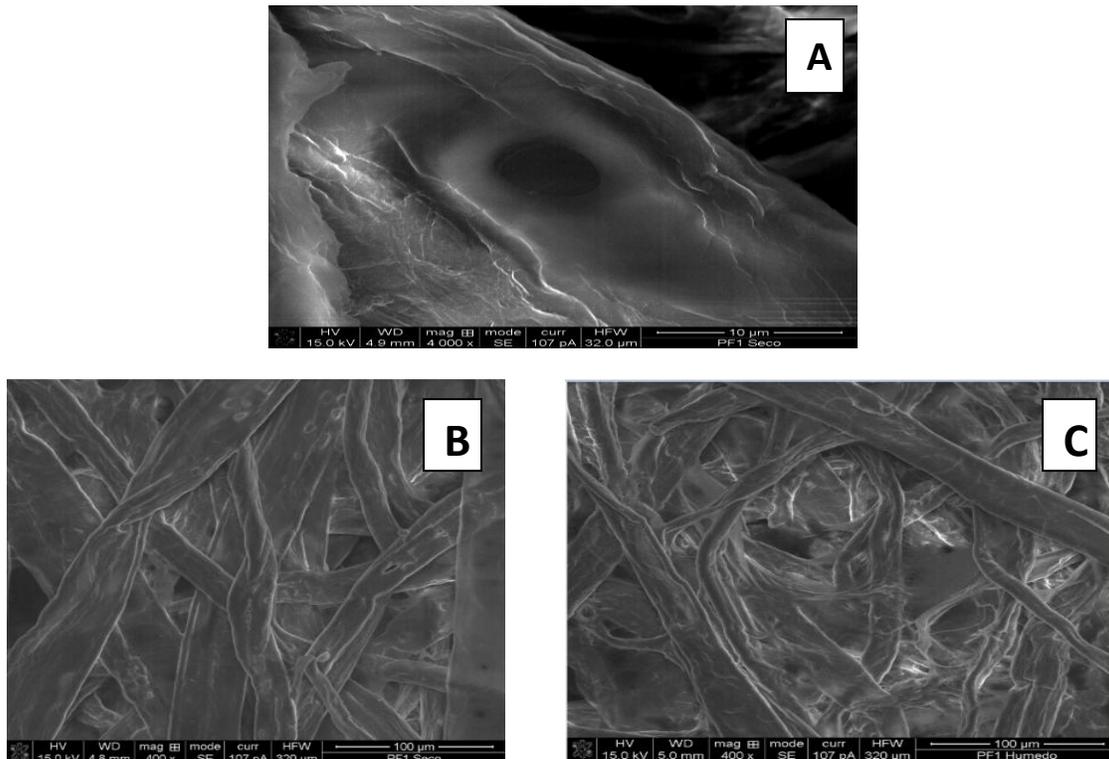


Fig. 7 A).-Análisis de microscopía de poros a 4000X con humedad del 35% de papel Kraft.
B).- Análisis de los huecos entre las fibras a 400X con 35% de humedad de papel Kraft.
C).- Análisis de los huecos entre las fibras a 400X con 99% de humedad de papel Kraft.

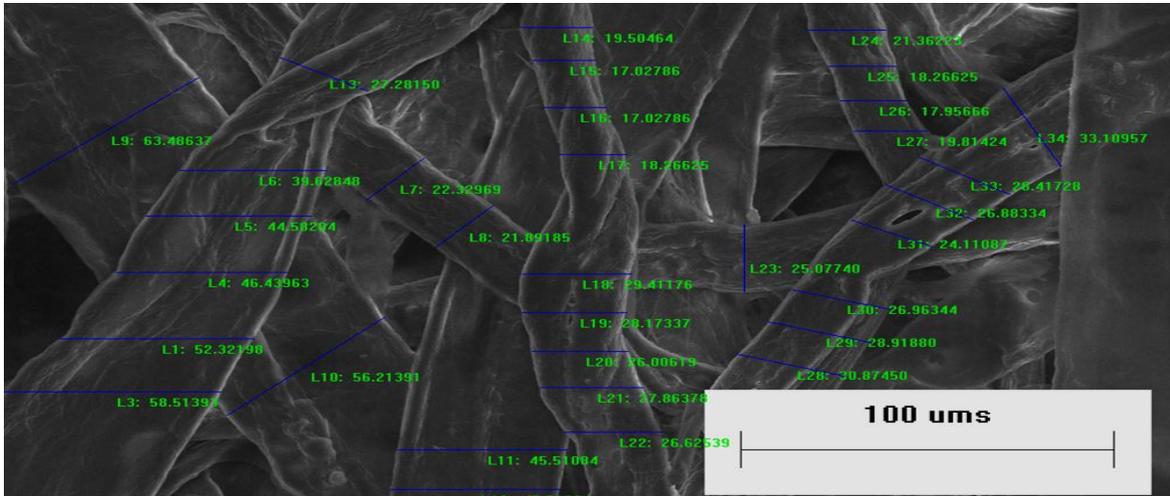


Fig. 8 Fotos en SEM de fibras de papel Kraft a una temperatura de 19 °C y una humedad del 35% a una distancia de trabajo de 4.8 mm y a 400X el (CNMYNT IPN) donde se examina que dentro de las fibras se observan poros, mismos que se encuentran distribuidos en diferentes partes de las fibras, en el arreglo de las fibras se observan espacios entre las mismas.

En la siguiente sección de esta investigación consiste en la caracterización fractal y mecánica de los materiales, que se presentan en los materiales; ejemplos, rugosidad, elasticidad y recuperación del material. Este trabajo se presenta dentro del marco de las líneas de investigación de materiales plexoplegables en los que se manejan materiales y papeles de diferentes tipos para su análisis. En esta parte se da a conocer una enfocada experimentación del comportamiento de los fenómenos, que ocurren en diferentes materiales en los que se utilizan en dicha investigación, en cada una de las pruebas por ejemplo en los ensayos de relajación tanto en la máquina universal (materiales sujetos a relajación) como en el micrómetro laser (el papel).



Fig. 9.-Ejemplo de papel aluminio arrugado (46).

Los estudios realizados sobre membranas arrugadas se han ido incrementando a través del tiempo cada vez en mayor escala. Las técnicas utilizadas para el análisis de este fenómeno se han ido perfeccionando día con día para obtener mejores resultados. El proceso de arrugado en membranas delgadas (papel, aluminio, cobre, etc.) es un fenómeno complicado de analizar; sin embargo, existen técnicas (geometría fractal) capaces de analizar y comprender el comportamiento de dicho fenómeno.

3.4 Análisis de la dimensión fractal de masa

En el este paso se realizó la estimación de la dimensión fractal de masa D_m , de las bolas de papel. Recuérdese que estas fueron construidas a partir de hojas cuadradas (planas), cuya dimensión topológica es 2, como se observará más adelante. Las bolas casi esféricas tienden a formar un volumen con dimensión topológica de 3. Sin embargo, las bolas generadas no tienen exactamente una dimensión topológica de 3, debido a que cada una de ellas contiene una gran cantidad de poros, donde el papel no llena todo el volumen de la esfera. Considerando lo anterior se puede estimar la dimensión fractal de masa con la relación existente entre sus diámetros y sus masas. Para este efecto los diámetros fueron calculados de la siguiente manera: El diámetro y la desviación estándar promedios de cada bola fueron determinados por la ecuación 1 y 2 respectivamente. Donde las dimensiones de los diámetros fueron tomadas aleatoriamente en $n = 15$ direcciones diferentes de la bola. Los datos promedios obtenidos se presentarán en tablas.

$$\overline{R_j(L)} = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_i^n R_i \quad (1)$$

Donde R_i , es el diámetro de la bola de papel; n , representa el número de direcciones en que se midió el diámetro de las bolas de manera aleatoria $\overline{R_j(L)}$, representa el diámetro promedio de la muestra.

$$\sigma_s \propto \left(\frac{1}{\sqrt{n}}\right) \left[\sum_i^n (R_i - \overline{R})^2\right]^{1/2} \quad \text{Donde } \sigma_s \text{ es la desviación estándar. } (2)$$

Como se describió anteriormente la dimensión fractal Dm , se obtendrá de un análisis estadístico de los diámetros con las masas de los diferentes tamaños de papel, obtenidas en el laboratorio y descritas, para estos experimentos.

$$M \propto R^2 \quad (3)$$

Donde $M = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3$ es la masa de la hoja, ρ es la densidad del material, R es el diámetro de la bola y Dm es la dimensión fractal de masa.

