

11126
83a



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



**INSTRUMENTACION, CONTROL Y PRUEBAS
EN UNA MAQUINA TERMONEUMATICA**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N :
IVAN SUAREZ ESTRELLA
HORACIO TREJO CAMACHO

ASESOR: DR. ELIGIO ALBERTO OROZCO MENDOZA

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

2003

A

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



Instituto de Física UNAM

El trabajo de investigación asociado a la tesis de licenciatura cuyo título es **"INSTRUMENTACION, CONTROL Y PRUEBAS EN UNA MÁQUINA TERMONEUMÁTICA"**, fue realizado por los pasantes Iván Suárez Estrella y Horacio Trejo Camacho en los laboratorios del Instituto de Física de la UNAM, bajo la dirección del **Dr. Eligio A. Orozco Mendoza.**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

B



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE
MEXICO

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLAN



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

DEPARTAMENTO DE

ATN: Q. Ma. ~~Beatriz~~ **Carrión** García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Instrumentación, control y pruebas en una máquina termostática"

que presenta el pasante: Ivan Suarez Estrella
con número de cuenta: 09218834-3 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuatitlán Izcalli, Méx. a 1 de abril de 2003.

PRESIDENTE	<u>Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza</u>	<u>[Firma]</u>
VOCAL	<u>Ing. Nicolás Calva Tapia</u>	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	<u>Ing. Humberto Neri Mondragón</u>	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Pedro Rendón Torres</u>	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Luis Raúl Flores Coronel</u>	<u>[Firma]</u>

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

C



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLÁN



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
P R E S E N T E

DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES
ATN: Q. Ma. ~~del Carrizosa~~ García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Instrumentación, control y pruebas en una máquina temoneumática"

que presenta el pasante: Hraccio Trejo Camacho
con número de cuenta: 09024808-1 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 1 de abril de 2003

PRESIDENTE	<u>Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza</u>	<u>[Firma]</u>
VOCAL	<u>Ing. Nicolas Calva Tapia</u>	<u>[Firma]</u>
SECRETARIO	<u>Ing. Humberto Neri Mondragón</u>	<u>[Firma]</u>
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Pedro Rendón Torres</u>	<u>[Firma]</u>
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Luis Raúl Flores Coronel</u>	<u>[Firma]</u>

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

D

A mi Madre,
María Lilia.
A mi Padre,
Raúl.
A mi hermano,
Manuel Alfredo.

Iván

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A mi padre, Roberto Trejo Trujillo, quien con su gran esfuerzo, dedicación y paciencia ha sido un gran ejemplo a seguir.

A mi madre, Silvia Camacho Chavez, quien me apoyo siempre incondicionalmente y me guía en la vida misma.

A mis hermanos, Oswaldo y Claudia, por el apoyo y confianza que me han brindado siempre.

A todas las personas que colaboraron de alguna u otra manera.

Horacio Trejo

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por lo mucho que nos ha dado a lo largo de nuestra formación.

A la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlan por los conocimientos adquiridos.

Al Instituto de Física de la UNAM, en concreto al laboratorio de metalurgia, por el apoyo proporcionado.

Al Dr. Eligio A. Mendoza Orozco, por habernos aceptado para realizar nuestro servicio social, por la dirección del presente trabajo y la paciencia.

Al Dr. Lauro Bucio Galindo, por su amistad y por el apoyo brindado.

Al Sr. Angel Osornio, por su apoyo técnico y por su amistad.

Y de una manera muy especial a la Sra. Irma Orozco, por los consejos y toda la ayuda que nos brindo.

A los compañeros de la carrera de IME Saul Zaldivar, Gabriel Ramirez, Antonio Juarez, Fernando Piedras, Abraham Luevanos y a los que se nos olvidaron perdón.

A los compañeros del Laboratorio de Metalurgia Gabriel Gamboa, Alejandro Heredia, Erick Juarez, Luis Lozano e Ivonne Rosales.

Al apoyo económico de DGAPA a través del proyecto PAPIIT IN120801 "Análisis de material cristalino, sintético y amorfo: relación estructura-propiedades Físicas".

Iván agradece a la familia del Moral, a la familia Guerrero Estrella, a los cuates de la unidad (ustedes saben quienes son) por hacer los momentos de frustración mas fáciles.

El miedo lleva a la ira

La ira lleva al odio

El odio lleva al sufrimiento.

Yoda

INDICE

	Página
INTRODUCCION	1
Referencias	3
Capitulo I: MAQUINA DE EXPANSION TERMICA	4
1.1 Descripción de su funcionamiento	4
1.1.1 Circuito eléctrico de la máquina de expansión térmica	5
1.2 Ecuación que describe el funcionamiento de la máquina	5
1.3 Caso ideal	8
1.4 Máquina libre	9
1.5 Rangos de aplicación	14
1.6 Aplicaciones	15
1.6.1 Experimentos en cloruro de potasio con impurezas de Ba ²⁺	15
1.6.2 Experimentos en cálculos renales	16
1.6.3 Experimentos en geles de óxido de silicio	17
1.6.4 Experimentos en óxidos superconductores de alta temperatura crítica del tipo Y ₁ Ba ₂ Cu ₃ O _x	18
1.7 Referencias del capítulo	19
Capitulo II: DISEÑO MECANICO, ELECTRICO Y ELECTRONICO DE LA MAQUINA TERMONEUMATICA O TERMOHIDRAULICA	20
2.1 Diseño mecánico	21
2.2 Sistema eléctrico	23
2.3 Descripción de componentes eléctricos	23

2.3.1	Triacs	23
2.3.2	Variac ó auto transformador variable	24
2.3.3	Transformador	24
2.3.4	Válvula solenoide	25
2.3.5	Fuente de voltaje para el LVDT	25
2.4	Diseño eléctrico - electrónico	26
2.5	Descripción de los sensores y su calibración	27
2.5.1	Sensor de desplazamiento LVDT	27
2.5.2	Calibración del LVDT	28
2.5.3	Datos obtenidos en el tornillo micrométrico	29
2.5.4	Celda de carga	30
2.5.5	Calibración de la celda de carga	31
2.5.6	Controlador CN-2010	34
2.5.7	Programación del controlador CN-2010	35
2.5.8	Procedimiento de programación	35
2.5.9	Tarjeta analógica digital	38
2.5.10	Programa de adquisición de datos	39
2.6	Manual de operación	39
2.6.1	Pasos a verificar	39
2.6.2	Secuencia de encendido	40
2.7	Calibración y programación	41
2.7.1	Pasos a verificar	41
2.8	Puesta en operación	42
2.9	Referencias del capítulo	43
Capítulo III: CARACTERIZACION Y APLICACIONES DE LA MAQUINA TERMONEUMATICA		44
3.1	Calentamiento medido con LVDT	44
3.2	Calentamiento medido con la celda de carga	45

3.3	Pruebas con control	46
3.3.1	Control de la máquina enfriando con aire y agua	47
3.3.2	Diferentes velocidades	49
3.3.3	Rampas múltiples	50
3.4	Aplicaciones	51
3.4.1	Flexión en tres puntos	51
3.4.2	Normas ASTM	53
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ C674-88 Norma para pruebas en propiedades de flexión de materiales cerámicos ▪ D5934-96 Norma para pruebas para determinar el modulo de elasticidad para plásticos rígidos y semi-rígidos con una velocidad de carga controlada usando tres puntos de flexión ▪ C158-95 Norma para pruebas de esfuerzos del vidrio por flexión 	53
3.4.3	Rigidez de la máquina	55
3.4.4	Pruebas en materiales frágiles	55
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cuarzo amorfo (SiO_2) ▪ Alumina (Al_2O_3) ▪ Methyl Methacrylate (Lucita) ▪ Cascaron de Avestruz ▪ Pinus Sylvestris (Pino) ▪ Bambú ▪ Fémur humano 	55 57 59 61 64 67 69
3.7	Referencias del capitulo	72
	Conclusiones y recomendaciones	74
	Anexo	77

INTRODUCCION

En este trabajo se describe el proceso de instrumentación y control de una máquina para hacer pruebas mecánicas en materiales frágiles. El diseño esta basado en una idea propuesta por el Físico A. Mendoza la cual fue desarrollada conjuntamente con los Doctores A. Morales y E. Orozco [1].

El prototipo construido por A. Mendoza, A. Morales y E. Orozco se conoce como máquina de expansión térmica ya que para su funcionamiento se aprovecha la expansión térmica de una barra metálica la cual se usa para transmitir deformación o fuerza en las muestras a estudiar, es decir, en esta máquina se emplea un pistón térmico.

El prototipo se construyó debido a que no existía una máquina que realizara pruebas mecánicas en materiales frágiles.

La máxima longitud que se puede alcanzar en la barra depende de la temperatura aplicada, es decir de la potencia empleada durante el calentamiento. En el capitulo uno, se describe con mas detalle el principio de funcionamiento, las características y algunas aplicaciones de prototipo.

Una desventaja de la máquina de expansión térmica es que para trabajar a diferentes velocidades de deformación, es necesario someter la barra metálica a diferentes regímenes de calentamiento, lo cual limita el tipo de pruebas mecánicas que se pueden hacer.

Una posibilidad para extender el rango de aplicaciones, es acondicionar un sistema de control del proceso de expansión o contracción de la barra transmisora de deformación o fuerza, de tal modo que trabajando a su máxima potencia se

puedan conseguir diferentes velocidades de calentamiento (expansión) o enfriamiento (contracción) de la barra.

En el prototipo [1] el calentamiento se consigue aplicando directamente una corriente eléctrica sobre la barra, el diseño que presentamos en este trabajo se basa en ese esquema; adicionalmente, la barra se enfría con aire o con agua, con lo que, la máquina de expansión térmica se convierte en una máquina termoneumática o termohidráulica.

Se construyó una máquina con las dos posibilidades de enfriamiento, a la cual le adaptamos un sistema de control en base a dos sensores, uno de deformación L.V.D.T (Linear Variable Differential Transformer) y otro de fuerza, hechos a base de galgas de extensión (strain gauges).

Tanto el sensor de deformación (L.V.D.T.) como el de fuerza y los controladores (DP-80 y CN-2010) se utilizaron debido a que era el equipo con que contaba el Instituto de Física.

En el capítulo dos de este trabajo, se muestra el diseño mecánico, eléctrico y electrónico de la máquina que construimos, así como la calibración de los sensores la programación de los controladores y el desarrollo del software de adquisición de los datos.

En el capítulo tres se realizó un análisis de su funcionamiento y rangos de trabajo a diferentes velocidades y haciendo un análisis de los diferentes tipos de enfriamiento que podrían ser utilizados en esta máquina, se incluyen algunas aplicaciones en muestras de diferentes materiales, los resultados obtenidos se comprobaron con los de la literatura. Al final se incluyen las conclusiones sobre el proceso de instrumentación y control que desarrollamos y se hacen una serie de recomendaciones para mejorar el funcionamiento de la máquina.

Durante la realización de esta tesis se presento la ponencia "Instrumentación de una Máquina de Expansión Térmica" en el 3er Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas" en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional del 25 al 29 de noviembre del 2002 [2].

REFERENCIAS

- [1] A. Mendoza A, E. Orozco y A. Morales, Journal of Physics. E 18 (1985) 474.
- [2] Ivan Suarez, Horacio Trejo, Lauro Bucio, Alejandro Heredia, Eligio Orozco, "Instrumentación de una Máquina de Expansión Térmica", Tomo 3 Memoria Ingeniería Mecánica/Educación Tecnológica (2002) 130-135.

CAPITULO I

MAQUINA DE EXPANSION TERMICA

1.1 DESCRIPCION DE SU FUNCIONAMIENTO

La máquina de expansión térmica en su versión mas simple [1] esta formada por tres tubos de acero de paredes delgadas (tipo conduit) de dos pulgadas de diámetro y un metro de longitud, el soporte superior esta seccionado y sus partes están embebidas en hormigón dentro de una caja de acero para conseguir aislamiento eléctrico entre los tubos y también para darle soporte mecánico, los tubos están soldados a una estructura exterior y limita el funcionamiento solo a compresión. Para que el tubo (B) no se flexione, se coloco una barra de metal (E) con la intención de que sirva de guía.

El tubo (B) esta conectado a un transformador de baja resistencia de salida, bajo voltaje de salida (1 V) y hasta 500 Amp. de corriente de salida y también a un autotransformador variable "Variac" con el que se controla la corriente inyectada al tubo (Figura 1.1).

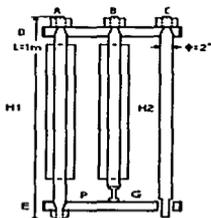


Figura 1.1. Máquina de expansión térmica en su versión mas simple.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

De esta forma se consigue una región de linealidad en la expansión de la barra que será totalmente dependiente de la corriente que se inyecte

Debido al régimen de calentamiento, el comportamiento lineal que se consigue esta gobernado por la potencia suministrada a la barra (Ec. 1.12).

1.1.1 Circuito eléctrico de la máquina de expansión térmica.

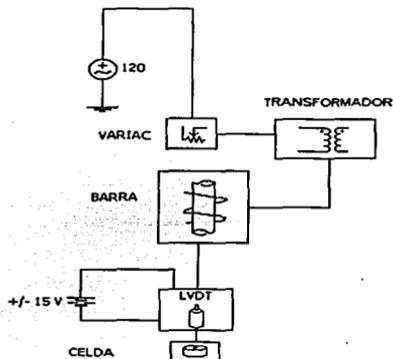


Figura 1.2 Diagrama eléctrico de la máquina de expansión térmica.

1.2 ECUACION QUE DESCRIBE EL FUNCIONAMIENTO DE LA MÁQUINA

La potencia que se suministra eléctricamente al hacer pasar una corriente eléctrica por la barra, se consume en el calentamiento de la barra, algo de esa potencia se

pierde escapando al exterior a través del aislamiento térmico de la barra, en este caso una fracción pequeña se va en hacer el trabajo para deformar a la probeta; de tal forma que:

$$P = C \frac{\partial \theta}{\partial t} + K(\theta) + f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1.1)$$

en donde P es la potencia eléctrica suministrada a la barra.

C es la capacidad calorífica de la barra.

$C \frac{\partial \theta}{\partial t}$ es la potencia aprovechada en calentar la barra y dilatarla.

$K(\theta)$ es la potencia que escapa a través del aislamiento, es una función del incremento de la temperatura.

θ es la diferencia de temperaturas entre la barra y el exterior

$f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t}$ es la potencia empleada en deformar la probeta [1]

Sabemos que la expansión de la barra y el incremento de temperatura, están relacionados por:

$$\epsilon = \alpha \cdot \ell_0 \theta \quad (1.2)$$

con α como el coeficiente de expansión lineal y ℓ_0 como la longitud inicial de la barra, consideraremos:

$$A = \alpha \cdot \ell_0$$

$$\therefore \theta = \frac{\epsilon}{A} \quad (1.3)$$

sustituyendo la ecuación (1.3) en la (1.1) obtenemos:

$$P = C \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + K \left(\frac{\epsilon}{A} \right) + f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1.4)$$

para una potencia eléctrica aplicada constante y A constante tenemos:

$$P = \frac{C}{A} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + K \left(\frac{\epsilon}{A} \right) + f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (1.5)$$

agrupando términos:

$$P = \left\{ \frac{C}{A} + f(\epsilon) \right\} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + K \left(\frac{\epsilon}{A} \right)$$

$$\frac{\frac{C}{A} + f(\epsilon)}{P - K \left(\frac{\epsilon}{A} \right)} \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = 1$$

$$\therefore \int_1 \partial t = \int_1 \frac{\frac{C}{A} + f(\epsilon)}{P - K \left(\frac{\epsilon}{A} \right)} \partial \epsilon \quad (1.6)$$

en que esta es la ecuación que describe el comportamiento de la máquina, en que $f(\epsilon)$ es una función que expresa la carga ejercida por la probeta y $K \left(\frac{\epsilon}{A} \right)$ es una

función que representa el aislamiento térmico. como las temperaturas a las que vamos a operar la máquina no sobrepasaran los 300° C, esperamos que la potencia radiada sea despreciable comparada con la potencia conducida a través de la envoltura aislante y en este caso consideramos que:

$$K(\theta) = K\theta \quad (1.7)$$

con K constante de conductividad térmica de la envoltura aislante de la barra.

$$K\theta = K \frac{\epsilon}{A} \quad (1.8)$$

y la ecuación (1.6) la reducimos a:

$$\int_0^1 \partial t = \int_0^1 \frac{\frac{C}{A} + f(\epsilon)}{P - K \frac{\epsilon}{A}} \partial \epsilon \quad (1.9)$$

como $f(\epsilon)$ estará presente siempre que se intente deformar alguna probeta y generalmente será una función desconocida o conocida solo gráficamente [2].