Para poder estimar la dimensión fractal de masa de las probetas se graficó la masa y el diámetro promedio de cada probeta como se muestra a continuación, posteriormente mediante una regresión lineal se obtuvo la línea de tendencia que mejor se ajustó a los datos experimentales y esa fue una relación potencial, la pendiente de la misma es la dimensión fractal o fraccional de masa de las probetas. Como se mencionó anteriormente la dimensión fractal de las probetas debería estar entre 2 y 3, efectivamente se corroboró que la dimensión fractal de masa de las esferas esta dentro del parámetro preestablecido.



Fig. 10 Medidas de los diámetros de las probetas.



Fig.11.- Pesaje de la probeta

Tabla 4. Medidas de la probeta para la obtención de la Dimensión fractal de masa (papel Kraft).

PROBETAS (20 P/BOLA)	TAM. DE HOJA mm LxL(cuadrada)	DIAM. mm	PROM	DESV. STD.	MASA grs.	DESV. STD.
BOLA 1	100 x 100	31.1305		0.31	0.85106	0.02
BOLA 2	200 x 200	53.6447		0.43	3.44752	0.01
BOLA 3	400 x 400	94.807		1.29	13.8252	0.02
BOLA 4	600 x 600	114.99		2.13	28.6197	0.02

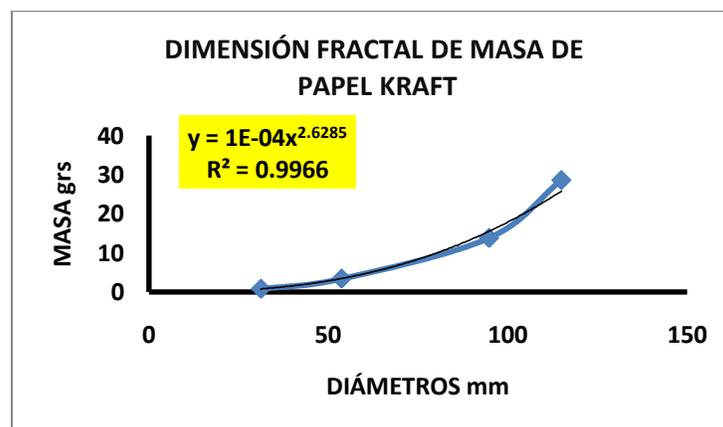


Fig. 12 Obtención de la dimensión fractal de masa para el papel Kraft.

Tabla 5. Medidas de la probeta para la obtención de la Dimensión fractal de masa (papel Plasil).

PROBETAS (20 P/BOLA)	TAM. DE HOJA mm LxL(cuadrada)	DIAM. PROM mm	DESV. STD.	MASA grs.	DESV. STD.
BOLA 1	100 x 100	29.439	0.26	0.63294	0.02
BOLA 2	200 x 200	51.4902	0.38	2.4592	0.02
BOLA 3	400 x 400	93.382	1.21	9.4329	0.01
BOLA 4	600 x 600	111.35	2.001	20.2356	0.01

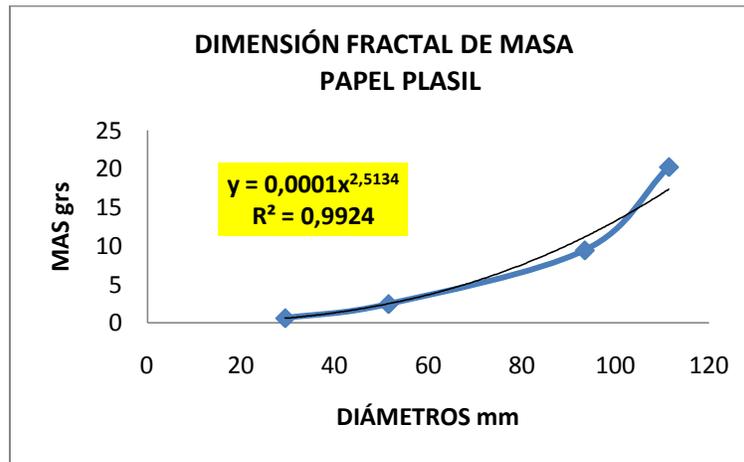


Fig. 13 Obtención de la dimensión fractal de masa para el papel Plasil.

Tabla 6. Medidas de la probeta para la obtención de la Dimensión fractal de masa (papel Lustre).

PROBETAS (20 P/BOLA)	TAM. DE HOJA mm LxL(cuadrada)	DIAM. PROM mm	DESV. STD.	MASA grs.	DESV. STD.
BOLA 1	100 x 100	30.0943	0.28	0.82381	0.03
BOLA 2	200 x 200	52.436	0.36	3.2548	0.02
BOLA 3	400 x 400	92.3916	1.16	12.753	0.01
BOLA 4	600 x 600	113.548	2.23	28.0345	0.03

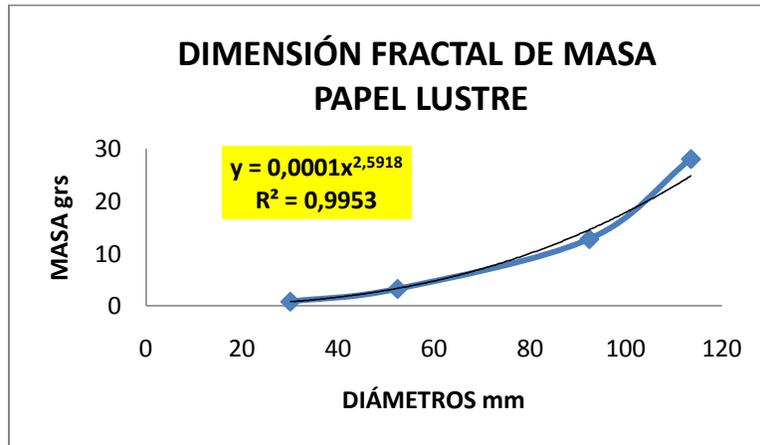


Fig. 14 Obtención de la dimensión fractal de masa para el papel Lustre.

Tabla 7. Medidas de la probeta para la obtención de la Dimensión fractal de masa (papel América).