1.3 CASO IDEAL

Este caso corresponde a una dilatación libre en la que la máquina no trabaja contra alguna probeta y por eso $f(\epsilon) = 0$, además la barra se rodea con una envoltura aislante perfecta con conductividad térmica cero, $K = 0$; es ideal porque su comportamiento ofrecería grandes ventajas en cuanto a la facilidad con la que se le puede gobernar. Para esta situación la ecuación (1.6) se reduce a:

$$\int_0^t \partial t = \int_0^t \frac{A}{P} \partial \epsilon = \frac{C}{AP} \int_0^t \partial \epsilon \quad (1.10)$$

$$\therefore \epsilon = \frac{AP}{C} t \quad (1.11)$$

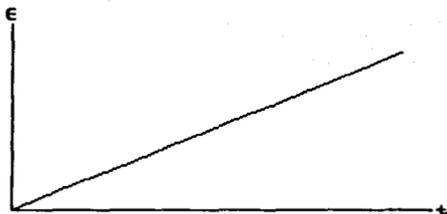


Figura 1.3 Comportamiento lineal

Su comportamiento es lineal, con pendiente:

$$m = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} = \epsilon = \frac{AP}{C} \quad (1.12)$$

además es un función lineal de la potencia eléctrica suministrada P y como $K = 0$ no hay fuga de potencia hacia el exterior y en este sentido es la mas eficiente de las máquina de este tipo.

1.4 MAQUINA LIBRE

Este caso corresponde a una dilatación libre (este es el caso que se utilizo para instrumentar) sin probeta que deformar, con $f(\epsilon) = 0$, pero con un aislante térmico

convencional con $k \neq 0$. En este caso la ecuación (1.6) se reduce a:

$$\int \partial t = \int \frac{\frac{C}{A}}{P - \frac{K}{A} \epsilon} \partial \epsilon$$

sea:

$$u = P - \frac{K}{A} \epsilon$$

$$\partial u = -\frac{K}{A} \partial \epsilon$$

$$\therefore \int \partial t = \int \frac{\frac{C}{A} \left(-\frac{A}{K} \right)}{u} \partial u = -\frac{C}{K} \int \frac{\frac{K}{A} \partial u}{u}$$

$$\int \partial t = -\frac{C}{K} \int \frac{\frac{K}{A} \partial u}{u} = -\frac{C}{K} \ln \left(\frac{P - \frac{K}{A} \epsilon}{P} \right)$$

$$\therefore t = -\frac{C}{K} \ln \left| 1 - \frac{K \epsilon}{A P} \right| = -\frac{K t}{C} = \ln \left| 1 - \frac{K \epsilon}{A P} \right|$$

$$e^{-\frac{K t}{C}} = 1 - \frac{K \epsilon}{A P} = \frac{A P e^{-\frac{K t}{C}}}{A P} = \frac{A P}{K} - \epsilon$$

$$\epsilon = \frac{A P}{K} \left(1 - e^{-\frac{K t}{C}} \right) \quad (1.13)$$

es una curva de comportamiento asintótico que tiende a: $\epsilon = \frac{A P}{K}$ y nos dice que para una potencia eléctrica fija, no habrá forma de sobrepasar ese valor de dilatación.

Como:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots$$

entonces:

$$\epsilon = \frac{AP}{K} \left(1 - e^{-\frac{K}{C}t} \right) = \frac{AP}{K} \left\{ 1 - \left[1 + \left(-\frac{K}{C}t \right) + \frac{\left(\frac{K}{C}t \right)^2}{2!} + \dots \right] \right\}$$

y en primera aproximación

$$\epsilon \approx \frac{AP}{K} \left\{ 1 - 1 + \frac{K}{C}t \right\} = \frac{AP}{C}t$$

y si

$$K \rightarrow 0$$

entonces

$$\epsilon \rightarrow \frac{AP}{C}t$$

que nos regresa al caso IDEAL.

Cuando el tiempo es pequeño, el comportamiento es lineal como lo muestra la (Figura 1.4)

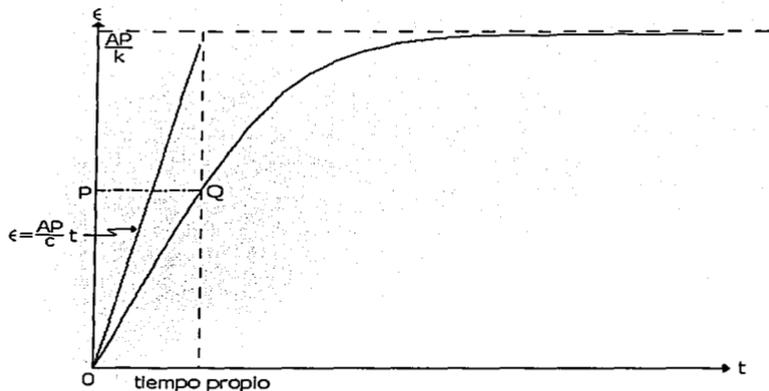


Figura 1.4 Comportamiento lineal en tiempo propio.

Este caso muestra que hay un tiempo (o constante en el tiempo), este es independiente de la potencia suministrada, es el tiempo que transcurre desde el inicio del proceso hasta que la dilatación de la barra es tal que solo le falte por recorrer $\frac{1}{c}$ veces la dilatación máxima posible, o sea al tiempo propio de la dilatación de la barra:

$$\epsilon_r = \left(1 - \frac{1}{c}\right) \epsilon_{máxima} \quad (1.14)$$

pero

$$\epsilon_{máxima} = \epsilon_{siniática} = \frac{AP}{K}$$

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

$$\epsilon_r = \left(1 - \frac{1}{e}\right) \frac{AP}{K} = \frac{AP}{K} \left(1 - e^{-K t_r}\right)$$

$$\frac{1}{e} = e^{-K t_r}$$

$$t_r = \frac{C}{K} \quad (1.15)$$

recordando que C es la capacidad calorífica de la barra y K constante de conductividad térmica de la envoltura aislante de la barra; para un caso práctico se propone que sea 10 veces mayor, es decir, que estemos en una aproximación lineal del 10%, un tiempo máximo de comportamiento lineal t_L será aquel en que:

$$\frac{K}{C} t_L = 10 \frac{K^2 t_L^2}{C^2 2!}$$

$$\therefore t_L = 10 \frac{K t_L^2}{2C} = 5 \frac{K}{C} t_L^2$$

$$\therefore t_L = \frac{1}{5} \frac{C}{K}$$

pero $\frac{C}{K} = t_r$

$$t_L = \frac{1}{5} t_r \quad (1.16)$$

en aproximación del 10% el tiempo máximo de duración de la región lineal, corresponde a la quinta parte del tiempo propio. Por lo que la región de linealidad se reduce considerablemente si se baja la potencia para obtener velocidades pequeñas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1.5 RANGOS DE APLICACIÓN

La máquina de expansión térmica debe ser capaz de deformar axialmente materiales frágiles de aproximadamente 10 mm de longitud y de $2.5 \times 2.5 \text{ mm}^2$ de sección transversal, para ello se requieren esfuerzos del orden de 2 a 10 MPa (lb/in^2) y por lo tanto fuerzas del orden de 6.25 a 12.5 N; la deformación que ha de darse en la probeta debe de reducirla entre un 10% y un 30%, con lo que el recorrido de la máquina debe de ser del orden de 3 mm, este desplazamiento debe realizarse a velocidad constante, que debe poder elegirse a voluntad entre 10^{-2} y $10^{-6} \text{ cm}/\text{seg}$. Para que con las dimensiones del material se tengan velocidades de deformación del orden de 10^{-2} a $10^{-6} \text{ cm}/\text{seg}$.

Se comprobó que la máquina libre se comporta como lo predice el modelo teórico [2] se verifica que los rangos de aplicación de la máquina de expansión térmica son:

- a) Poder aplicar fuerzas mucho mayores a 50 Kg. fuerza.
- b) Tener un recorrido lineal mayor a los 3 mm.
- c) Poder funcionar a velocidades constantes entre menos de $10^{-6} \text{ cm}/\text{seg}$. y mas de $10^{-2} \text{ cm}/\text{seg}$.
- d) Poder hacer cambios de velocidad de desplazamiento del cabezal, con transitorios que duran menos de 1/10 de seg.

Al final solo se hicieron arreglos para que la máquina pueda trabajar sobre materiales sometidos a diferentes temperaturas, desde 76° K , hasta 1000° K .

1.6 APLICACIONES

Los siguientes experimentos se realizaron en la máquina de expansión térmica y se publicaron en la Revista Mexicana de Física [3].

1.6.1 Experimentos en cloruro de potasio con impurezas de Ba^{2+} .

Los experimentos se realizaron para ver la dureza de monocristales de KCl (con forma de paralelepípedo de 2 X 2 X 8 mm) impurificados con 300 ppm de Ba^{2+} , sabiendo que el radio del Bario (1.34 Å). La dureza de los cristales se midió a través del esfuerzo de cedencia (esfuerzo necesario para iniciar la deformación plástica), empleando, para esto la máquina de expansión térmica. Los experimentos se realizaron en muestras añejadas entre 1 y 500 horas, a la temperatura de 100° C (esto para acelerar el proceso de precipitación de las impurezas). En conclusión se noto que la precipitación del Ba^{2+} provoca un endurecimiento gradual de los cristales hasta un valor de saturación de aproximadamente 9 MPa a las 500 horas (Figura 1.5)

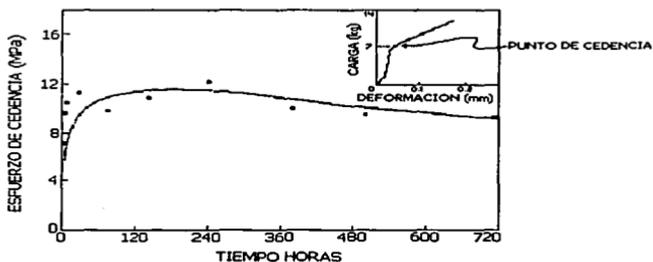


Figura 1.5 Gráfica del esfuerzo de cedencia como función del tiempo de añejamiento a 100° C la gráfica insertada corresponde a una curva típica de carga contra deformación obtenida con la máquina.

1.6.2 Experimentos en cálculos renales.

Una de las técnicas para eliminar los cálculos renales a través de su fragmentación y posterior dilución mediante quimioterapia, que se ha difundido ampliamente, se basa en la aplicación de choques extra corporales de corta duración. Uno de los parámetros que se deben conocer para poder aplicar la técnica de la fragmentación, es la carga que se necesita aplicar para conseguir el rompimiento de los cálculos. Este parámetro se puede medir en la máquina de expansión térmica.

Se realizaron una serie de experimentos en 10 muestras de cálculos renales de diferente procedencia. En ninguno de los casos, la deformación excedió los 0.3 mm y las cargas máximas que soportaban las muestras, estuvieron siempre en el intervalo de 30 a 70 Kg. (Figura 1.6)

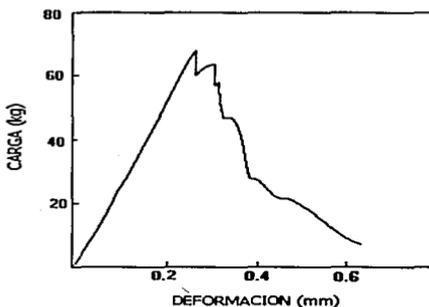


Figura 1.6 Gráfica de carga contra deformación de uno de los cálculos sometidos a compresión con la máquina de expansión térmica.

1.6.3 Experimentos en geles de oxido de silicio.

La fabricación de vidrios a partir de geles de oxido de silicio mezclados con óxidos de aluminio, circonio, sodio, titanio, plomo etc. Ha adquirido gran importancia en los últimos años debido a que por este método pueden obtenerse vidrios de alta homogeneidad para aplicaciones ópticas.

En el departamento de Estado Sólido del Instituto de Física de la UNAM, se han incorporado colorantes naturales a geles húmedos de oxido de silicio, con la intención de fabricar vidrios luminiscentes, ya se han conseguido geles que absorben radiación ultravioleta de 320 nm y emiten radiación en el visible entre 500 y 60 nm. Como parte de este proyecto de investigación, se realizaron experimentos de deformación con la máquina de expansión térmica, en muestras cilíndricas de 5 mm de radio X 10 mm de alto, aplicándoles carga en compresión hasta la ruptura para diferente grados de secado de las muestras (Figura 1.7).

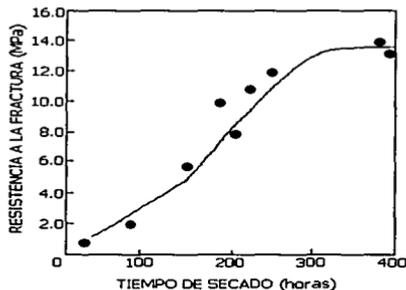


Figura 1.7 Gráfica del esfuerzo a la ruptura como función del tiempo de secado de las muestras luminiscentes de geles de óxido de silicio, probadas en la máquina de expansión térmica.

1.6.4 Experimentos en óxidos superconductores de alta temperatura crítica del tipo $Y_1Ba_2Cu_3O_x$

Con la misma máquina de expansión térmica, se hicieron pruebas de flexión en muestras fabricadas con forma de paralelepípedo cuyas dimensiones eran de 3 X 3 X 10 nm, se le aplicó una carga en forma continua hasta conseguir la ruptura. De los resultados obtenidos se puede ver que el sinterizado bajo presión, incrementa casi al doble la resistencia a la fractura con respecto al valor que se obtiene en las muestras fabricadas por métodos tradicionales, para el caso de las muestras con adiciones de Na_2CO_3 , presentan la mayor deformación hasta la fractura.

1.7 REFERENCIAS

- [1] Claudia H. Lucinda, "Diseño, Construcción y Pruebas de una Máquina de Expansión Térmica para hacer Pruebas Mecánicas", Tesis Profesional, 1989.
Directores: Dr. Eligio A. Orozco Mendoza y Fis. Alejandro Mendoza Allende.
- [2] A. Mendoza A, E. Orozco y A. Morales, *Journal of Physics*. E 18 (1985) 474.
- [3] E. Orozco, A. Morales y A. Mendoza, *Revista Mexicana de Física* 37 No. 4 (1991) 671-677.

CAPITULO II

DISEÑO MECANICO, ELECTRICO Y ELECTRONICO DE LA MAQUINA TERMONEUMATICA O TERMOHIDRAULICA

En este capitulo se hizo la descripción en conjunto del diseño mecánico, del diseño eléctrico y electrónico de la máquina que se automatizo. Algunos de los elementos básicos se describen con cierto detalle, sobre todo aquellos aspectos que tienen que ver con la calibración de los sensores que se usan para el control del aparato, se incluyo un manual de operación para uno de los casos que analizamos, el caso de la máquina enfriada por aire. En el capítulo III se incluyen resultados correspondientes a la caracterización del diseño usado para esta tesis y se presentan algunas aplicaciones al estudio de diversos materiales.



Figura 2.1 Máquina termoneumática.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1 DISEÑO MECANICO

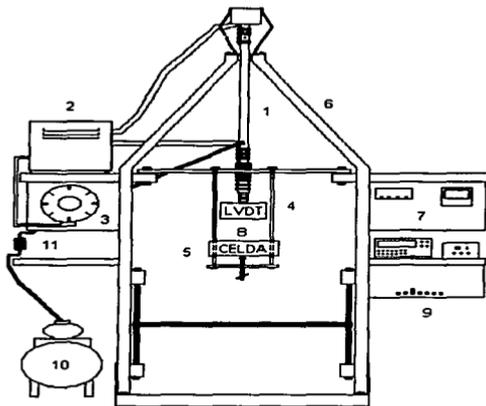


Figura 2.2 Esquema de la máquina termoneumática

La máquina consta de:

1. Barra hueca.
2. Transformador.
3. Autotransformador variable (Variac).
4. LVDT.
5. Celda de carga.
6. Estructura de la máquina.
7. Controladores.
8. Porta muestra
9. Sistema de encendido.
10. Sistema de enfriamiento compresor de aire ó agua.
11. Válvula de solenoide

Sobre una estructura hecha de acero (6) se colocaron los aditamentos de potencia y control de la máquina así como el sistema para deformar a las muestras (8) este es un aditamento para hacer pruebas de flexión en tres puntos (Figura 2.3)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

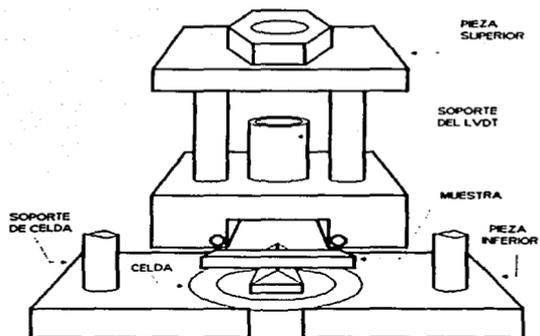


Figura 2.3 Esquema del aditamento especial para flexión de tres puntos

El aditamento consta de dos piezas; en la pieza superior se coloca el LVDT y en la pieza inferior la celda de carga. La pieza donde se encuentra la celda esta sostenida por medio de dos barras de la estructura de la máquina termoneumática es abatible para acercarla a la primer pieza con libertad y el soporte de la celda contiene el punto central para aplicar fuerza a la muestra durante la expansión de la barra hueca (1).

En el soporte del LVDT se colocó el cuerpo del sensor de deformación por donde se desplaza el núcleo capaz de proporcionar un voltaje dependiendo de su posición y sentido del movimiento del LVDT, este esta sostenido directamente de la barra hueca por lo cual nos detecta la expansión de la misma.

Puestas en posición las dos piezas con la muestra tocando los tres puntos, se logra tener simultáneamente las dos respuestas tanto desplazamiento como compresión.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.2 SISTEMA ELECTRICO

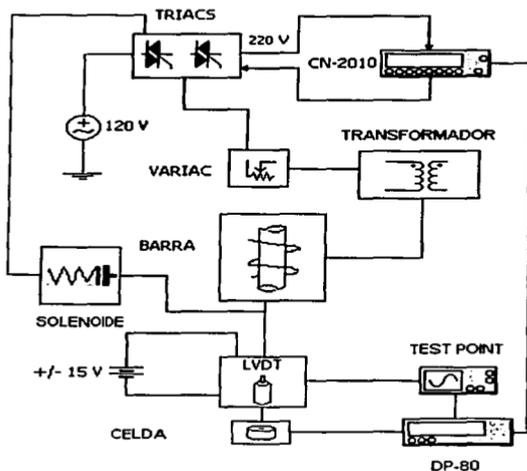


Figura 2.4 Esquema del sistema eléctrico-electrónico de la máquina termoneumática.

2.3 DESCRIPCION DE COMPONENTES ELECTRICOS

2.3.1 Triacs

Es un arreglo de triacs BTA41-400B que activa ó desactiva cada una de las salidas respectivamente controladas por el controlador CN-2010, y además es un sistema

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

de seguridad para todos los componentes. Dan la potencia para el sistema de calentamiento ó abre y cierra el sistema de enfriamiento.

2.3.2 Variac ó auto transformador variable

Un Variac consiste básicamente en un embobinado de cobre en un núcleo toroidal laminado de acero de silicón de grano orientado. Una escobilla de carbón conectada a una terminal de salida es rotada sobre una superficie maquinada de precisión y recubierta de un metal precioso, lo cual conmuta a lo largo del embobinado lo que nos permite una salida de voltaje variable.

El variac es un autotransformador con una derivación variable que permite cambiar la relación de vueltas. El voltaje de salida en el secundario puede variarse desde cero hasta 140 V, con un voltaje de entrada igual al de la línea de alimentación de C.A. 120 V 60 Hz. Uno de los usos de este instrumento es efectuar pruebas en un equipo con voltajes mayores o menores al de la línea de alimentación. El variac se conecta a la línea de alimentación, en tanto que el equipo donde se van a llevar a cabo las pruebas se conecta al variac. La disipación nominal de este debe ser igual o mayor que la potencia empleada por el equipo bajo prueba.

$V_e = 120 \text{ V.}$

$V_s = 0\text{-}140 \text{ V.}$

60 Hz.

2.3.3 Transformador

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito u otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.

El transformador de alta corriente tiene muy pocas vueltas en el secundario, obteniendo así un transformador de bajo voltaje, pero de alta corriente eléctrica. Por esta razón las vueltas en el secundario son con un conductor grueso que soporta la alta corriente. El circuito del secundario se cierra poniendo en contacto los dos extremos con una puntilla.

El transformador empleado en la máquina fue hecho en el Instituto de Física de UNAM con las siguientes características:

Relación de transformación 80:1

$P = 1 \text{ Kw.}$

$V_e =$ Proporcionada por el variac.

$V_s = 1 \text{ V } 1000 \text{ Amp.}$

2.3.4 Válvula solenoide

Es una válvula que esta normalmente cerrada y se abre cuando se hace pasar una corriente sobre el solenoide. Esta acción alivia la presión por encima del pistón de la válvula del cilindro y hace que la válvula del cilindro se abra.

$V_e = 120 \text{ V.}$

60 Hz.

2.3.5 Fuente de voltaje para el LVDT

Es una fuente de voltaje que trabaja con corriente alterna su voltaje de entrada es de 120 V y tiene una salida de $\pm 15 \text{ Vcd.}$

El diseño eléctrico-electrónico mas detallado puede verse en la (Figura 2.5)

2.4 DISEÑO ELECTRICO-ELECTRONICO

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

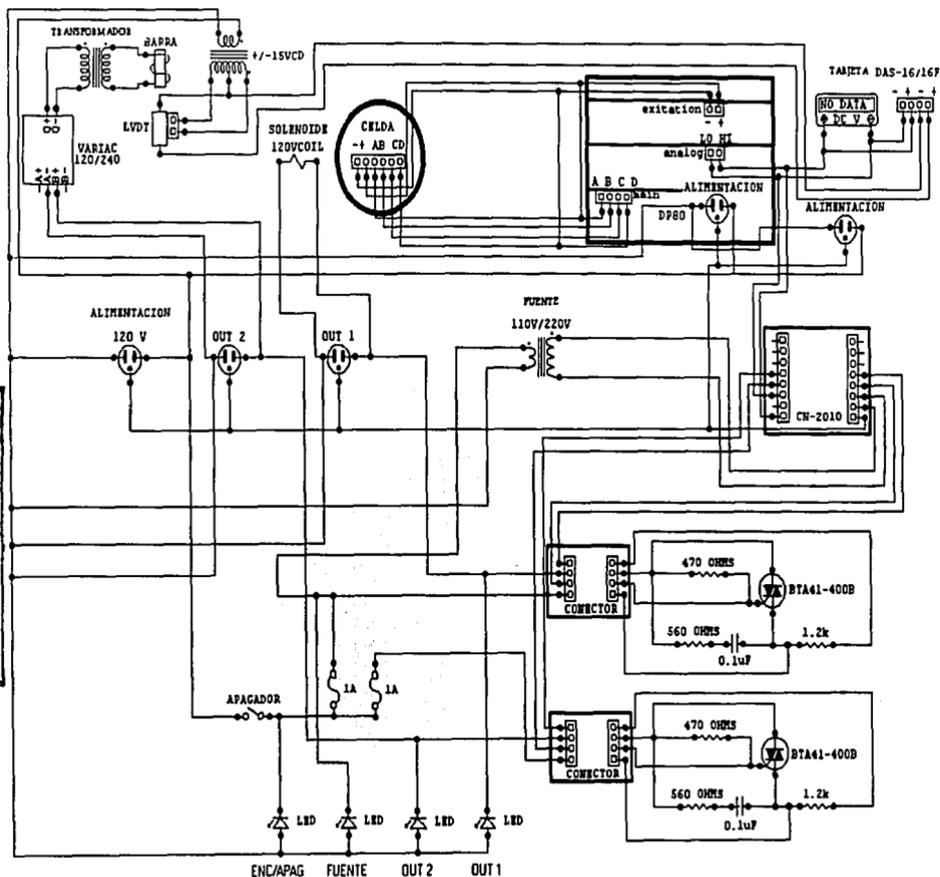


Figura 2.5 Diagrama eléctrico-electrónico.

2.5 DESCRIPCION DE LOS SENSORES Y SU CALIBRACION

2.5.1 Sensor de desplazamiento LVDT

El tipo de sensor que mide el desplazamiento de la muestra es un transductor electromecánico llamado LVDT (Linear Variable Differential Transformer) Transformador Diferencial Lineal Variable.

Tiene las siguientes características:

El LVDT modelo 100 DC-D marca SCHAEVITZ, tiene las siguientes características:

sensibilidad	0.3889 V/m
rango	± 0.254 m.
voltaje de entrada	± 15 Vcd.

El sensor cuenta con 4 cables los cuales dos son su alimentación (+ / - 15 Vcd) otro es la tierra de todo el sistema y el ultimo es la señal que manda como respuesta (volts).

El LVDT (Figura 2.4) es un transductor electromecánico que genera un voltaje de salida proporcional al desplazamiento de un núcleo movable separado, tres espirales se espacian igualmente sobre una cilindro hueco. El núcleo hecho de material ferromagnético es otro cilindro que se desplaza en forma axial. Cuando el primario, o la espiral del centro, se energiza con corriente alterna, los voltajes se inducen en las dos espirales exteriores. En aplicaciones típicas de un transformador, las espirales secundarias se conectan en oposición a la serie. Los dos voltajes en el circuito secundario, por lo tanto son opuestos en fase.

La salida de voltaje neto del transformador es la diferencia entre estos voltajes (Figura 2.6). Cuando el núcleo está en la posición del centro, el voltaje es cero. Esta es la posición nula.

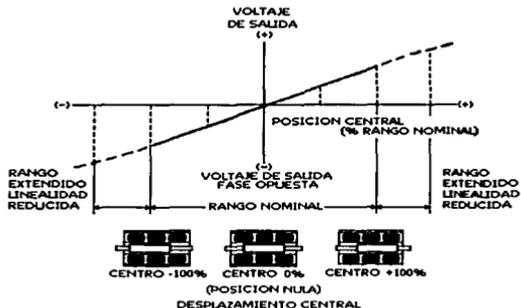


Figura 2.6 Voltaje de salida y fase como función de la posición central.

Cuando el núcleo se mueve desde la posición nula, el voltaje inducido en la espiral hacia el núcleo se va aumentando, mientras el voltaje inducido en las espirales opuestas disminuye. Esto produce un rendimiento diferencial de voltaje que varía con los cambios en la posición del núcleo.

2.5.2 Calibración del LVDT

Para su calibración fue necesario montar el LVDT en un tornillo micrométrico de precisión (Figura 2.7) en el cual con una serie de desplazamientos conocidos y en ambos sentidos fueron medidos en relación con su voltaje de salida. De esta forma no solo se calibro el LVDT, sino se obtuvo también una ecuación de relación entre voltaje y desplazamiento (Figura 2.8).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

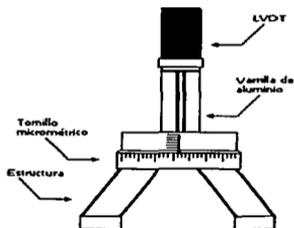


Figura 2.7 Tornillo micrométrico de precisión

2.5.3 Datos obtenidos en el tornillo micrométrico

mm	Volts (+)	Volts (-)
0 + / - 0.005	0 + / - 0.005	0 + / - 0.005
0.100	0.3889	-0.3849
0.200	0.7758	-0.7727
0.300	1.1592	-1.1574
0.400	1.5475	-1.5441
0.500	1.9307	-1.9284
0.600	2.3181	-2.3145
0.700	2.7033	-2.7006
0.800	3.0905	-3.0849
0.900	3.4786	-3.4704
1	3.8676	-3.8622
1.100	4.2585	-4.2452
1.200	4.6473	-4.6344
1.300	5.0371	-5.0142
1.400	5.4220	-5.4011
1.500	5.8159	-5.7883
1.600	6.2083	-6.1787
1.700	6.5965	-6.5598
1.800	6.9867	-6.9430
1.900	7.3747	-7.3306
2	7.7667	-7.7152
2.100	8.1604	-8.1046
2.200	8.5515	-8.4846
2.300	8.9409	-8.8720
2.400	9.3237	-9.2505

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

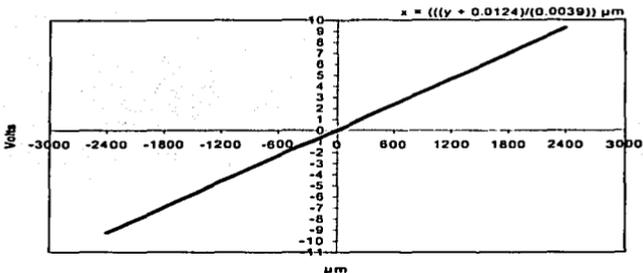


Figura 2.8 Calibración LVDT

2.5.4 Celda de carga

La celda de carga de tensión y de compresión de la serie de Omega LCH utiliza galgas de extensión (strain gauges) para su operación, toda la construcción es de acero inoxidable para asegurar estabilidad y confiabilidad a largo plazo en ambientes severos. La celda de carga va de un rango de 0-50 Kg. Se diseñan para ser montadas por los 8 agujeros directos y el eje de centro roscado para darle estabilidad mecánica (Figura 2.9).

La celda de carga da una respuesta en volts que se traducen a libras ó Kg. La calibración de la celda, se puede hacer a través de pesos muertos o electrónicamente.

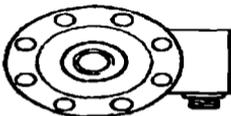


Figura 2.9 Vista superior de la celda de carga

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La celda de carga que se utilizo es un LCH-100 marca OMEGA, tiene las siguientes características:

Sensibilidad	4.5 Kg/V
Rango	45 Kg.
Voltaje de entrada	10 Vcd.
Voltaje de salida	excitación del DP80.

2.5.5 Calibración de la celda de carga

La calibración de esta celda se hace mediante el Indicador Digital de Tensión OMEGA DP80 [1] esto es similar a la calibración del LVDT, se tiene que tener una linealidad de presión contra voltaje (Figura 2.10).