PROBETAS (20 P/BOLA)	TAM. DE HOJA mm LxL(cuadrada)	DIAM. PROM mm	DESV. STD.	MASA grs.	DESV. STD.
BOLA 1	100 x 100	31.003	0.32	0.84283	0.02
BOLA 2	200 x 200	52.3429	0.38	3.3392	0.01
BOLA 3	400 x 400	92.843	1.03	12.6359	0.02
BOLA 4	600 x 600	113.7	1.94	27.349	0.02

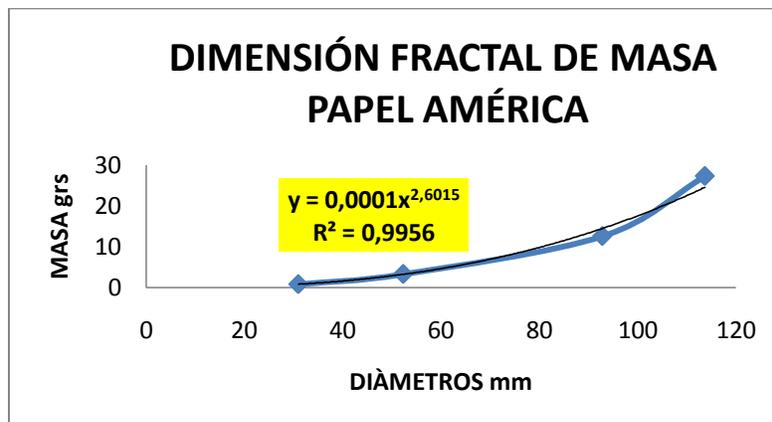


Fig. 15 Obtención de la dimensión fractal de masa para el papel América.

Tabla. 8 Dimensión fractal de masa de los diferentes papeles

TIPO DE PAPEL	DIMENSIÓN FRACTAL DE MASA PROMEDIO	DESV. STD.
KRAFT	2.6285	0.06
PLASIL	2.5332	0.04
LUSTRE	2.7156	0.09
AMÉRICA	2.4954	0.08

3.5 Relajación constante

Cuando las hojas de papel son comprimidas hasta convertirlas en esferas, trae como consecuencia una red de dobleces permanentes, formados durante el proceso de arrugamiento al ser precomprimidas de forma manual, se dejan reposar en un lapso considerable de 1 a 3 días para después someterlas a la relajación constante en la maquina universal. El diámetro de las probetas de papel aumenta luego de la compactación a las que fueron sometidas, ya que existe una relajación de la deformación por lo que se tomaron medidas del incremento del diámetro en función del tiempo en diversos lapsos para conocer a detalle la relajación constante a las que están sometidas las probetas en los 4 diferentes papeles.

Manteniendo la siguiente relación de escalamiento:

Donde, L es el tamaño de la hoja (en cm) para el factor de escalamiento, $\lambda=10, 20,40$ y 60 ; y $L_0= 10$. Estas probetas fueron arrugadas y comprimidas manualmente de forma aleatoria hasta obtener una forma esférica con un diámetro aproximado $R(L)$, como se muestra a continuación:



Fig. 16 Conjunto de bolas de papel arrugadas y comprimidas manualmente con tamaños.

Conforme la hoja es más arrugada, las arrugas están más colapsadas, como las que están en la misma bola confinada y el número incrementa, conforme se encuentran pequeñas arrugas en el límite.

$$(\delta \propto D^2) \cdot L \dots \dots \dots \text{Ec. 4}$$

Una relación de escala es deducida entre la energía almacenada y el tamaño de la rugosidad resultante

$$E \propto D^2 \dots \dots \dots \text{ec. 5}$$

Esta predicción asume que las fuerzas resistentes de la rugosidad son conservadas.

La deformación de las bolas que sufren en la prueba de relajación se define con la siguiente relación de decremento logarítmico.

En donde una fuerza aplicada controlada, la platina establece una nueva altura ayudando a la rugosidad comprimiendo abajo de la misma, aunque este comportamiento no es tan simple como la fuerza esperada en esta prueba, **h** continua decreciendo después la fuerza aplicada durante la prueba.

$$h = a - b \log (t/\text{seg}) \dots \dots \dots \text{Ec. 6}$$

Donde **a** y **b** son constantes esto después del lapso de 24 horas de iniciada la prueba la platina no alcanzara su altura asintótica.

El diámetro de las esferas o probetas arrugadas aumenta conforme avanza el tiempo durante la prueba inmediatamente después de comenzada la misma, ya que existe una relajación a la deformación y puntos de inflexión donde se presentan cambios en la velocidad de deformación, se muestra el incremento del diámetro en las probetas para los diferentes tipos de papeles después de comprimirse los mismos, cada pieza de papel es arrugada manualmente y sometida a una carga en una máquina universal inmediatamente se mide su diámetro inicial ya que en ese preciso momento empezó la relajación y el diámetro se incrementa continuamente hasta liberar el máximo de energía registrable en la máquina.

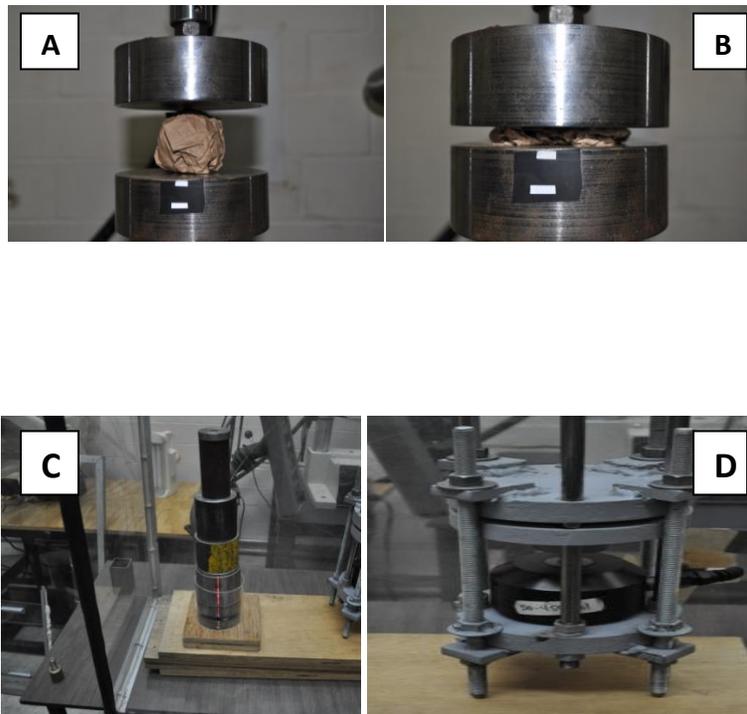


Fig. 17 A y B).- Dispositivo de la máquina MTS-858-5 a esfuerzo constante. C).- Dispositivo de carga aplicada a esfuerzo constante. D).-dispositivo de relajación a deformación constante.

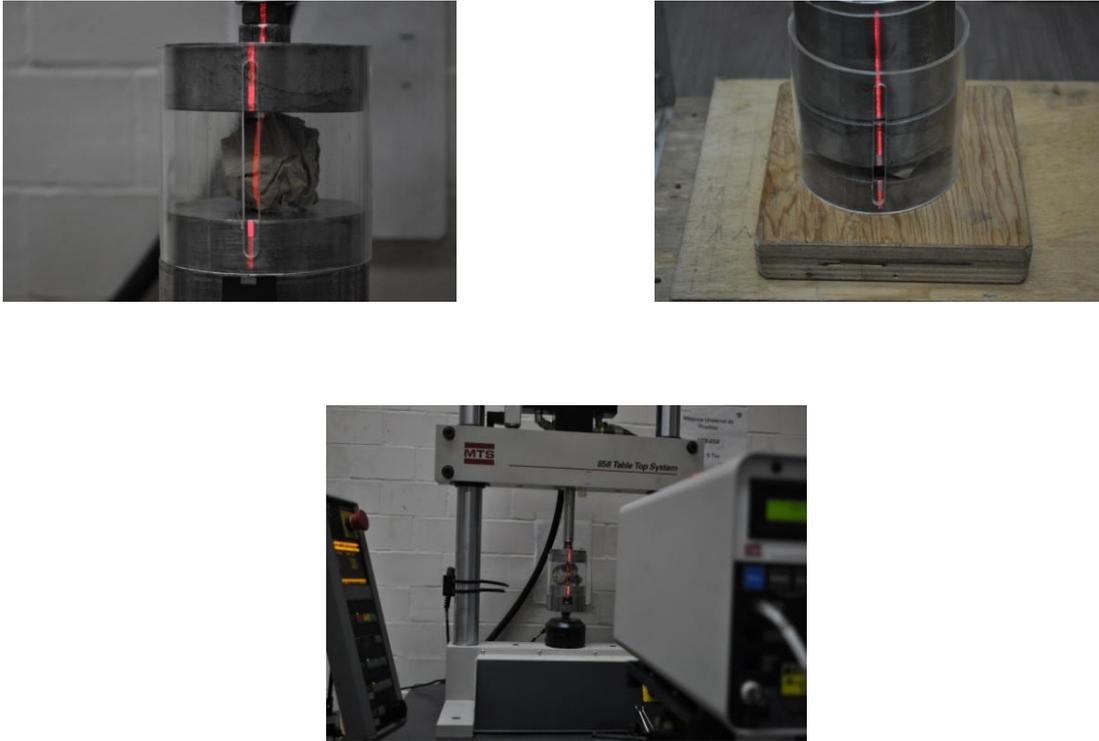


Fig. 18 Medidas de diámetros del ensayo de relajación en el extensómetro láser.

4.- Análisis de Resultados

El fin de este análisis es examinar el fenómeno de la relajación constante de los distintos materiales mencionados después de comprimir las probetas por medio de una carga axial controlada, después se examinan las variaciones de las deformaciones elasto-plásticas en función de carga vs tiempo.

Cuando las hojas de papel son comprimidas hasta convertirlas en bolas, trae como consecuencia una red de dobleces permanentes, formados durante el proceso de arrugamiento al ser comprimidas en forma manual de manera instantánea, debido a que los dobleces formados se almacena energía, aplicada al comprimirlas misma que empieza a disiparse, lo que provoca la relajación en las bolas corrugadas.

Los resultados obtenidos sugieren que los valores de los exponentes de escalamiento de las probetas arrugadas manual y aleatoriamente son similares en los diferentes tipos de materiales.

El análisis de ensayo de relajación es realizado con la finalidad de examinar diferentes materiales, para explicar las propiedades que pueden ser aprovechadas en el estudio de mecánica de materiales, pues actualmente no se cuentan con datos normalizados para este tipo de ensayos.

Como se observa la relajación es instantánea solo después de haber comprimido la esfera corrugada, el tiempo total de las mediciones clasificadas por tipo y tamaño de bola por separado fue de 1 día ($t=24$ horas) debido a que fue el tiempo necesario para nuestro análisis para observar la disipación de la energía, la figura que se presenta a continuación se observa la relajación.

Los datos obtenidos durante las mediciones en la celda de carga y higrómetro digital definen los incrementos del diámetro y la variación de la temperatura y la humedad.

4.1 Análisis de relajación a deformación constante de papel Kraft, Plasil, Lustre y América.

Para cada tipo de papel se hizo una gráfica, y se tomó una regresión lineal de aumento de carga contra tiempo y se encontraron los modelos matemáticos que determinan el fenómeno de la relajación de las bolas corrugadas de los papeles.

La deformación de las superficies corrugadas en las bolas de los 4 tipos de papeles es determinada por una expresión logarítmica.

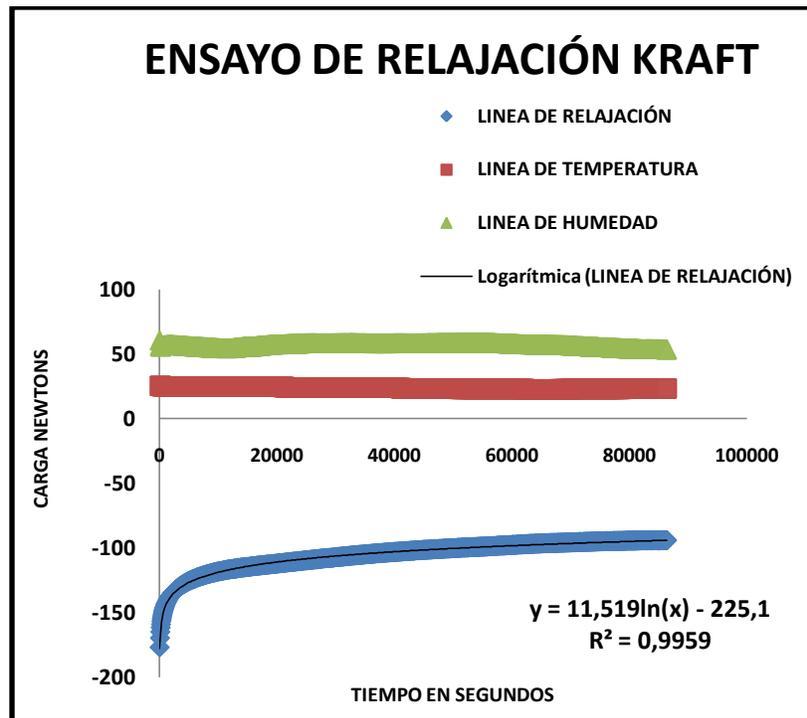


Fig.19 Análisis de la relajación constante con humedad y temperatura (papel kraft).

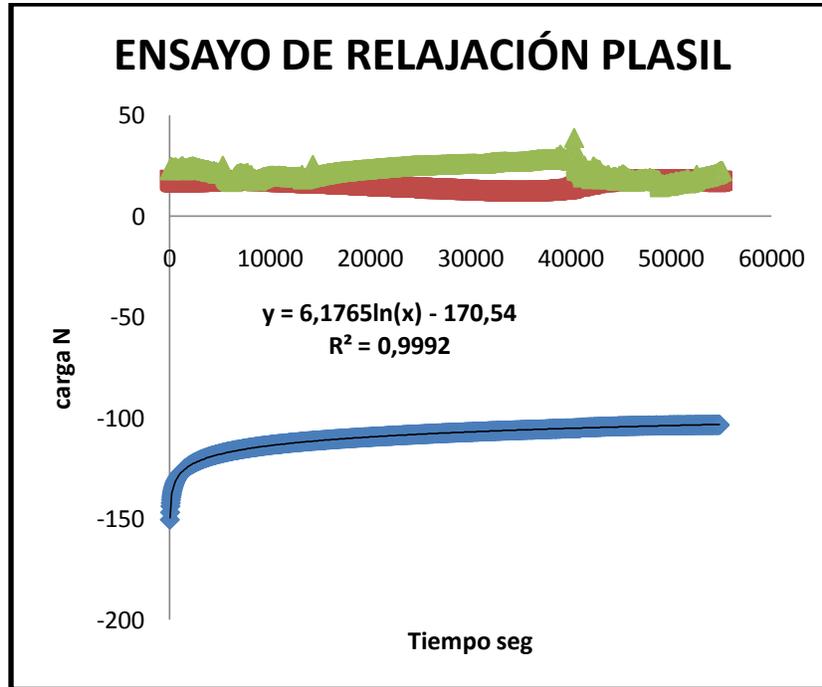


Fig. 20 Análisis de la relajación constante con humedad y temperatura (papel Plasil).