Para establecer esta linealidad en el OMEGA DP80 se tiene que seguir los siguientes pasos de programación:

El método de calibración 3-puntos **3PT-CAL**. Requiere que se suministre tan solo dos fuerzas en el transductor (celda de carga) PNT1 (punto 1) y PNT2 (punto 2) y es opcional el punto medio MID PNT si se requiere tener mayor exactitud. La fuerza del punto medio MID PNT no necesita ser exactamente el punto medio entre PNT1 y PNT2, pero debe ser mayor que PNT1 y menor que PNT2. La aplicación de fuerzas para **3PT CAL** debe seguir los siguientes pasos:

Parte frontal del DP80:

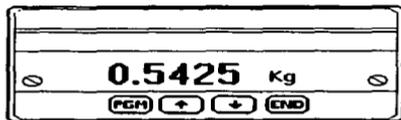


Figura 2.10 vista frontal del controlador DP-80

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

1. Se oprime **PGM** y aparece **SETUP** en la pantalla del controlador y se oprime cualquiera de las flechas para localizar **3PT CAL** y se oprime **ENT**.
2. En la pantalla mostrara **BUSY** así como el indicador medirá la excitación de voltaje. Si el voltaje esta fuera de rango nos indicara un error y en la pantalla mostrara **EXCV ERR**, si esto ocurre se tendrá que revisar las conexiones tanto de la celda como del controlador
3. Después de ser valida la excitación de voltaje, la pantalla mostrara **SET PNT1** que es el primer punto para comenzar la programación. Se aplica una cantidad de fuerza en el transductor en este caso se coloco una carga de 1 libra. Se presiona **ENT**.
4. La pantalla mostrara **POLARITY**. Inicialmente la polaridad del controlador es positiva (+), si se requiere polaridad negativa (-) se consigue presionado las flechas. Ya que la elección sea establecida se presiona **ENT**
5. En la pantalla se mostrara **NUMERICAL VALUE**. En esta pantalla se coloca el valor de la carga que esta sobre la celda y se oprime **ENT**.
6. En la siguiente pantalla se ajusta el punto decimal y se oprime **ENT**.
7. En al siguiente pantalla se seleccionan las unidades con las que se de sea trabajar (LBS, KG, ó PSI) y se oprime **ENT**.
8. En la pantalla mostrara **BUSY**. Si es correcta la programación de la primera carga mostrara en pantalla **MID PNT?** Por unos segundos y cambiara a **YES** esto significa que si se desea tener el punto medio, si es así se oprime **ENT**, si no se cambia a **NO** con las flechas y se oprime **ENT**.

9. En este caso para tener mayor exactitud se utilizo el punto medio. En pantalla mostrara **SET MID** que es la segunda carga requerida para este caso se utilizaron 20 libras. Se oprime **ENT**.
10. Se repiten los pasos (4,5,6) esto es para completar el **SET MID** recordar que esta carga debe ser mayor que **SET PNT1** y se oprime **ENT**.
11. Aparece en pantalla **BUSY** y si es correcta la calibración del **SET MID** saldrá en pantalla **SET PNT2**, si hubo un error en la calibración indicara **INPT ERR** y regresara a la pantalla **SET MID** y se tendrán que repetir los pasos (4,5,6,) hasta que aparezca en pantalla **SET PNT2**. Se coloca la tercer carga verificando que sea mayor a **MID PT** para este caso se colocaron 40 libras. Se oprime **ENT**.
12. Se repiten los pasos (4,5,6,) y se completa la calibración de la celda de carga se oprime **ENT**, Si hay algún error ver el punto (9). Si esta calibración fue correcta en pantalla se desplegara el mensaje **SETUP OK** por dos segundos, con esto se completa el procedimiento de **3PT CAL**.

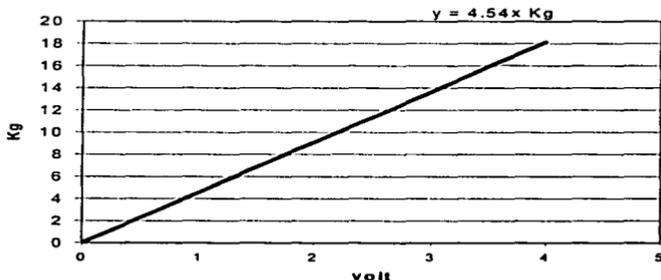


Figura 2.11 Calibración de la celda de carga.

2.5.6 Controlador CN-2010

Los controladores programables (Figura 2.4) de la serie de OMEGA CN-2010 tienen entradas que pueden ser sensores de temperatura de alambre RTD de termopar o con tres señales del voltaje, virtualmente cualquier variable del proceso (para este caso la señal del LVDT o celda de carga). Los tipos de la salida son relevadores de estado sólido, o salidas análogas, con ON / OFF o proporcionan modos del control.

El controlador CN-2010 ofrece las funciones de Rampa y Meseta, cada intervalo puede tener una duración de tiempo de hasta 100 horas y hasta 254 ciclos de repetición posibles. El controlador CN-2010 puede también almacenar hasta nueve diversos puntos de ajuste en su memoria.

Este controlador tiene dos tipos de salidas, en este caso, en la salida 1 se obtiene la señal necesaria para alimentar al variac, por medio de este se controla al transformador de la máquina termoneumática, con lo cual obtenemos que la barra se expanda térmicamente.

Pero si estos valores oscilan mucho se tiene otra salida la salida 2 en la cual se conecta una válvula de solenoide la cual abre o cierra un compresor de aire de esta manera regula la temperatura de la barra, también puede abrir o cerrar una fuente suministradora de agua para el mismo propósito.

Esto quiere decir que las dos salidas trabajan simultáneamente de acuerdo con la programación que se establezca, tiene las siguientes características:

Voltaje de entrada	117 V (220 o 240 V opcional)
Voltaje de salida	0 – 5 Vcd
Rango de aplicación	0 – 5 Vcd, 0 – 10 Vcd, 0 – 100 mV

2.5.7 Programación del controlador CN-2010

Este controlador requiere una programación para su funcionamiento, en este caso se hizo la programación de mesetas y rampas. La descripción de la función del panel de control del CN-2010 se muestra en la siguiente figura:

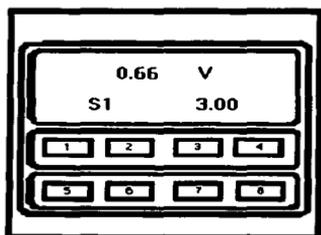


Figura 2.12 Vista frontal del controlador CN-2010

- 1- PARAM CHECK.
- 2- YES / flecha hacia arriba.
- 3- NO / flecha hacia abajo.
- 4- DISPLAY.
- 5- TUNE / RETURN.
- 6- AUTO / MANUAL.
- 7- START / STOP.
- 8- LAST.

2.5.8 Procedimiento de programación.

1. Para el caso de mesetas y rampas, una vez encendida la máquina y el controlador se requiere esperar 30 minutos para el calentamiento de todo el

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

sistema. Ya transcurrido este tiempo, la pantalla del controlador CN-2010 muestra en la parte superior el voltaje en el que se encuentra en ese momento la celda de carga. En la parte inferior muestra **S1** que es el voltaje a llegar en una anterior calibración.

2. Se tiene que oprimir consecutivamente las teclas (5,6,7) **TUNE-LAST-YES** para empezar la programación de una meseta. La pantalla muestra en la parte superior **SET PT1** y el indicador **TUN** encendido en la parte derecha de la pantalla esto quiere decir que esta en la etapa de programación. En la parte inferior indica el voltaje a llegar en este primer punto **Volts** este voltaje es el que estaba programado desde una anterior calibración, si se requiere un voltaje diferente para la primer rampa se hace oprimiendo las teclas de las flechas (2, 3) y muestra **MAN** parpadeando desde que se enciende el controlador (este se apaga poniendo en operación la máquina).
3. Se oprime la tecla (1) **PARAM CHECK** y muestra en la parte superior de la pantalla **ALARM 1** y que en la parte inferior se cambia el voltaje con las teclas de flechas (2,3).
4. Este voltaje debe ser mayor que el de la meseta deseada por lo menos un volt ya que si el voltaje de la rampa sobrepasa ese limite, en pantalla lo indicara, recordar que sigue parpadeando **MAN** y permanece encendido **TUN**.
5. Se oprime **PARAM CHECK** y muestra en pantalla **ALARM 2** que también se ajusta con las flechas, pero este voltaje es igual al de inicio del sistema por lo que si es superior, el sistema lo primero que hará será igualarlo y después iniciar su ciclo.
6. Se oprime **PARAM CHECK** y en pantalla indica **TUNE 7 OUTPUTS**, recordando que sigue parpadeando **MAN** y permanece encendido **TUN**.

7. Se oprime nuevamente **PARAM CHECK** y mostrara en pantalla **RAMP AND SOAK 7** esto indica la calibración de rampas y aceptamos la calibración con solo oprimir la tecla con la flecha hacia arriba ó **YES**. Por consiguiente mostrara en pantalla **SET PT 0** que indica que calibremos el voltaje de arranque que tendrá todo el sistema, este procedimiento se realiza con las flechas.
8. Ya indicado el voltaje de inicio del sistema, se oprime la tecla **PARAM CHECK** y mostrara en la pantalla **TIME 1** que es el primer tiempo que queremos que tarde en completar la primera subida de la rampa (se ajusta con las flechas 2, 3) recordar que sigue encendido **TUN** y parpadea **MAN**.
9. Se oprime nuevamente **PARAM CHECK** que en esta ocasión mostrara **SET PT 1** ya antes calibrado, pero se tiene que recalibrar para la nueva programación de rampas, este voltaje que se indica con las flecha es al que se llegara en el tiempo 1 ya antes programado.
10. Se oprime **PARAM CHECK** y mostrara en pantalla **TIME 2** que es el segundo tiempo y se programa igual que en el paso 8. Pero este tiempo es el que se requiere que tarde en la meseta.
11. Se oprime **PARAM CHECK** y en este caso muestra **SET PT 2** que se calibra igual que el paso 9. Pero a este se le indica el mismo voltaje para que permanezca en la meseta.
12. Se oprime **PARAM CHECK** y mostrara en la pantalla **TIME 3** que es el tiempo en el que se completará la rampa de bajada, para tener simetría se le da el mismo tiempo que el ya indicado en el paso 8.

13. Se oprime **PARAM CHECK** y mostrara en pantalla **SET PT 3** que es el ultimo voltaje que se requiere y que es el mismo que se indico en el paso 7.
14. Se oprime nuevamente **PARAM CHECK** y pedirá **TIME 4** que para cancelarlo solo se le pone cero en el tiempo y se oprime nuevamente **PARAM CHECK**.
15. En pantalla mostrara **CYCLES** pero en la parte inferior se le indica cuantos ciclos se requieren, que en el caso de solo una meseta es un ciclo y si se quiere que se repita se le indican dos ciclos.
16. Se oprime **PARAM CHECK** y mostrara en pantalla **ASSURED SOAK 7** y nuevamente se oprime **PARAM CHECK**, pero en este caso saldrá en pantalla **END OF TUNE** esto indica el fin de la programación de la rampa y se acepta oprimiendo la tecla **TUNE** y con esto esta terminada la programación y se apaga el indicador **TUN [2]**.

Para el caso de calentamiento en tres puntos solo se requiere seguir los pasos de la primer rampa que son 1 – 9 y después los pasos 14 – 16.

Todos estos pasos son los que se siguieron para calibrar la máquina en una de las pruebas, se pueden ocupar otros datos a como el programador desee

2.5.9 Tarjeta analógica digital

Se utilizo una tarjeta Omega Das-16/16F, es una tarjeta de adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos, la cual permite varios rangos de voltaje, tiene entradas A/D o D/A, cuenta con 8 canales de entrada bipolar que puede trabajar con los siguientes rangos ± 0.5 V, ± 1 V, ± 2.5 V, ± 5 V, y ± 10 V. Para este caso se utilizó el rango de ± 10 V que es utilizado por los sensores. Esta tarjeta se conecto a una PC (procesador 386).

2.5.10 Programa de adquisición de datos

Los datos obtenidos de desplazamiento y compresión son almacenados y gráficos en un software llamado "Test Point", este programa se utiliza en cuestiones de investigación por su confiabilidad y fácil manejo. El archivo ejecutable "C:\TESTPT\IMEMTN.TST" el cual se realizó mediante una programación previamente desarrollada [3]. El cual se encarga de almacenar los datos de voltajes a intervalos de 10 segundos entre cada lectura. Los datos obtenidos se gráficos ya sea en Microsoft Excel o Microcal Origin.

Una vez dentro de C:\TESTPT\IMEMTN.TST, se despliega una pantalla en donde se observan los botones de arranque y paro de la prueba, además simultáneamente medidas de frecuencia y voltaje y la posibilidad de escoger la unidad y el nombre del archivo de almacenamiento, además muestra de manera importante una gráfica de la prueba en tiempo real con opciones de zoom. Es así como se puede observar y analizar en el mismo instante de la prueba los resultados en forma preliminar (Figura 2.13).

2.6 MANUAL DE OPERACION

Para el buen funcionamiento deben cumplirse las siguientes condiciones necesarias para la puesta en operación de la máquina termoneumática:

2.6.1 Pasos a verificar

1. Que este en OFF tanto el switch del variac, como el transformador 220V/110V del controlador CN-2010, la fuente de alimentación del LVDT y que el variac este marcando cero volts.

2. Que las conexiones del LVDT, del controlador OMEGA DP80 y de los multímetros tengan la polaridad correcta para conectarse a los canales de la PC.

2.6.2 Secuencia de encendido

1. Conectar la línea de alimentación de los triacs a la toma de corriente.
2. Colocar en ON el switch el transformador 220 V/110 V que es el que alimenta al CN-2010, también el switch de la parte frontal que alimenta los triacs, cuando este switch entra en operación el controlador CN-2010 manda una señal de prueba al triac de la salida 1, por eso es importante que el switch del variac este en OFF.
3. Enseguida se conecta el controlador OMEGA DP80, la fuente del LVDT, los multímetros y la PC.
4. Verificar que la banda del compresor no este obstaculizada, y conectarlo a la toma de corriente.
5. Encender la PC.

NOTA: Recordar dejar que todo el sistema electrónico se estabilice por lo menos 30 minutos antes de realizar cualquier tipo de calibración y/o programación.

2.7 CALIBRACIÓN Y PROGRAMACIÓN

2.7.1 Pasos a verificar

1. La celda de carga no tenga compresión y que el indicador del controlador OMEGA DP80 este en funcionamiento.
2. La colocación de la muestra en el punto de medición de la celda de carga, y centrarla en los tres puntos de soporte.
3. El cilindro del LVDT se calibra hasta que indique una posición neutral (cero) con el núcleo asentado en la muestra.
4. Con la PC encendida entrar al programa Test Point de ahí buscar el archivo C:\TESTPT\IMEMTN.TST colocarlo en modo RUN.
5. En el controlador CN-2010 establecer los parámetros de funcionamiento los cuales los designa el operador.
6. Verificar que el voltaje de la pantalla del CN-2010 sea igual al del multímetro ya que este voltaje es la salida analógica del controlador OMEGA DP80.
7. Colocar en ON el switch del variac y establecer el voltaje al que se requiere trabajar.
8. Que el LVDT este marcando cero para que empiece el desplazamiento, esto se realiza con la ayuda de otro multímetro.
9. Abrir la llave del solenoide para que entre en funcionamiento.

2.8 PUESTA EN OPERACION

1. En la pantalla de la PC debe aparecer la siguiente ventana (Figura 2.13). Se oprime el botón ARRANCAR A/D para que el sistema de adquisición de datos comience.

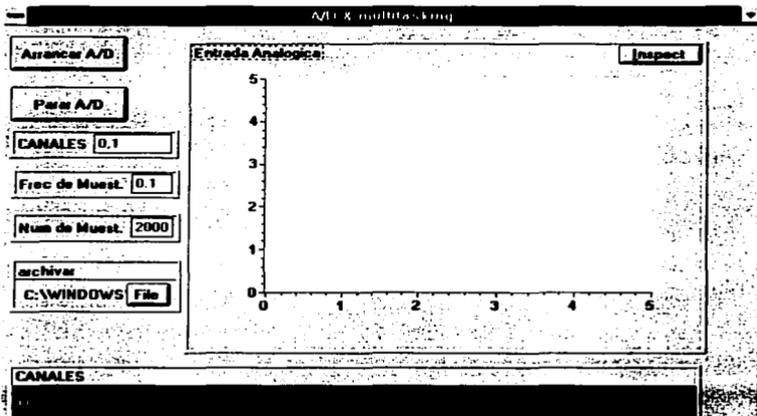


Figura 2.13 Pantalla del programa Test Point

2. En seguida el controlador CN-2010 se pone en operación oprimiendo el botón START / STOP y en la pantalla deja de parpadear el indicador MAN, esto significa que comenzó el ciclo de funcionamiento previamente programado
3. De esta manera empieza el ciclo programado en todo el sistema.