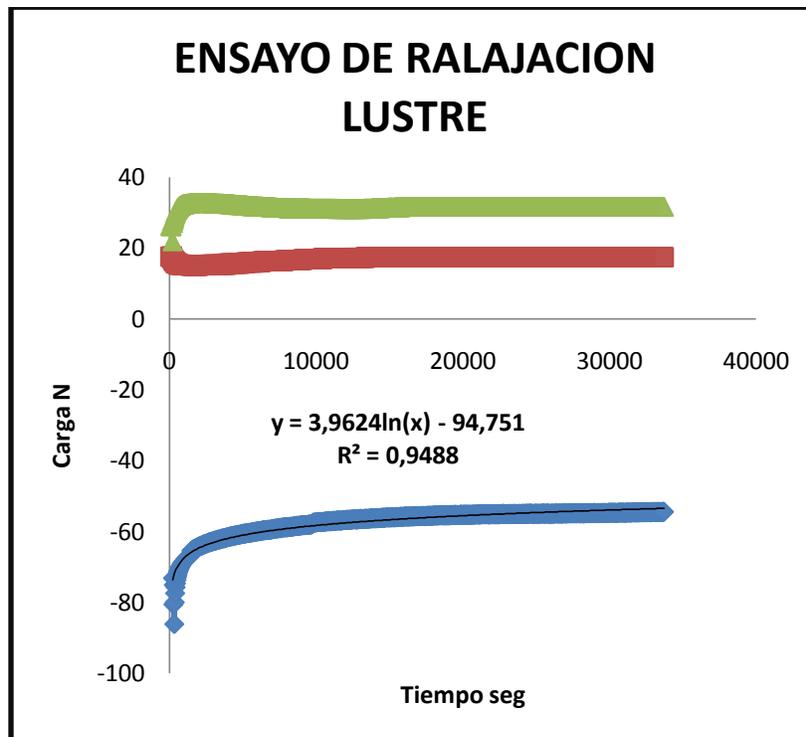


Fig. 21 Análisis de la relajación constante con humedad y temperatura (papel lustre).

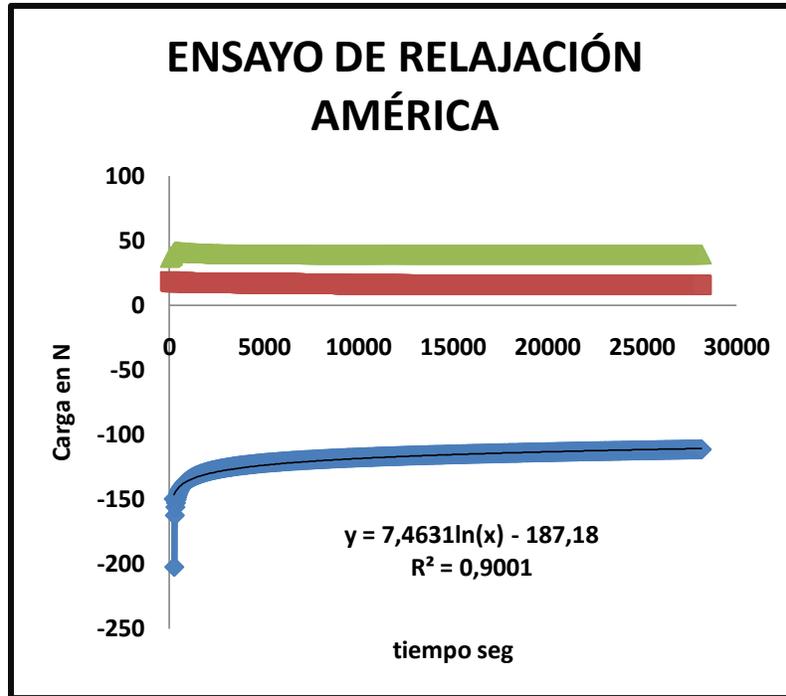


Fig. 22 Análisis de la relajación constante con humedad y temperatura(papel américa).

La altura de las bolas de papel incrementan después de la relajación constante (a compresión) en la máquina universal e incrementan una relación logarítmica diferente, según el tipo de probeta, papel Kraft,papel Plasil, papel Lustre y papel América respectivamente como se muestra a continuación.

Ecuación	A	B	
$\xi_1= 11.519 \ln (t) + 225.1$	11.519	225.1	Ec. (7)
$\xi_2= 6.1765 \ln (t) + 170.54$	6.1765	170.54	Ec. (8)
$\xi_3= 3.9624 \ln (t) + 94.751$	3.9624	94.751	Ec. (9)
$\xi_4= 7.4631 \ln (t) + 187.18$	7.4631	187.18	Ec. (10)

En los análisis donde se introduce vapor para aumentar la humedad inicial de 50% hasta una humedad de casi el 99% se examina el comportamiento de la relajación y se determina que influye la humedad en la relajación contante observándose unos picos tanto en la línea humedad como en la línea de la relajación a esfuerzo constante.

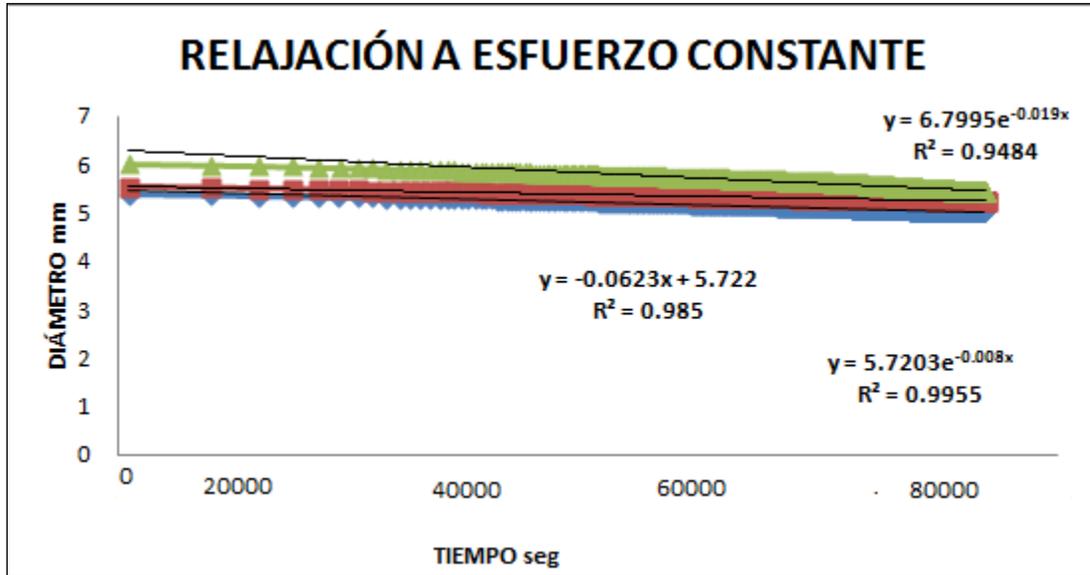


Fig. 23 Ensayo de relajación con humedad y temperatura.