2.9 REFERENCIAS

[1] Manual de operación Controlador OMEGA modelo DP80 Digital Strain Indicator, OMEGA engineering, Inc.

[2] Manual de operación Controlador OMEGA modelo CN-2010 Programmable Controller, OMEGA engineering, Inc.

[3] Uriel Vera, Orlando Garcia, "Diseño mecánico, electrónico, instrumentación y control en experimentos de Física", Servicio Social, 2000.

Asesor: Dr. Eligio A. Orozco Mendoza.

CAPITULO III

CARACTERIZACION Y APLICACIONES DE LA MAQUINA TERMONEUMATICA

En este capítulo se presentan resultados relacionados con el proceso de control de la máquina termoneumática para conocer su rango de aplicación, se incluyen curvas de calentamiento con la máquina sin control, también se presentan curvas que se obtuvieron usando el sistema de control enfriando con aire y agua, al final se muestran pruebas mecánicas realizadas en diversos materiales frágiles.

3.1 CALENTAMIENTO MEDIDO CON LVDT

Para conocer el tiempo que la máquina de expansión térmica tarda en llegar a su máxima dilatación aplicando diferentes potencias, se hicieron varias pruebas con la máquina libre, esto quiere decir que no se deformó ninguna muestra, se midió la expansión con el sensor de desplazamiento (LVDT) para obtener el máximo desplazamiento de la barra. Las pruebas que se realizaron se muestran en la figura 3.1

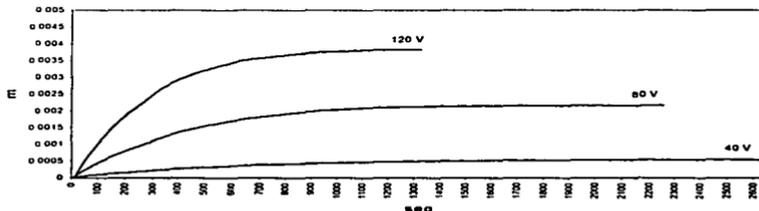


Figura 3.1 Expansión libre de la máquina medida con el LVDT.

Como era de esperarse las curvas de calentamiento son de tipo exponencial (ver cap. I). Aplicando 40, 80 y 120 V con el variac, se consiguieron dilataciones máximas de 0.55×10^{-3} m, 2.17×10^{-3} m y 3.84×10^{-3} m respectivamente. Las velocidades máximas medidas al inicio del proceso de expansión fueron de 0.64×10^{-6} m/seg., 3.47×10^{-6} m/seg. y 9.84×10^{-6} m/seg.

Así que la máxima expansión que se obtuvo es de 3.8×10^{-3} m y la velocidad máxima de dilatación de la barra es 9.84×10^{-6} m/seg. (inicio de la curva de 120 V ver Figura 3.1)

3.2 CALENTAMIENTO MEDIDO CON LA CELDA DE CARGA

Estas curvas muestran la máxima fuerza que se obtiene con la barra cuando se aplican diferentes voltajes, en este caso la barra actúa directamente sobre la celda de carga. Se hicieron cuatro pruebas, y una vez más, se obtuvieron curvas tipo exponencial. Se hace la aclaración que la máxima compresión que se puede aplicar es de 45.4 Kg. por el tipo de celda que se uso. (ver capítulo II)

Las pruebas que se realizaron se muestran en la figura 3.2

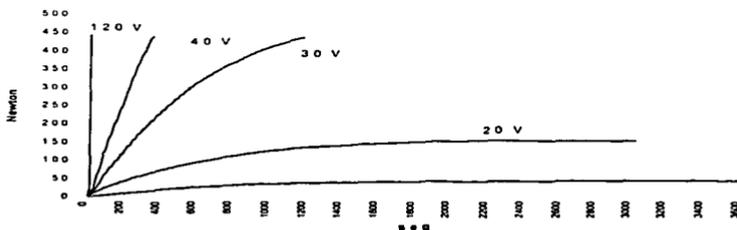


Figura 3.2 Calentamiento libre detectado por la Celda.

En este caso se obtuvo:

Aplicando 10, 20, 30 y 40 V con el variac, se logran dilataciones máximas de 43.7108 N, 152.4448 N, 435.8053 N y 438.8499 N respectivamente, con velocidades de carga máximas de 0.0147 N/seg. 0.2288 N/seg. 0.4526 N/seg. y 0.7271 N/seg. respectivamente.

A 30 y 40 V se tuvieron que suspender las pruebas para no rebasar el límite de sensibilidad de la celda de carga. Mayores potencias aplicadas llevaría a velocidades de carga mas altas.

En resumen el rango de aplicación de la máquina es:

Voltaje (V)	10	20	30	40	80	120
Expansión (m)				0.55*10 ⁻³	2.17*10 ⁻³	3.84*10 ⁻³
Carga (N)	43.7108	152.4448	435.8053	438.8499		444.5828
Velocidad máxima de expansión (m/seg)				0.64*10 ⁻⁶	3.47*10 ⁻⁶	9.84*10 ⁻⁶
Velocidad de carga (N/seg)	0.0147	0.2288	0.4526	0.7271		14.8194

Tabla 3.1 Rango de aplicación

3.3 PRUEBAS CON CONTROL

El sistema de control de la máquina se basa (como ya se menciona) en el calentamiento y enfriamiento de la barra, la máquina permite controlar con el

sensor de desplazamiento (LVDT) ó el de carga (LC), así que las posibilidades de control son amplias. En este trabajo sólo se presentan los resultados obtenidos controlando con la señal del LVDT aplicando potencias del 70% (aproximadamente 85 V en el variac lo cual garantiza llegar al máximo de la carga en la celda). Esta forma de control permitió realizar experimentos en diferentes materiales frágiles como se vera mas adelante.

Se enfrió el sistema inyectando aire o agua y se fijaron expansiones máximas del orden de 1×10^{-3} m con velocidades de dilatación inferiores a la máxima que se puede obtener aplicando 85 V para así garantizar expansión lineal. La zona de trabajo se muestra en la figura 3.3, que es suficiente para el estudio de muestras frágiles como se verá mas adelante. Cabe mencionar que en todos los casos las muestras que se utilizan en la máquina funcionan como un tipo de amortiguador.

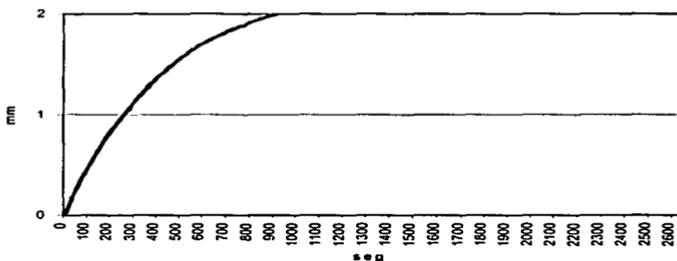


Figura 3.3 Zona de trabajo.

3.3.1 Control de la máquina enfriando con aire y agua

Con el controlador OMEGA CN-2010 se programo una rampa de calentamiento seguida de una meseta y después de una rampa de enfriamiento, cada una de

ellas de aproximadamente media hora de duración, en general, se obtuvo un buen control en el proceso de expansión y contracción de la barra para ambos esquemas de enfriamiento (aire y agua) la diferencia se observa en el tamaño de las oscilaciones provocadas durante el proceso de encendido y apagado de la máquina, por ejemplo, al enfriar con aire, la amplitud de las oscilaciones es del orden de 4×10^{-5} m mientras que con agua la amplitud está entre 1×10^{-5} y 2×10^{-5} m, (Figura 3.4 a y b respectivamente).

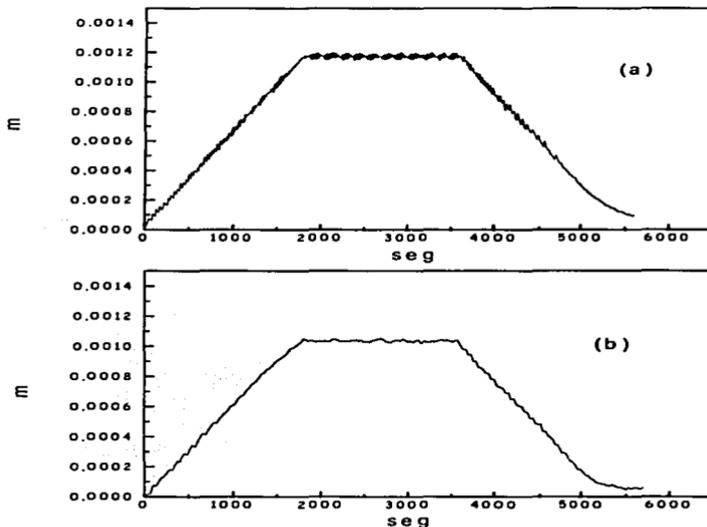


Figura 3.4 Calentamiento con control enfriando con aire (a) y con agua (b).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.3.2 Diferentes velocidades

Con la máquina termoneumática se pueden realizar pruebas a distintas velocidades, en la figura 3.5 se muestran distintas velocidades a) 7.65×10^{-8} m/seg, b) 3.98×10^{-8} m/seg, c) 2×10^{-8} m/seg, el tiempo de calentamiento para cada prueba fue de 3, 6 y 12 horas respectivamente. Se pueden hacer pruebas de varios días o semanas de duración con suficiente estabilidad en el sistema de control, por ejemplo de estabilidad en el suministro de corriente de línea y de estabilidad térmica en el ambiente del laboratorio, aunque en principio esto sería compensado por el sistema de control de la máquina.

El tipo de pruebas corresponderían a las llamadas pruebas de deformación superelásticas con velocidades inferiores a 1×10^{-9} m/seg.

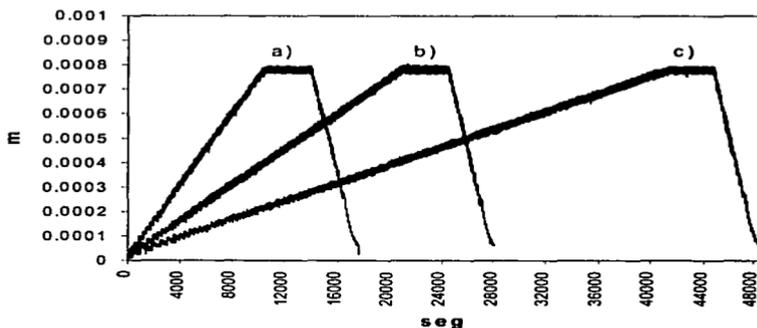


Figura 3. 5 Diferentes rampas de calentamiento con control.

3.3.3 Rampas múltiples

Se incluyen dos casos en el que se programaron varias rampas y mesetas, simulando por ejemplo una prueba de fatiga de bajo ciclaje, en este caso el enfriamiento se hizo con aire (Figura 3.6).

Una vez más se obtuvieron resultados razonables que muestran la versatilidad del sistema de control que se uso.

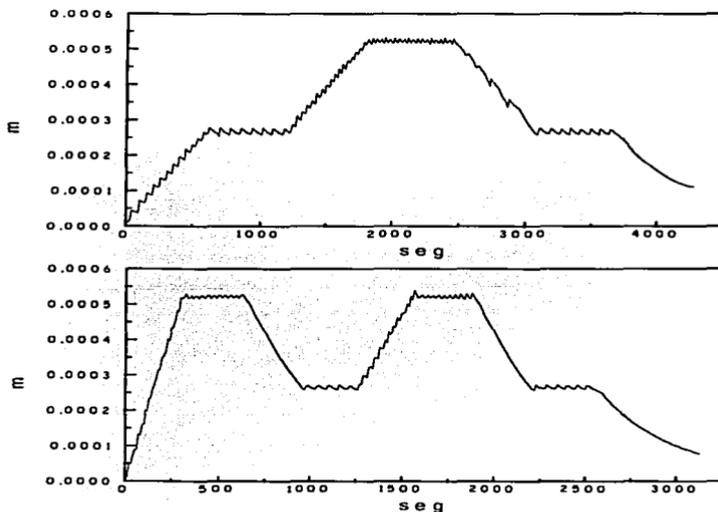


Figura 3.6 Rampas con control enfriadas con aire.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

3.4 APLICACIONES

El tipo de pruebas que se pueden realizar está limitado por el intervalo de expansión y la resistencia mecánica del sistema de aplicación de carga de la máquina (rigidez del sistema). En principio, se pueden hacer pruebas de compresión de dureza a velocidad de penetración o de carga constante y de flexión en tres o cuatro puntos.

3.4.1 Flexión en tres puntos

En el caso de los materiales frágiles es difícil la preparación y el ensayo adecuado de probetas de tensión; por consiguiente para caracterización mecánica se emplean ensayos de flexión o compresión [1]. El material (por ejemplo un cerámico estructural o un carburo sinterizado) se prepara en forma de un paralelepípedo, de sección transversal rectangular. Estos materiales se pueden probar utilizando el ensayo de flexión (Figura 3.7)

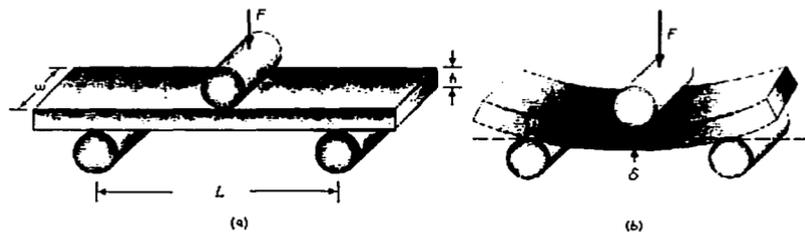


Figura 3.7 (a) Esquema del ensayo de flexión en tres puntos utilizado para medir la resistencia de materiales frágiles y (b) deflexión δ que se mide durante la flexión de la probeta.

Al aplicar la carga en tres puntos causando flexión, actúa una fuerza que provoca tensión sobre la superficie, opuesta al punto medio de la probeta. La fractura iniciará en este sitio.

La resistencia a la flexión, o módulo de ruptura describe la resistencia del material [Figura 3.7 (a)]

$$\text{Resistencia a la flexión} = \frac{3FL}{2wh^2} \quad (3.1)$$

donde:

L = Distancia entre los dos puntos de apoyo.

F = Carga a la fractura.

w = Ancho de la probeta.

h = Altura de la probeta.

Otro parámetro que se puede medir con este sistema es el módulo de elasticidad a la flexión o módulo en flexión [Figura 3.7 (b)] se calcula:

$$\text{Módulo en flexión} = \frac{L^3 F}{4wh^3 \delta} \quad (3.2)$$

donde:

δ = es la deflexión de la muestra en la parte central de la muestra al aplicar una fuerza F.

3.4.2 Normas ASTM (THE AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS)

C674-88 (Reaprobada 1999)

NORMA PARA PRUEBAS EN PROPIEDADES DE FLEXION DE MATERIALES CERAMICOS. [2]

Estas pruebas son para obtener el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad en tres puntos en materiales cerámicos hechos mediante cualquier método de fabricación y son aplicables para probetas pulidas y no pulidas.

Las probetas pueden ser rectangulares o cilíndricas (en este caso solo interesan las de forma rectangular) estas se colocan en el filo de los soportes inferiores y sobre ellos esta el tercer punto en el cual se aplica la carga, entre los soportes inferiores es donde la ruptura o la deflexión ocurre. Para estas normas las dimensiones de las muestras son aproximadamente de 25.4 mm de ancho, 12.7 mm de grosor y 114 ± 6 mm de largo en cambio las muestras que se utilizaron para las pruebas son mas pequeñas y esa es la ventaja de la máquina. En esta norma de la ASTM se aplican las ecuaciones (3.1) y (3.2).

La máquina usada para estas pruebas tiene las siguientes medidas:

Para el soporte de las probetas, se tienen dos soportes de acero con punta afilada con un radio de 3.18 mm y una separación de 102 mm entre ellos, el punto de carga se encuentra exactamente en medio de estos dos soportes también cuenta con la punta afilada tiene el mismo radio.

En este caso se utilizaron probetas subdimensionadas, pero como se verá mas adelante los resultados obtenidos se acercan mucho a los de la literatura.

Otras normas aplicables a este caso son:

D5934-96

NORMA PARA PRUEBAS PARA DETERMINAR EL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA PLÁSTICOS RÍGIDOS Y SEMI-RÍGIDOS CON UNA VELOCIDAD DE CARGA CONTROLADA USANDO TRES PUNTOS DE FLEXIÓN. [3]

Este método usa una velocidad de carga controlada mecánicamente instrumentada para la obtención y reporte del módulo de elasticidad en termoplásticos y plásticos de forma rectangular, los datos son generados usando la técnica de flexión en tres puntos, esta debe ser usada para identificar las propiedades termomecánicas de los materiales plásticos.

Las probetas son de sección rectangular y son probadas en flexión. Las barras descansan en dos soportes y su punto de carga esta entre estos dos soportes.

Los datos obtenidos pueden ser usados para control de calidad, investigación y desarrollo y para establecer condiciones optimas de procesos.

C158-95

NORMA PARA PRUEBAS DE ESFUERZOS DEL VIDRIO POR FLEXIÓN. (DETERMINACION DEL MÓDULO DE RUPTURA). [4]

Este método abarca la determinación del módulo de ruptura en flexión de vidrios y vidrio-cerámicos, es aplicable para vidrios templados y pretensionados y vidrio-cerámicos. El módulo de ruptura en flexión, es el valor máximo de tensión.

3.4.3 Rigidez de la máquina

Una característica importante para saber el rango de aplicación de la máquina es la que se conoce como rigidez. La propiedad que tiene un material para resistir deformaciones se llama rigidez, en este caso la máquina termoneumática tendrá una rigidez asociada que abarca la deformación de la estructura del soporte de la muestra y de la celda de carga. Para tener una estimación de la rigidez de la máquina. Se hicieron una serie de pruebas de flexión en tres puntos utilizando probetas de sección rectangular de acero cuyas dimensiones fueron (2.9 X 5.34 X 35.3 mm).

Se calculo el módulo en flexión con la ecuación (3.2), en promedio el valor obtenido es 63.3387 GPa. Se comparo el módulo de elasticidad en corte del acero que es de 63.4 GPa [5] se comprobó que la máquina es tan rígida como este material, por lo tanto se puede usar la máquina para estudiar materiales de rigidez sea menor a este valor.

3.4.4 Pruebas en materiales frágiles

Para mostrar posibles aplicaciones de la máquina usando el sistema de control, se realizaron pruebas de deformación en diferentes materiales a velocidad de expansión constante. Los experimentos se hicieron con el aditamento especial para pruebas de flexión en tres puntos (capítulo II).

Cuarzo amorfo (SiO₂)

El cuarzo es uno de los minerales más abundantes de la corteza terrestre y uno de los mas usados en la industria convencional y de alta tecnología. Posee propiedades piezoeléctricas, esto es que, bajo el efecto de tensiones mecánicas surgen en él cargas eléctricas, lo cual es aprovechado desde hace muchos años en

la industria eléctrica [6]. El cuarzo también posee propiedades ópticas importantes para muchas otras aplicaciones. Por ejemplo hasta hace poco los lentes de los grandes telescopios estaban hechos de cuarzo amorfo. Conocer la resistencia mecánica del material es fundamental para el diseño de esas lentes.

Se realizaron pruebas en muestras de SiO_2 amorfo con impurezas de Na y Pb, se utilizaron probetas de sección rectangular de dimensiones (2.9 X 4.14 X 36.84 mm); (Figura 3.8).



Figura 3.8 Probeta de SiO_2 .

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.9 con una velocidad de carga de 1.2081 N/seg.

En este caso se calculo la resistencia a la flexión o módulo de ruptura aplicando la ecuación (3.1) el valor promedio fue 66 ± 3 MPa.

Comparando los resultados con la literatura para SiO_2 al 100% puro se tiene que el módulo de ruptura es de 110 Pa [7]. La diferencia no sorprende si se toma en cuenta que las muestras usadas contienen impurezas y eran de baja calidad microestructural.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

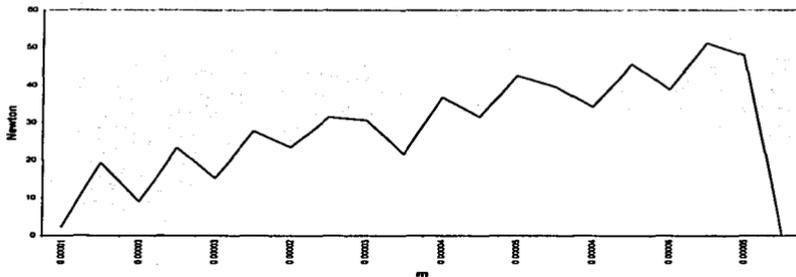


Figura 3.9 Prueba de flexión en tres puntos en SiO_2 amorfo.

Alumina (Al_2O_3)

Debido a su notable dureza, el Al_2O_3 tiene aplicaciones como material abrasivo, no se funde al soplete ni se disuelve en ácidos. Se emplea en la fabricación de discos de esmeril, papel de lija, polvos para pulir diferentes artículos (principalmente metálicos), también como sustrato aislante para soporte de circuitos integrados, también como aislante de bujías, uso dental y medico incluyendo restauraciones de dientes, relleno de huesos e implantes ortopédicos. Una de sus aplicaciones más importantes es en la construcción de crisoles para aplicaciones de alta temperatura [8].

Se realizaron pruebas de flexión en probetas de sección rectangular de dimensiones (3.32 X 5.1 X 34.32 mm) (Figura 3.11).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 3.11 Probeta de Al_2O_3 .

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.12 con una velocidad de carga de 0.2714 N/seg.

En este caso la resistencia a la flexión o módulo de ruptura, dio un valor promedio de $192. \pm 10$ MPa.

Comparando con resultados de la literatura para Al_2O_3 al 86% de densidad, el módulo es de 250 MPa y al 66% es de 192 MPa [9]. No se midió la densidad de las muestras, pero es probable que este entre el 60 y 70%.

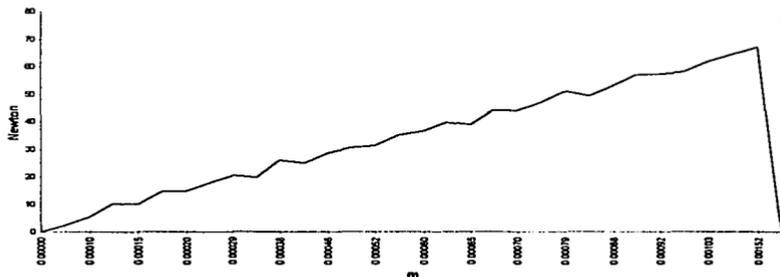


Figura 3.12 Prueba de flexión en tres puntos en Al_2O_3 .

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Methyl Methacrylate (Lucita)

Este plástico resulta directamente de la polimerización del ácido metacrílico. Las resinas acrílicas se relacionan íntimamente con las vinílicas. La lucita tiene la propiedad única de transmitir la luz alrededor de las esquinas y bordes, y de ahí que se emplee en la fabricación de focos para adornos y principalmente, para ciertos aparatos dentales y de cirugía de autoiluminación, así como para reflectores de señales de carreteras. También se emplean para la fabricación de mangueras, ventanillas de aviones, etc. [10].

Se utilizaron probetas de sección rectangular de dimensiones (3.4 X 5.34 X 35.8 mm) (Figura 3.13).



Figura 3.13 Probeta de methyl methacrylate.

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.14 (a) con una velocidad de carga de 1.0723 N/seg.

Calculando la resistencia a la flexión, se obtuvo $49. \pm 5$ MPa en promedio.

Comparados los resultados con la literatura, el módulo de ruptura va de 34 a 75 Mpa para estos plásticos, así que los valores que se obtuvieron están en ese rango [10].

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

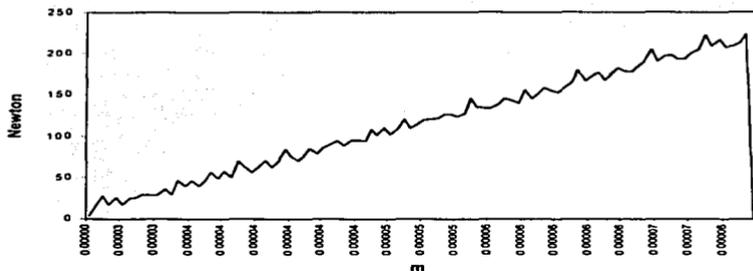


Figura 3.14 (a) Prueba de flexión en tres puntos para methyl methacrylate.

Se incluyo otro caso en el que la lucita tiene comportamiento plastico, se utilizaron probetas de sección rectangular de dimensiones (3.02 X 5.9 X 40.1 mm), para este caso no se tuvo un punto de ruptura por lo cual se calculo su módulo en flexión en la región lineal, con la ecuación (3.2) se obtuvo 2.66 Gpa en promedio.

La grafica carga vs deformación aparece en la figura 3.14 (b) con una velocidad de carga de 0.2905 N/seg. comparando los resultados con la literatura, el módulo de flexión va de 3.0 a 3.1 Gpa [10] para estos plásticos, asi que los valores obtenidos estan en ese rango.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

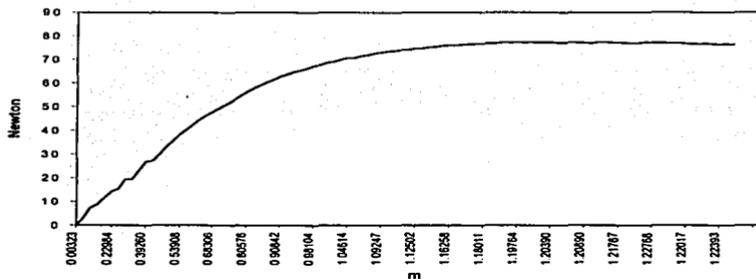


Figura 3.14 (b) Prueba de flexión en tres puntos muestra plástica de methyl methacrylate.

Cascaron de Avestruz

El huevo de avestruz es el más grande entre todas las aves, pero el más pequeño en proporción al peso del animal. Son de forma ovalada, cada huevo mide alrededor de 17 por 13 centímetros, con un cascarón parecido a la porcelana en su parte externa, la cual contiene cientos de poros.

Por el contrario, su parte interna presenta una superficie áspera con hendiduras en donde se ensanchan los poros (Figura 3.15 a y b respectivamente).



Figura 3.15 Probetas de cascaron a) cara exterior y b) cara interior.

Los huevos con un grosor de cáscara de 1.83 mm varían su tamaño, peso, estructura, porosidad y naturaleza debido a la genética, diversidad de subespecies, edad de la hembra entre otros factores [11]. Las propiedades mecánicas del cascaron en principio pueden dar información de aspectos genéticos y de la salud del ave.

Para las pruebas de flexión se utilizaron probetas de sección rectangular de dimensiones (1.96 X 5.62 X 37.54 mm) en unas de ellas se aplicó la carga central en la cara exterior y en otras en la cara interior.



Figura 3.15 Probetas de cascaron de avestruz a) cara exterior; b) cara interior

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.16 con una velocidad de carga para cara exterior de 0.0272 N/seg y para cara interior de 0.0114 N/seg.

Se utilizó la ecuación (3.1) para calcular la resistencia a la flexión, teniendo como resultados: para la cara exterior = 21.8 ± 3 MPa, interior = 16.7 ± 2 MPa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

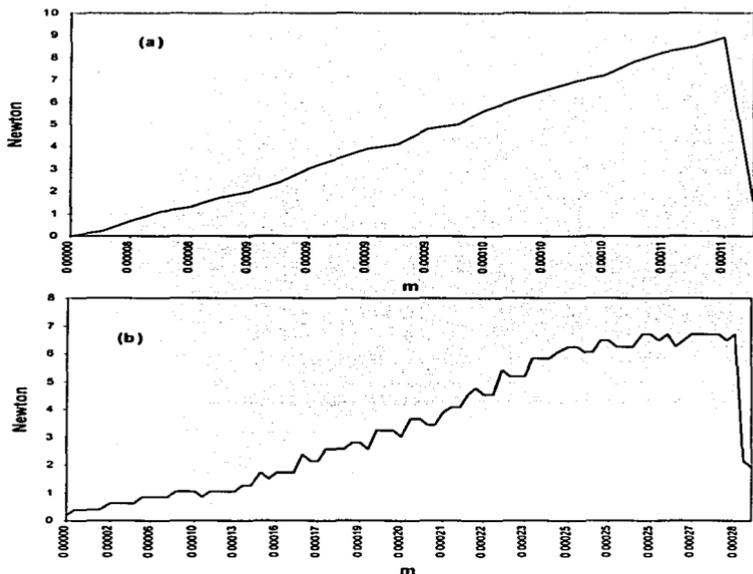


Figura 3.16 Prueba de flexión en tres puntos para cascarón de avestruz
 a) Fuerza central carga exterior b) Fuerza central carga interior.

En la cara interior se aprecian unas fluctuaciones debido a que el punto de ruptura de la máquina va creando pequeñas fracturas en el material debido a que este es muy poroso.

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

Pinus Sylvestris (Pino)

Se utilizo madera de pino (*pinus sylvestris*) para pruebas de flexión en tres puntos. Dado que la madera es un material formado por fibras orientadas en una misma dirección, es un material anisótropo, en el que ciertas propiedades físicas y mecánicas no son las mismas en todas las direcciones, varían en función de la dirección en la que se aplique el esfuerzo [12].

Se consideran tres direcciones principales con características propias:

- a) Dirección axial: Paralela a las fibras y por tanto al eje del árbol. En esta dirección es donde la madera presenta mejores propiedades mecánicas.
- b) Dirección radial: Perpendicular al axial, corta el eje del árbol en el plano transversal y es normal a los anillos de crecimiento aparecidos en la sección recta.
- c) Dirección tangencial: Localizada también en la sección transversal pero tangente a los anillos de crecimiento o también, normal a la dirección radial.

Las tres direcciones se muestran esquemáticamente en la figura 3.17 [13]

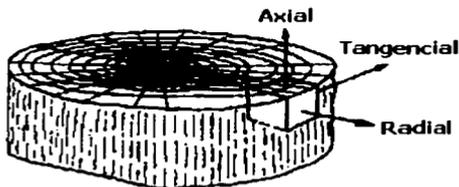


Figura 3.17 Estructura macroscópica de la madera

En este caso se utilizaron probetas orientadas en dirección: (a) axial de sección rectangular de dimensiones (2.68 X 5.2 X 37.14 mm),(b) radial de sección rectangular de dimensiones (3.14 X 5.0 X 34.88 mm),(c) tangencial de sección rectangular de dimensiones (2.34 X 6.4 X 34.78 mm) (Figura 3.18)



Figura 3.18 Probetas de Pino a) corte axial; b) corte radial; c) corte tangencial.

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.19 con una velocidad de carga para corte axial de 0.2895 N/seg; corte radial 0.0747 N/seg y corte tangencial 0.0339 N/seg.