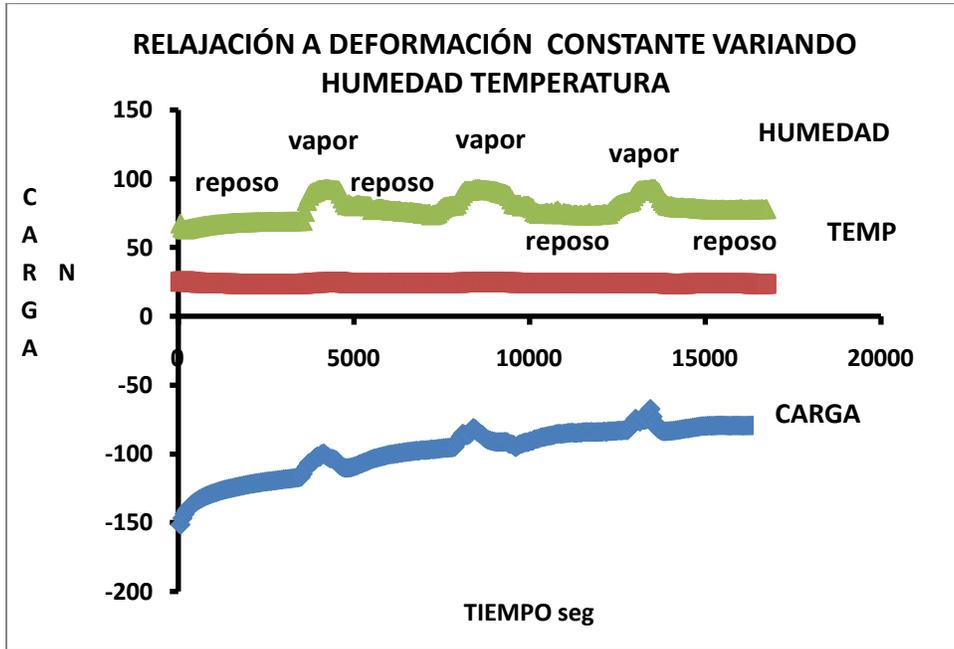


Fig. 24 Ensayo de relajación variando la humedad y temperatura controladas.

4.2 Relajación libre.

Este tipo de relajación es diferente que el de la maquina universal pero la regresión lineal es diferente como se muestra a continuación, papel Plasil (a), papel Kraft(b) y papel América (c).

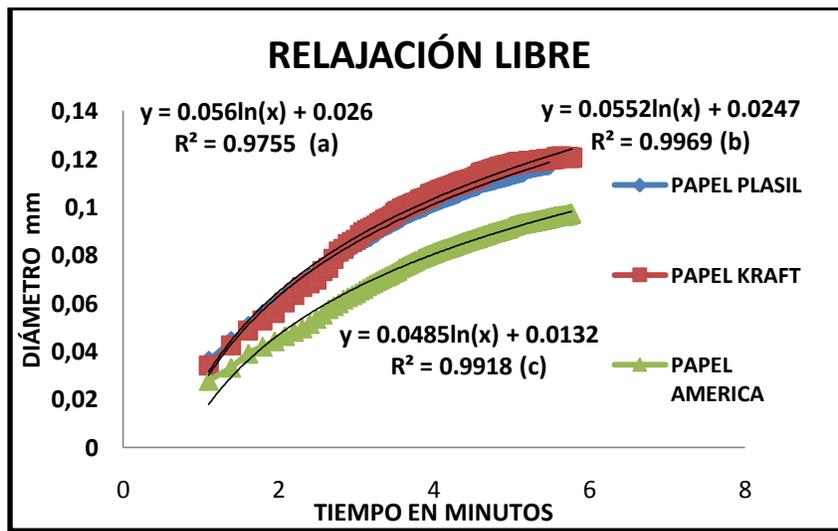


Fig.25 Relajación con mediciones del micrómetro laser.

Conclusiones

Los resultados muestran que la respuesta a los dobleces tiene una liberación de energía almacenada después de haber comprimido la probeta manualmente.

Se observa el comportamiento del material cuando se disipa la energía almacenada cambiando la línea de relajación conforme avanza el tiempo. Se obtuvo la grafica carga vs tiempo dentro de la cual se observa una relajación lenta debido al comportamiento elástico y plástico del material.

La relación contante en la maquina universal es similar al micrómetro láser ambas tiene un comportamiento logarítmico similar como se aprecia en las diferentes regresiones lineales después del tiempo en que se realizó la experimentación.

La deformación se estabiliza para todas las superficies arrugadas independientemente de las propiedades del material a diferencia cuando se le aplica humedad al análisis donde hay un cambio brusco (picos ó sobresaltos en las líneas de relajación y de humedad).

Se encontró la dimensión fractal de masas en todas las bolas arrugadas aleatoriamente, se determina por la ley de potencias. La dimensión fractal de masa, encontrada para cada tipo de papel.

la importancia de este fenómeno radica en el uso de la geometría fractal, esta es adecuada para caracterizar la distribución del fenómeno de relajamiento dentro de un amplio intervalo de escalas, como método de resolución para analizar el comportamiento complejo que se presenta en las bolas de papel arrugadas, una vez planteado el modelo matemático, se puede determinar las tendencias del comportamiento estimando los resultados obtenidos en los ensayos de relajación de las bolas corrugadas.

Finalmente se concluyo que el material aunque sea anisotrópico aleatorio y además fibroso, proporciona una buena alternativa para el desarrollo de modelos físicos que describan mejor el comportamiento de nuevos materiales y configuraciones geométricas y estructurales, que permitan que se obtengan medios de disipación de energía mecánica a problemas de impacto y/o fatiga en sistemas mecánicos estructurales.

RECOMENDACIONES

- **Trabajar con diferentes papeles que sean metálicos o de otro tipo para analizar cómo se comportan papel cobre, aluminio latón y papeles acerados.**
- **Analizar las ventajas de trabajar en un laboratorio totalmente sellado donde las variables como humedad temperatura sean más controladas.**
- **Trabajar en una plataforma antivibratoria, para evitar movimientos y vibraciones desde la base de la estructura.**

BIBLIOGRAFÍA

- 1.- Mandelbrot, B., "how long is the coast at Britain?" , science, 155,636 (1967).
- 2.- Peitgen, H.O. y P.H. Richter, "The beauty of Fractals". Springer – verlag. Alemania, 1986
- 3.- Mandelbrot, B., "An Interview", Omni, 5 febrero 1984.
- 4.- Sander. L.M. "fractal Growth", Scientific American 256 (1) 94 (1987).
- 5.- Bak, P. y K. Chen. "self-Organized Criticality", Scientific American 264 (1) 26 (1991).
- 6.- Peterson, I. The Mathematical Tourist. W. H. Freeman And Company. New York, 1988.
- 7.- Dewney, A. K. "computer recreations", Scientific American, 253 (2) 16 (1985); 255 (6) 14 (1986); 257 (1) 108 (1987); 257 (5) 140 (1987); 262 (5) 90 (1990)
- 8.- Jürguens. H., H. O. Peitgen y D. Saupe, "The Language of fractals" Scientific American 263 (2) 40 (1990).
- 9.- Ford, J. "What is chaos, that we should be mindful of it?" , The new Phisycs,. Paul Davies (compilador), Cambrige University Press, Gran Bretaña. 1989.
- 10.- Rietman, E., Exploring The Geometry Of Nature, Windcrest Books EUA, 1989.
- 11.- Efecto del almidón catiónico en la resistencia a la tracción de papel. Howard, R.C., Jowsey, C.J. UMIST, United, Kingdom.1994.
- 12.- Adsorción de almidón catiónico de las fibras de pasta mecánica, Wågberg, L., Kolar, K. SCA Research AB, Box 3054, 850 03 Sundsvall, Sweden.1970.
- 13.- Efecto del almidón sobre las propiedades de los documentos de madera triturada Laleg, M.L., Pikulik, I.I., Ono, H., Barbe, M.C., Seth, R.S. Pulp and Paper Research Inst of, Canada, Canada.1996.
- 14.- Un nuevo sistema de micropartículas para mejorar la retención, drenaje en la fabricación de papel fino Brouillette, F.a , Morneau, D.a , Chabot, B.b , Daneault, C.c LPM Technologies Inc., 795 rue Craig, St-Nicolas, Què. G7A 2N2, Canada.1996.
- 15.- Relajación de papel mojado por simulaciones y experimentos a escala de laboratorio Miettinen, P.P.J.a , Kekko, P.b , Kouko, J.c Department of Physics, University of Jyväskylä, P.O. Box 35 (YFL), FI-40014, Finland.1970.