Se obtuvieron en promedio los siguientes resultados de resistencia a la flexión, para el corte; axial (a) 237.7143 MPa, radial (b) 9.9483 MPa, tangencial (c) 8.0914 MPa, se noto una gran diferencia entre el corte axial y los cortes radial y tangencial, esto se debe a que en el corte axial las vetas de la madera van en la misma dirección del corte y eso hace que tenga mayor dureza, en la dirección tangencial las vetas están perpendicularmente al corte y eso hace que no tenga resistencia al corte, y en el corte radial las vetas están también perpendicularmente al corte, pero en sentido contrario y tampoco hay mucha resistencia.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Comparando los resultados con la literatura el pino en corte axial presenta un módulo de ruptura de 83 MPa [14]; la madera que se utilizó viene tratada para hacerla más resistente de ahí el resultado obtenido en dirección axial..

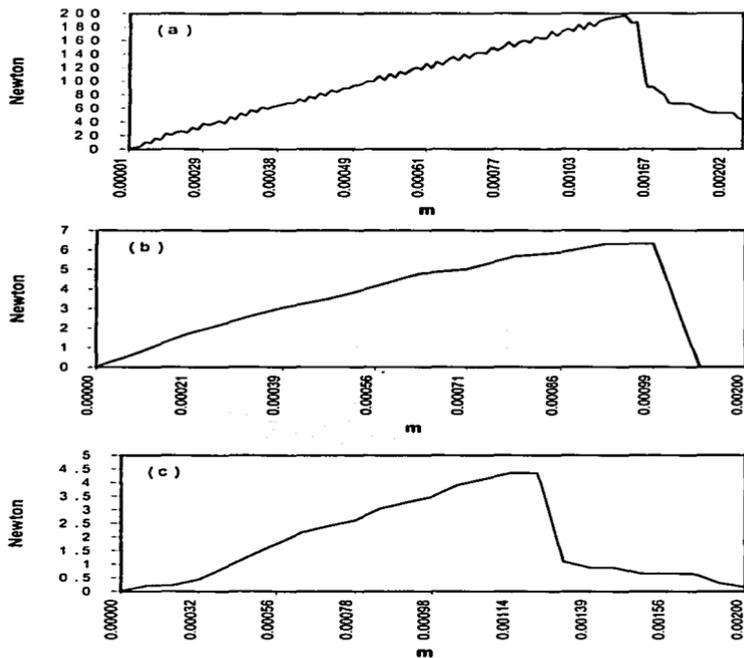


Figura 3.19 Prueba de flexión en tres puntos para diferentes cortes de madera.

Bambú

Bambú, es el nombre común de un conjunto de plantas leñosas, de porte arbustivo o arbóreo, agrupadas en unos 45 géneros y 480 especies de la familia de las Gramíneas.

Es el material natural renovable con más rápido crecimiento sobre la tierra; ya que solo tarda tres años en alcanzar las condiciones necesarias para su utilización en la construcción; mientras que el pino, especie forestal de más rápido crecimiento, tarda 15 años para ser utilizado [15].

Es liviano y muy resistente a la flexión y tracción, lo cual favorece su utilización para la construcción de estructuras sismoresistentes.

Para este caso se utilizaron probetas para su ruptura en cara exterior (a) e interior (b) de sección rectangular de dimensiones (2.2 X 5.3 X 35.1 mm) (Figura 3.20).

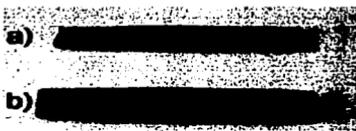


Figura 3.20 Probetas de bambú a) cara exterior; b) cara interior.

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.21 con una velocidad de carga para cara exterior de 0.3122 N/seg y cara interior 0.3040 N/seg.

La resistencia a la flexión, para la cara exterior fue 168.45 MPa y para la cara interior 234.53 MPa, se nota una clara diferencia en los resultados debido a que el

bambú en su cara interior es menos flexible que en su cara exterior; en la figura 3.21 pareciera que la probeta no tuvo punto de ruptura, pero si tuvo lo que pasa es que el bambú tiene un tipo de "piel" en la parte de afuera (exterior) y eso es lo que hizo que no se rompiera en su totalidad.

Los resultados de la literatura mencionan que el bambú tiene un módulo de ruptura de 90 MPa [16] cara interior, este valor es muy inferior al obtenido, sin embargo, los valores dependen del tipo de bambú y de la zona donde se obtuvieron las probetas y el tratamiento o grado de humedad del material.

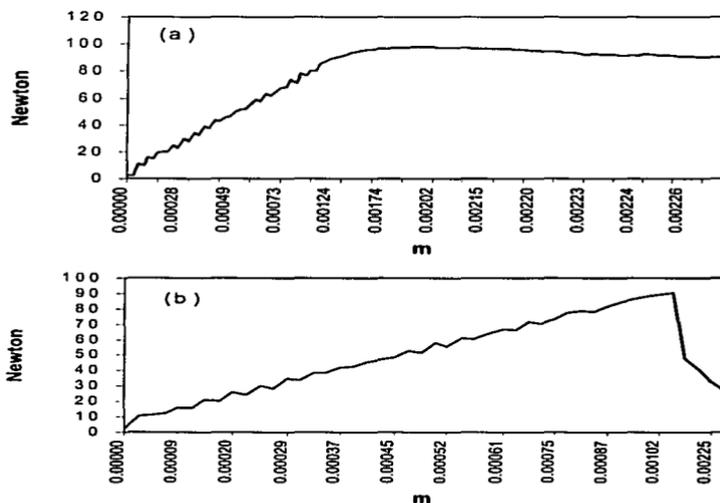


Figura 3.21 Prueba de flexión en tres puntos para bambú a) cara exterior b) cara interior.

Fémur humano

Los huesos responden a las fuerzas aplicadas sobre su superficie siguiendo un patrón característico. La primera fase es elástica y depende de la rigidez del hueso. En esta fase, la deformación es temporal y se mantiene solo durante el tiempo de aplicación de la fuerza tras lo cual, el hueso recupera su forma original. Si la fuerza aumenta, se entra en una fase plástica y el hueso, aunque se recupera parcialmente, queda deformado. Por último cuando la fuerza aplicada es superior a la resistencia del tejido se produce la fractura. La respuesta de tejido óseo frente a las fuerzas que se aplican sobre su superficie dependerá del tipo de fuerza, del tipo de hueso, así como de la densidad, arquitectura y composición del tejido óseo. Las fuerzas que pueden actuar sobre el tejido óseo son de tres tipos tensión, compresión y torsión. Además pueden ser aplicadas de forma perpendicular a la superficie ósea (fuerza normal) o de forma oblicua (fuerza de cizallamiento).

Los huesos largos, formados fundamentalmente por tejido óseo compacto o cortical, son elásticos y poco plásticos. En estos huesos, la resistencia será mayor cuando la fuerza se aplica de forma vertical al sentido de la carga. Cuando la fuerza se aplica de forma oblicua la fase plástica se acorta y el hueso se fractura con mas rapidez. En los huesos integrados por tejido óseo esponjoso, la resistencia es mayor cuando la fuerza se aplica a lo largo del eje vertical de las trabéculas vertebrales y también cuando es paralela a los sistemas trabeculares del cuello femoral. Estos huesos, al ser menos densos que los formados por tejido óseo cortical, son menos elásticos y más plásticos, por lo que pueden presentar deformaciones mayores. Así mientras que en los huesos integrados por tejido esponjoso, las fracturas se producen cuando existen variaciones del 7% de su longitud, en los integrados por tejido compacto, las fracturas se producen con variaciones del 2% [17].

Si se corta por la mitad un hueso, puede verse que el tejido óseo se presenta en dos tipos diferentes: sólido o compacto y esponjoso o trabecular.

El tejido esponjoso y el compacto no se diferencian en su constitución: químicamente son iguales; sólo se diferencian en su densidad volumétrica, es decir, una masa dada de tejido óseo esponjoso ocupa un mayor volumen que la misma masa formando tejido óseo compacto.

El tejido compacto se encuentra principalmente en la parte superficial de los huesos así como en la caña central de los huesos largos, mientras que el esponjoso se encuentra en los extremos de los huesos largos.

Se utilizaron probetas de sección rectangular de dimensiones (4.18 X 6.4 X 42.66 mm) (Figura 3.22)



Figura 3.22 Fémur

La gráfica carga vs deformación aparece en la figura 3.23 con una velocidad de carga de 0.1964 N/seg.

Se utilizó la ecuación (3.1) para calcular la resistencia a la flexión, teniendo como resultado: 87.6148 MPa.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Comparando los resultados obtenidos con los de la literatura los huesos son menos fuertes bajo tensión que bajo compresión: una fuerza de tensión de 120 MPa puede causar la rotura de un hueso, así como puede causarla una fuerza de torsión, y estas roturas son diferentes.

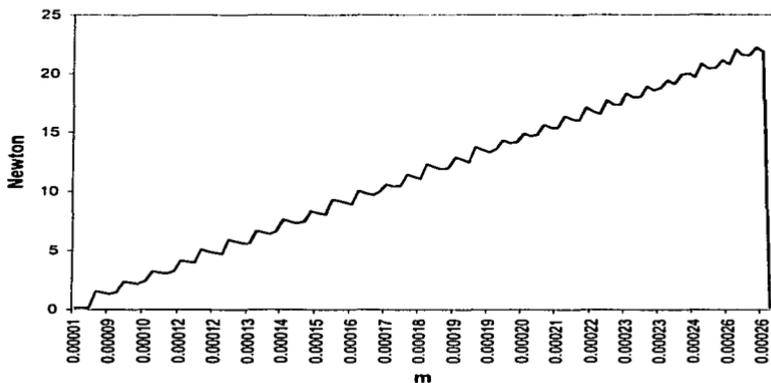


Figura 3.23 Prueba de flexión en tres puntos para fémur.

3.7 REFERENCIAS

- [1] Donald R. Askeland. CIENCIA E INGENIERIA DE LOS MATERIALES. Paraninfo.
- [2] ASTM. Standard Test Methods for Flexural Properties of Ceramic Whiteware Materials. Designation: C 674-88 (reapproved 1999).
- [3] ASTM. Standard Test Methods for Determination of Modulus of elasticity for Rigid and Semi-Rigid Plastic Specimens by Controlled of Loading Using Three-Point Bending. Designation: D 5934-96
- [4] ASTM. Standard Test Method for Strength of Glass by Flexure (Determination of Modulus of Rupture) Designation: C 158-95.
- [5] Donald Peckner and Bernstein. HANDBOOK OF STAINLESS STEELS. McGraw Hill.
- [6] A. Betejtin. CURSO DE MINERALOGIA. Editorial Mir.
- [7] W. D. Kingery, H. K. Bowen and D. R. Uhlmann, Introduction to Ceramics.
- [8] Alberto Lenz del Rio. QUIMICA ORGANICA ELEMENTAL. Editorial Patria.
- [9] Alumina-An Overview Ceram Research. Metals, Ceramics, Polymers, an Engineers Resource Pty. Ltd. AzoM.com
- [10] Roger D. Corneliussen, Modern Plastics Enciclopedia 99
- [11] Propiedades físicas del huevo, Agrícola y comercial Quetalmahue Ltda.
- [12] www.geocities.com/cokevilchez/madera.htm
Propiedades físicas de la madera.
- [13] Peter Greil, Thomas Lifka and Annette Kaindl, BIOMORPHIC CELLULAR SILICON CARBIDE CERAMICS FROM WOOD: II. MECHANICAL PROPERTIES. 1998 Elsevier Science Limited.
- [14] K. R. Bootle, Wood in Australia, types, properties and uses McGraw-Hill.
- [15] www.bambu.cl/propiedades_mecanicas.htm
Red chilena del bambú, Corporación de Investigación Tecnológica Intec.
- [16] www.inbar.int/publication/bxt/tr17/thyrsostachys/th%20ol.htm
Article Thyrsostachys oliver

[17] Sergio Serrano. ESTRUCTURA Y FUNCION DEL HUESO NORMAL. II
CONGRESO VIRTUAL HISPANOAMERICANO DE ANATOMIA PATOLOGICA. 1998.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- En este trabajo se presento la instrumentación, control y aplicaciones de una maquina termoneumática o termohidráulica, la cual permite hacer pruebas mecánicas en materiales frágiles con un amplio rango de aplicaciones según se requiera.
- A partir de una máquina de expansión térmica que trabajaba haciendo pasar una corriente eléctrica a través de una barra de acero, con lo que logra la expansión de la misma, primero se estableció la máxima expansión que se obtiene en la barra. Sabiendo esto, se penso en hacerle una serie de mejoras, ¿se le adicionaría un sistema de protección?, sensores de control y un sistema de enfriamiento; para verificar la parte de diseño hubo necesidad de hacer una serie de ensayos con la máquina libre, es decir sin ningún tipo de probeta, se hicieron tanto para el caso de enfriamiento a base de aire como de agua estos experimentos sirvieron para tener el standard que mas adelante se utilizo para las pruebas con distintos materiales, con esta instrumentación se logro la automatización de la máquina.
- El control que se desarrollo consta de una fácil programación ya que se puede usar tanto para pruebas de fatiga como pruebas de ruptura o de envejecimiento con un mínimo error de ± 0.05 V. Los sensores de deformación (LVDT) como de fuerza (LC) fueron calibrados a su máxima exactitud obteniendo una linealidad en su respuesta y para la protección de todos el sistema de control se le instalo un sistema a base de triacs. Con el sistema de control, el de adquisición de datos y a base de muchas pruebas se logro tener

una máquina totalmente calibrada para realizar las pruebas en los distintos materiales.

- Una vez con la maquina automatizada se comenzaron a realizar las primeras pruebas, estas dieron los rangos de aplicación para utilizarlas en los materiales cerámicos y plásticos utilizados en esta tesis, cabe mencionar que las probetas utilizadas para las pruebas tienen un tamaño inferior a los utilizados en la norma de la ASTM, debido a esto el sistema de tres puntos de la máquina termoneumática es mas versátil, los resultados obtenidos se verificaron con los citados en la literatura y respetando las normas de la ASTM, estos valores fueron similares.
- La automatización también permitió que otros estudiantes usaran la máquina para hacer sus propias pruebas de una forma sencilla.

RECOMENDACIONES

Para tener un mejor funcionamiento de la máquina se propone lo siguiente:

- Conseguir que la tarjeta análoga/digital trabaje con una respuesta mas rápida en la conversión de la señal ya que como se configuro tiene una respuesta de 8 seg. debido al procesador usado (386) y no se pudo reducir este tiempo de respuesta, quizá con un procesador mas rápido esto se logre, con esto se podrán obtener una mayor cantidad de datos logrando resultados aun mas precisos.
- Tener la posibilidad de tener celdas carga de mayor o menor capacidad para hacer pruebas en materiales de mayor rigidez (ya que la rigidez de la máquina

es la barra de acero que se uso) o materiales extremadamente frágiles, así se tendría un mayor rango de aplicaciones.

- En el caso del controlador (CN-2010) conseguir uno con una menor ventana entre las salidas, con esto se lograría tener menos fluctuaciones en las muestras, ya que en este caso se presentaron fluctuaciones de ± 0.04 V.
- Cambiar la barra de expansión por una de acero inoxidable para que soporte la corrosión del agua o del refrigerante que se vaya a usar.
- Tratar de ubicar la máquina en un lugar donde no haya corrientes de aire, tener una temperatura ambiente constante con un aislamiento térmico y libre de vibraciones ya que durante las pruebas se observó que al haber corrientes de aire la temperatura de la barra cambiaba y debido a esto los datos fluctuaban drásticamente, como el transformador se encuentra instalado en la estructura de la barra se tienen vibraciones debido a la potencia, sería conveniente que el transformador tuviera su base propia para no perturbar el sensor de desplazamiento.
- Cuando se vaya a iniciar una serie de pruebas y se hayan hechos ya varios experimentos se tendrá que recalibrar la celda de carga usando el transductor DP80, el LVDT con el tornillo micrométrico todo esto para seguir manteniendo una excelente obtención de datos.

ANEXO

3ER. CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERIA ELECTROMECANICA Y DE SISTEMAS

INSTRUMENTACION DE UNA MAQUINA DE EXPANSION TERMICA

I. Suarez Estrella, H. Trejo Camacho, L. Bucio Galindo, A. Heredia Barbero, E. Orozco Mendoza.
Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.
México, D. F., A. P. 20-364 01000.
e-mail: iyans@fisica.unam.mx hrejie@hotmmail.com

Resumen.

En este artículo se describe la instrumentación y el control de una máquina de expansión térmica. El diseño original de este tipo de máquina fue propuesto por A. Mendoza, A. Morales y E. Orozco.

La nueva versión descrita en este reporte se construyó para hacer pruebas mecánicas en materiales frágiles, su control y operación esta basado en el calentamiento y enfriamiento de una barra hueca de acero. El calentamiento se hace aplicando directamente una corriente eléctrica en la barra, el enfriamiento se hace haciendo pasar aire o agua por su interior, de esta forma se tiene una máquina termoneumática ó termohidráulica para hacer pruebas mecánicas.

Palabras clave: Expansión térmica, instrumentación, control, pruebas mecánicas.

1.- MÁQUINA DE EXPANSIÓN TÉRMICA.

El prototipo desarrollado por a: A. Mendoza, A. Morales y E. Orozco, se conoce como máquina de expansión térmica [1] ya que para su funcionamiento se aprovecha la expansión térmica de una barra metálica para transmitir deformación ó fuerza en las muestras a estudiar. es decir, en esta máquina se emplea un pistón térmico.

La máxima longitud que se puede alcanzar en la barra depende de la temperatura aplicada ó de la potencia empleada durante el calentamiento. Una desventaja de la máquina de expansión térmica es que para trabajar a diferentes velocidades de deformación es necesario someter a la barra a diferentes regímenes de calentamiento, es decir aplicar distintos niveles de potencia, esto limita el tipo de pruebas mecánicas que se pueden hacer en

relación al porcentaje de deformación o carga aplicada a la muestra.

Una posibilidad para extender el rango de aplicaciones, es acondicionar un sistema de control del proceso de expansión ó contracción de la barra transmisora de deformación o fuerza, de tal modo que aplicando máxima potencia, se pueden conseguir diferentes velocidades de calentamiento (expansión) ó enfriamiento (contracción) de la barra.

En el prototipo original [1] el calentamiento se consigue aplicando directamente una corriente eléctrica sobre la barra, en este trabajo presentamos un diseño en el que la barra se calienta de la misma forma, adicionalmente, la barra se enfría con aire o con agua, con esto, la máquina de expansión térmica se convierte en una máquina termoneumática ó termohidráulica.

Construimos una máquina con esas dos posibilidades de enfriamiento y le adaptamos un sistema de control en base a dos sensores, uno de deformación LVDT (Linear Variable Differential Transformers) transformador diferencial variable lineal, y otro de fuerza LC (Load Cells) celda de carga. Los sensores que usamos fueron: Un LVDT modelo 100 DC-D marca SCHAEVITZ, cuyas características son las siguientes:

sensibilidad	0.3889 V/m
rango	± 0.254 m.
voltaje de entrada	± 15 Vcd.

Una celda de carga del tipo LCH-100 marca OMEGA, cuyas características son:

sensibilidad	4.5 Kg/V.
rango	± 45 Kg.
voltaje de entrada	10 Vcd.

Funcionamiento de la máquina de expansión térmica.

La máquina de expansión térmica en su versión más simple esta conformada por un tubo de acero de paredes delgadas de dos pulgadas de diámetro y un metro de longitud, montado en un soporte de acero con un extremo embebido en hormigón dentro de una caja de acero para conseguir el aislamiento eléctrico entre el tubo central y el soporte mecánico, con esta configuración sólo se pueden hacer pruebas en compresión (Figura 1).

El tubo central esta conectado a un transformador de baja resistencia de salida, bajo voltaje de salida y hasta 1000 amperes de corriente de salida y también a un autotransformador variable "Variac" con el que se controla la corriente inyectada al tubo, y en consecuencia su calentamiento.

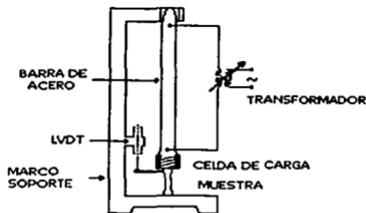


Figura 1. Diagrama de la máquina de expansión térmica. En el se pueden apreciar las posiciones de la celda de carga, del LVDT y de la muestra que se comprime.

De la potencia que se suministra eléctricamente a la máquina, la mayor parte se consume en el calentamiento de la barra, algo de esa potencia se pierde escapando al exterior a través del aislamiento térmico y finalmente una fracción muy pequeña se va en hacer el trabajo para deformar a la probeta; así que:

$$P = C \frac{\partial \theta}{\partial t} + K(\theta) + f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad \text{Ec. (1)}$$

en donde P es la potencia suministrada eléctricamente a la barra.

$C \frac{\partial \theta}{\partial t}$ es la potencia aprovechada en calentar la barra y dilatarla.

$K(\theta)$ es la potencia que escapa a través del aislamiento, es una función del incremento de la temperatura.

$f(\epsilon) \frac{\partial \epsilon}{\partial t}$ es la potencia empleada en deformar la probeta.

θ es la diferencia de temperaturas entre la barra y el exterior.

C es la capacidad calorífica de la barra.

2.- ESQUEMA DEL NUEVO DISEÑO.

Esquemáticamente, la nueva máquina aparece en las figuras 2 y 3.

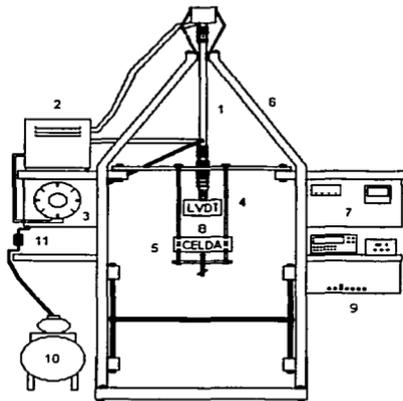


Figura 2. Esquema de la máquina con sistemas de control.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

La máquina consta de:

1. Barra hueca.
2. Transformador.
3. Autotransformador variable (Variac).
4. LVDT.
5. Celda de carga (LC).
6. Estructura de la máquina.
7. Controladores.
8. Porta muestra
9. Sistema de encendido.
10. Sistema de enfriamiento compresor de aire ó agua.
11. Válvula de solenoide

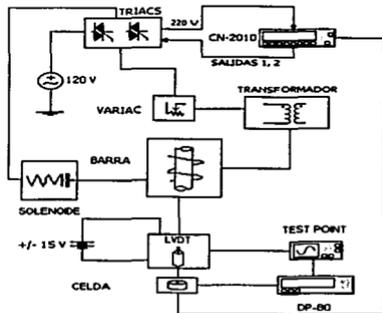


Figura 3. Esquema de conexiones.

Descripción del sistema de control.

Para el control de la máquina de expansión térmica se utilizó el siguiente sistema:

Un controlador programable de la serie OMEGA CN-2010; las entradas de este controlador pueden ser sensores de temperatura RTD, termopares o cualquier fuente de voltaje DC asociada a cualquier variable de proceso (en nuestro caso la señal del LVDT o de la celda de carga). Los tipos de la salida son reles de estado sólido o salidas análogas, con ON / OFF para el control de potencia.

El CN-2010 ofrece las funciones de rampa y meseta, cada intervalo puede tener una duración de tiempo

de hasta 100 horas y hasta 254 ciclos de repetición posibles.

El controlador tiene dos tipos de salidas, la salida 1 nos da la señal necesaria para alimentar al sistema de calentamiento de la máquina, con lo cual obtenemos la expansión de la barra; la salida 2 es la que controla el sistema de enfriamiento abriendo o cerrando una válvula de solenoide para dejar pasar agua o aire, una se apaga cuando la otra se enciende.

La señal del LVDT y/o de la celda se envía a una tarjeta analógica digital para su registro. Los datos se procesan posteriormente con paquetes tipo Microsoft Excel o Microcal Origin.

3.- CURVAS DE CALENTAMIENTO LIBRE.

Como primer paso para caracterizar la máquina, realizamos pruebas de calentamiento libre a diferentes voltajes.

En este artículo sólo presentamos los resultados que se obtuvieron usando el LVDT como sensor.

Aplicando 45, 85 y 125 V con el variac, se consiguieron dilataciones máximas de 0.55×10^{-3} m, 2.17×10^{-3} m y 3.84×10^{-3} m respectivamente. Las velocidades máximas obtenidas fueron de 0.64×10^{-6} m/seg 3.47×10^{-6} m/seg y 9.84×10^{-6} m/seg (Figura 4).

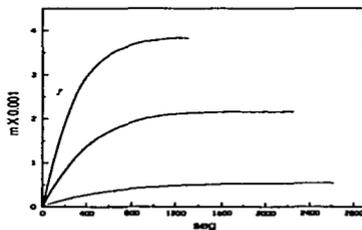


Figura 4. Calentamiento libre detectado con LVDT.

Se puede ver que trabajando con la máxima potencia se puede conseguir como máxima expansión 3.84×10^{-3} m con velocidades variables durante el proceso de calentamiento.

En calentamiento libre, la máquina se puede emplear para caracterizar el comportamiento mecánico de materiales que se deforman poco antes de romperse. Sin embargo, hacer experimentos de deformación a velocidad constante, en rangos mayores de deformación da la posibilidad de estudiar propiedades de materiales con mayor plasticidad, por ejemplo, materiales compuestos de cerámica y polímeros. Trabajando a potencias elevadas, con un sistema de control, se pueden tener rangos razonables de expansión dentro de un régimen de deformación lineal.

4. CALENTAMIENTO CON CONTROL.

Hicimos pruebas con el sistema de control basado en el calentamiento y enfriamiento de la barra.

Como ya mencionamos, la máquina que construimos permite controlar con el sensor de desplazamiento (LVDT) ó el de carga (LC). Como ejemplo de este trabajo presentamos los resultados obtenidos con el LVDT aplicando potencias del 70% (aproximadamente 85 V en el variac).

Enfriamos el sistema inyectando agua o aire y fijamos expansiones máximas del orden de 10^{-3} m con velocidades de dilatación inferiores a la máxima que se puede obtener aplicando 85 V para así garantizar expansión lineal.

Con el controlador OMEGA CN-2010 programamos una rampa de calentamiento seguida de una meseta y después de una rampa de enfriamiento, cada una de ellas de aproximadamente media hora de duración.

En general, se obtiene un buen control en el proceso de expansión y contracción de la barra para ambos esquemas de enfriamiento (aire y agua), la diferencia se tiene en el tamaño de las oscilaciones provocadas por el proceso de encendido y apagado de la máquina, por ejemplo, al enfriar con aire la amplitud de las oscilaciones es del orden de 4×10^{-3} m mientras que con agua la amplitud está entre 10^{-5} y 2×10^{-5} m, (Figura 5). A pesar de esto consideramos que el control que se obtiene es aceptable.

Incluimos un caso en el que se programaron varias rampas y mesetas, simulando por ejemplo una prueba de fatiga de bajo cicloaje, en este caso el enfriamiento se hizo con aire, al final para comparar la última sección se obtuvo con enfriamiento libre sin control (Figura 6).

Una vez más tenemos resultados razonables que muestran la versatilidad del sistema de control que estamos usando.

Actualmente exploramos otro tipo de aplicaciones del dispositivo, con el se pueden hacer en principio pruebas de Creep, de dureza convencional ó de dureza instrumentada. También investigamos la posibilidad de controlar a la máquina con programas de deformación tipo senooidal ó siguiendo funciones mas complejas.

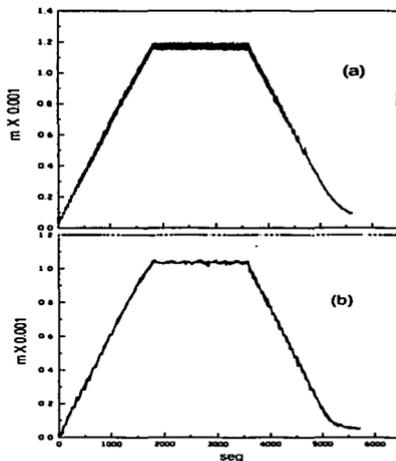


Figura 5. Calentamiento con control enfriado por aire (a) y por agua (b).

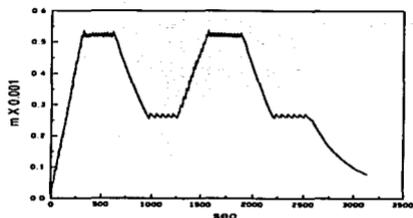


Figura 6. Programación de varias rampas y mesetas.

5.-APLICACIONES.

Pruebas en fémur humano antiguo (2000 años) muestra Xochimilco basurero.

Como ejemplo, presentamos algunos resultados de pruebas de deformación en muestras paleoantropológicas de fémur humano. Los estudios en estas muestras forman parte de un proyecto de investigación en Arqueometría que se desarrolla en la Universidad Nacional Autónoma de México

Los experimentos se hicieron en la máquina de expansión térmica con un aditamento especial para pruebas de flexión en tres puntos, usando probetas de sección rectangular de dimensiones (2 X 4 X 50 mm) (Figura 7).

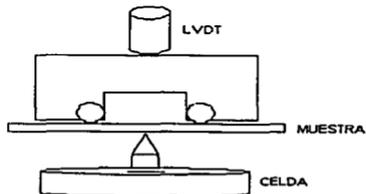


Figura 7. Muestra el esquema de flexión de tres puntos.

En la figura 8 se presentan dos ejemplos del tipo de curvas carga vs deformación.

Las oscilaciones que se observan en ambas curvas tienen que ver con pequeñas grietas que se generan durante el proceso de deformación.

Se aprecia algo de comportamiento plástico del hueso antes de la ruptura. Esto está relacionado con el material orgánico remanente. En la curva (1) se aprecia algo de comportamiento plástico del hueso antes de la ruptura, esto está relacionado con el hecho de que en esa muestra existe cierta cantidad de materia orgánica.

La muestra (2) por el contrario, presenta ruptura esencialmente frágil, en este caso la fracción de materia orgánica es menor que en el caso (1).

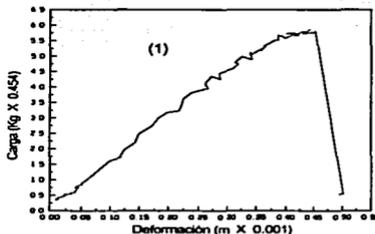
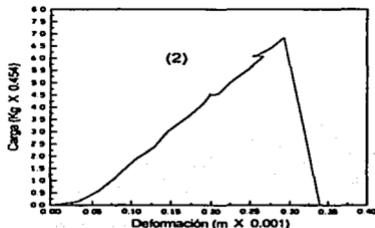


Figura 8. Curvas carga vs deformación para muestras paleoantropológicas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Se hará un análisis mas detallado de estos resultados en una próxima publicación.

6.- CONCLUSIONES.

En este artículo hemos presentado el esquema de control de una máquina de expansión térmica para pruebas mecánicas en materiales frágiles.

Con un sistema simple, el control se puede realizar razonablemente bien a través de sensores de carga ó de desplazamiento, calentando o enfriando en forma alternada la barra que aplica fuerza ó deformación sobre muestras cuyas propiedades mecánicas se desea investigar.

7.- REFERENCIAS.

[1] A. Mendoza, E. Orozco y A. Morales, "Thermal Expansion Machine for Compression Tests" Journal of Physics. E: Sci. Instrum., Vol. 18, (1985) 474 - 475.