16.- propiedades de dimensiones de las estructuras de papel.Green, C. Xerox Corporation, Webster, NY 14580, United States.1980.

17.- Una vista de la fluencia acelerada y la tensión residual: Acelerar la fluencia por calentamientoGreen, C. 23 Maryvale Drive, Webster, NY 14580, United States

18.- DESCALCIFICADOR TERMAL DE HUMEDAD-DEPENDIENTES DE PAPEL, evaluado por su módulo de elasticidad. Salmen, N.Lennart, Back, Ernst L. Florida Atlantic Univ., PO Box 3091, Boca Raton, FL 33431-0991, United States.1984.

19.- La influencia de la heterogeneidad en práctica acelerada fluencia a la tracción en papel Coffin, D., Habeger, C.C. Institute of Paper Sci./Technology, 500 10th St. NW, Atlanta, GA 30318-5794, United States Coffin, D.; Instituto de Sci. Libro / Tecnología, 500 10o St. NW, Atlanta, GA 30318-5794, Estados Unidos, correo electrónico: @chuck.habeger ipst.edu © Copyright 2004 Elsevier Science BV, Amsterdam. Todos los derechos reservados.

20.- La influencia de secado restricciones y superando el grado de tensiones residuales en la acumulación de cartón Östlund, M.a , Östlund, S.a , Carlsson, L.A.b , Fellers, C.c KTH Solid Mechanics, Osquars backe 1, SE-10044 Stockholm, Sweden. STFI, PO Box 5604, SE-11486 Stockholm, Sweden.1995.

21.- Z-DIRECCIÓN VARIACIÓN DE TENSIÓN INTERNA Y PROPIEDADES EN PAPEL. Waterhouse, J., Stera, S., Brennan, D. Inst. of Paper Chemistry, Appleton,, WI, USA, Inst of Paper Chemistry, Appleton, WI, USA.1995.

22.- Laboratorio de método de esfuerzo biaxial de papel durante el secadoWahlstrom, Torbjorn, Fellers, Crister, Htun, Myat. Swedish Pulp and Paper Research Inst, Stockholm, Sweden.1996.

23.- Caracterización del comportamiento mecánico de papel y cartón de tres capas, durante el secado Retulainen, E., Martikainen, P., Timofeev, O. VTT Technical Research Centre of Finland, Jyväskylä, Finland.1997.

24.- EFECTO DEL SISTEMA DE SEGURIDAD PARA SECADO DE PROPIEDADES (HANDSHEET). Parsons, S.R. Department of Biological and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853, United States.1998.

25.- Absorción capilar en hojas porosas y superficies sujetas a la evaporación Lockington, D.A.a , Parlange, J.-Y.b , Lenkopane, M.a Centre for Water Studies, School of Engineering, University of Queensland, Brisbane, QLD 4072, Australia.2001.

- 26.- Transitorio de difusión de agua a través de materiales de cartón
Bandyopadhyay, A.a , Ramarao, B.V.a , Ramaswamy, S.b. Faculty of Paper Science and Engineering, SUNY College of Environmental Science and Forestry, Syracuse, NY 13210, United States.2003.
- 27.- El comportamiento eficaz homogénea de medios porosos heterogéneos
Sáez, A.E.a , Otero, C.J.b , Rusinek, I.b. Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Universidad Simón Bolívar, P.O. Box 89000, Caracas, 1086A, Venezuela
Grupo de Tecnología de Yacimientos, INTEVEP, S.A., P.O. Box 76343, Caracas, 1070-A, Venezuela.2006.
- 28.- Transporte en química y mecánica de medios porosos heterogéneos. I: Desarrollo teórico de la región-un promedio de las ecuaciones de flujo compresible ligeramente monofásicos.Quintard, M.a , Whitaker, S.b. L.E.P.T.-ENSAM (UA CNRS), Esplanade des Arts et Métiers, 33405 Talence Cedex, France.2006.
- 29.- Gomés, M. A. F., "Fractal geometry in crumpled paper balls", Am. J. Phys. 55 (7), July, (1987).
- 30.- Gomés, M. A. F. T. I. JYH, T. I. Ren, I. M.Rodrigues Y C. B. S. Furtado, "Mechanically deformed crumpled surfaces", J. Phys. D: Appl. Phys. 22, 1217-1221, (1989).
- 31.- Gomés, M. A. F. Y J. H. P. Soares, "Electrical resistance of crumpled surfaces", J. Phys. D: Appl. Phys. 22, 989-990, (1989).
- 32.- Cerda, E.L. Mahadevan,"Conical Surfaces and Crescent Singularities in Crumpled Sheets", Physical Review Letters, Volume 80, Number 11(1998).
- 33.- Lobkovsky, A. S. Gentges, H. Li. D. Morse y T. A. Witten "Scaling Properties of Stretching Ridges in a Crumpled Elastic Sheet", submitted as a report to science, November 7 (1995).
- 34.- Plouraboue, F. y S. Roux, "Experimental Study of the Roughness of Crumpled Surfaces" Elsevier science B. V. Physica A227, 173 – 182, 1996.
- 35.- Chaoñe S. y F. Melo, "From Creases to Conical Detection in a Buclekled Thin Sheet", December 7 (1999).
- 36.- Didonna B. "Scaling of the Buckling Transition of Ridges in Thin Sheets", December 7 (1999).

- 37.- Matan K., R. Williams, T.A. Witten y S.R. Nagel, "Crumpling a Thin Sheet", November 5 (2003).
- 38.- Jahn R. y H Truckenbrodt "A Simple Fractal Analysis Method of the Surfaces Roughness", Journal of Materials Processing Technology 145, 40 – 45 , (2004).
- 39.- Blair D.L. y A. Kudrolli "The Geometry of Crumpled Papers", December 7, (2004).
- 40.- Jahn R. y H Truckenbrodt "A Simple Fractal Analysis Method of the Surfaces Roughness", Journal of Materials Processing Technology 145, 40 – 45 , (2004).
- 41.- Sultan E. y A. Boudaoud, "The statics of Crumpled Paper", September 7, (2005).
- 42.- Kvamme Nygard, "Bending and Crumpling of Plates and Shell", Physics of Geological Processes, Department of Physics, University of Oslo, Norway.
- 43.- Alexander S. Balankin, Orlando Susarrey Huerta, Rolando Cortes Montes de Oca, Didier Samayoa Ochoa, José Martínez Trinidad and Maribel A. Mendoza, " Intrinsically anomalous Roughness of Randomly Crumpled Thin Sheets", Physical Review E 74 061602 (2006).
- 44.-Benoit Maldenbrot , "La Geometría Fractal de la Naturaleza" Tusquets, ISBN 848310549-7.
- 45.- Falconer, Kenneth (2003) "Fractal Geometry: Mathematical Foundations and Applications" Jonh Wiley & Sons. Ltd.pp XXV, ISBN 0-470-84862-6.
- 46.- Alexander S. Balankin,Ivan Campos Silva, Omar Antonio Martinez and Orlando Susarrey Huerta, "Scaling properties of Randomly Folded Plastic Sheets", Physical Review E 75051117 (2007).

ANEXOS

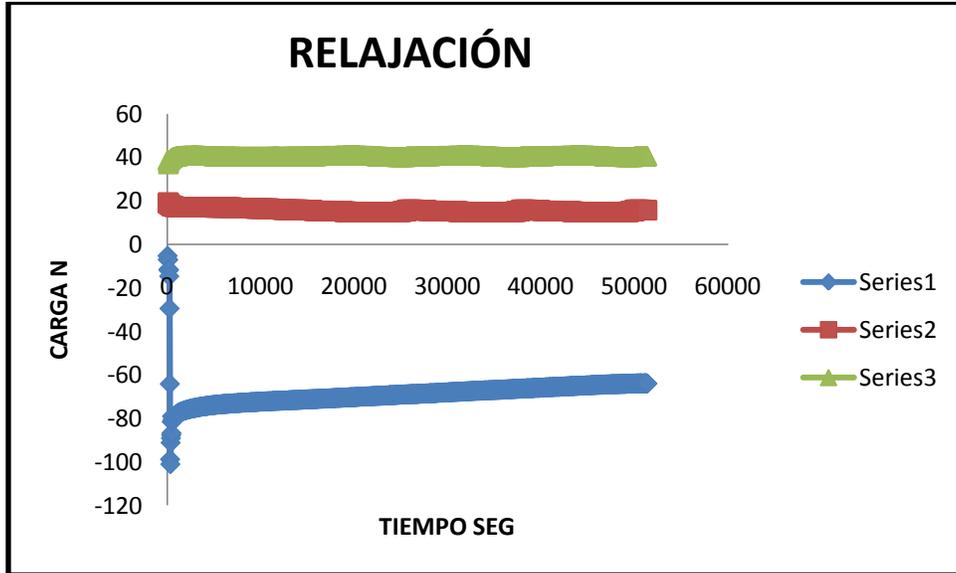


Fig. 27 Relajación constante adquisición de datos desde el inicio de la prueba.

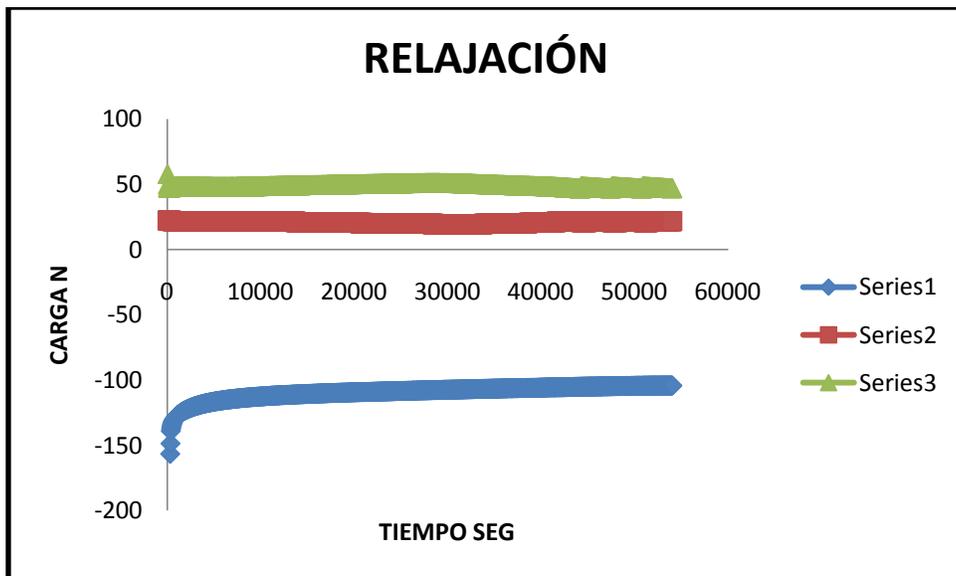


Fig. 28 Relajación constante cuando se aplica la carga

ANEXOS

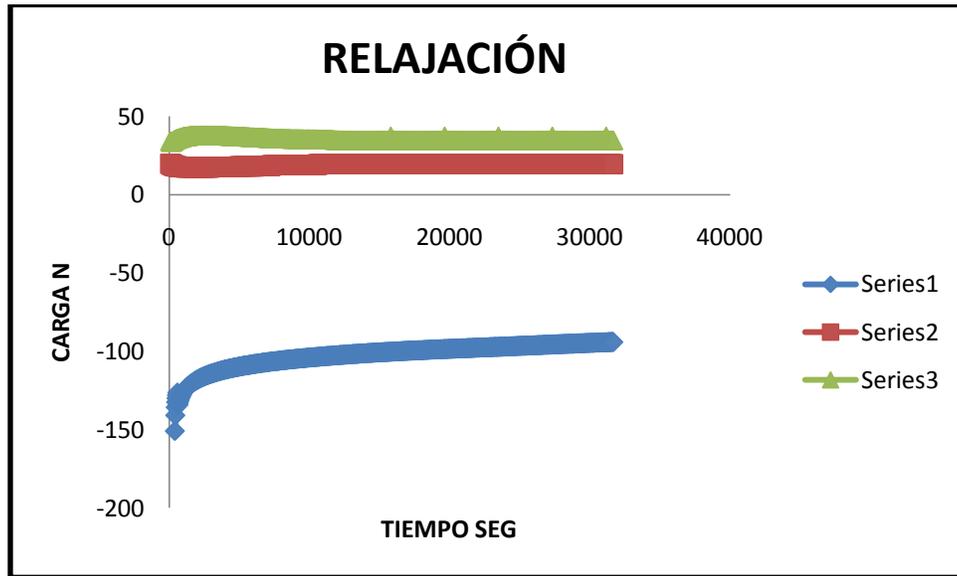


Fig. 29 Relajación constante

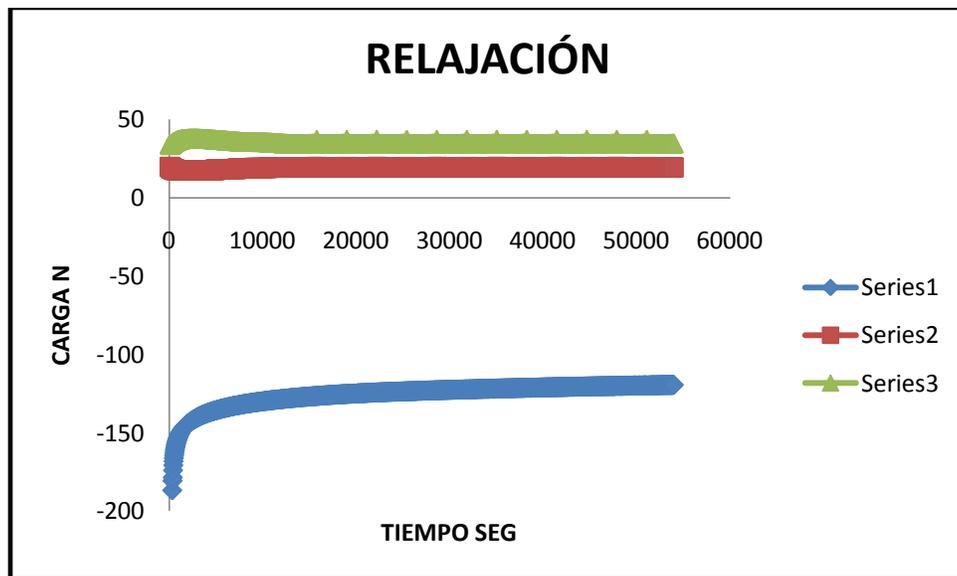


Fig.30 Relajación constante.

