



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA
PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :
JORGE LOSORNIO REYES

ASESOR DE TESIS: ING. SERGIO DE MORAES BENITEZ



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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.

I N D I C E

PAGINA

INTRODUCCION

1

I. TEORIA DE LA TERMOFLUENCIA.

1. LA TERMOFLUENCIA.

3

1.- CURVAS DE TERMOFLUENCIA.

15

2.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE GRANO.

17

3.- TIPOS DE FRACTURAS.

18

4.- MICROESTRUCTURA.

21

2. PRUEBAS.

1.- PRUEBA DE TERMOFLUENCIA.

23

2.- PRUEBA DE ESFUERZO-RUPTURA.

25

3.- PRUEBA DE ESFUERZO-RELAJACION.

25

3. PROBETAS PARA PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA Y

ESFUERZO-RUPTURA.

26

II. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA MAQUINA PARA PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA.

1. DISEÑO Y CONSTRUCCION.

1.- PRINCIPIOS BASICOS DEL DISEÑO.

33

2.- ESTRUCTURA DE LA MAQUINA.

36

3.-	DISPOSITIVO DE CARGA.	53
4.-	HORNO DE CALENTAMIENTO,	77
5.-	DISPOSITIVO INDICADOR DE LA ELONGACION.	84
6.-	GRAFICADOR PARA EL REGISTRO DE LA ELONGACION CON RESPECTO DEL TIEMPO.	86

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

1.	PREPARACION DE LAS PROBETAS.	
1.-	LONGITUD DE LAS PROBETAS.	92
2.-	SECCION DE SUJECION.	93
3.-	SECCION REDUCIDA DE LA PROBETA.	94
2.	CONDICION GENERAL DE CARGA DE LA MAQUINA.	95
3.	PRUEBAS.	96
1.-	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO.	97
2.-	PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA-RUPTURA.	105

IV.	CONCLUSIONES.	118
-----	---------------	-----

V.	BIBLIOGRAFIA.	120
----	---------------	-----

APENDICE.

- | | | |
|-----------|--|------------|
| A. | DIBUJO EN EXPLOSIVO DE LA MAQUINA PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA. | 123 |
| B. | FOTOGRAFIAS DE LA MAQUINA PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA. | 128 |
| C. | DIFERENTES TIPOS DE MAQUINAS PARA PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA. | 137 |

PROLOGO

En la actualidad, con el empleo de altas presiones y elevadas temperaturas a las cuales trabajan los equipos en la Industria, han hecho de la Termofluencia un campo muy importante para la investigación.

Para el desarrollo de las investigaciones sobre el comportamiento de los metales, bajo condiciones de Termofluencia, es necesario contar con equipos de pruebas.

Hoy en día, los países con dependencia tecnológica han tenido que adaptar los resultados obtenidos en investigaciones sobre la Termofluencia a sus problemas, debido al costo de los equipos, no pudiendo desarrollar su propia tecnología en base a sus necesidades; esto es, desarrollar sus propios equipos de pruebas para lograr investigaciones propias a los mismos.

Basados en lo anterior y partiendo de la idea y deseo del DR. FRANCISCO ESPARZA HERRADA, así como del ING. SERGIO DE HORAES BENITEZ, de contar con un equipo para pruebas de Termofluencia en el CENTRO DE ASIMILACION TECNOLOGICA (C.A.T.-FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN), se desarrolló dicho equipo.

La Máquina para Pruebas de Termofluencia, fue diseñada y construida con recursos propios y del C.A.T.

Con esta máquina se ha logrado aumentar la capacidad del C.A.T., en cuanto a equipos de pruebas destructivas se refiere.

INTRODUCCION

Las propiedades mecánicas y físicas de la mayoría de las aleaciones comunes, han sido conocidas por muchos años. Los esfuerzos en años recientes, han sido empleados principalmente, en mejorar nuestros conocimientos de por qué los metales responden de la manera que lo hacen, así como estudiar las propiedades de las aleaciones.

Hoy en día la tendencia de usar altas temperaturas y mayores presiones en las plantas de vapor, de energía nuclear, así como de las industrias químicas, petroquímicas, aeronáuticas, metalúrgicas y otras, han hecho de la resistencia y comportamiento de los metales a altas temperaturas, un problema de gran importancia, debido a que los equipos deben operar de una forma segura durante largos períodos de tiempo a elevadas temperaturas.

Una vez que las aleaciones para altas temperaturas fueron desarrolladas, se tuvo la necesidad de investigar y conocer el proceso de deformación que sufren con el tiempo bajo cargas constantes, usualmente a altas temperaturas. Esto esencialmente es lo que se conoce como TERMOFLUENCIA.

Estas investigaciones han aumentado en sus propios problemas específicos con el desarrollo de aleaciones, pero los métodos de análisis de deformación que se utilizan para predecir el esfuerzo de Termofluencia y el tiempo de ruptura se generalizan.

Además, las investigaciones sobre el comportamiento de los metales, bajo condiciones de termofluencia, ha propiciado el desarrollo de equipos en los que se puedan realizar pruebas que satisfagan dichas investigaciones; por lo que, los Centros de Investigación se ven en la necesidad de contar con ellos, complementando con ello su infraestructura para la realización de pruebas destructivas.

El presente trabajo tiene como finalidad complementar la infraestructura, en cuanto a pruebas destructivas se refiere, y aumentar las investigaciones sobre el comportamiento de las aleaciones bajo condiciones de termofluencia.

Asimismo, se presenta en el Primer Capítulo, conceptos generales en cuanto a la teoría de la termofluencia y al análisis de los requerimientos para los equipos de pruebas de termofluencia, siendo esto la base del diseño de la máquina.

El diseño de la máquina fue íntimamente conjuntado con la construcción de la misma, en base a la teoría de la termofluencia, llegando a comprobar su validez en base al desarrollo experimental de las pruebas.

De este modo se pretende colaborar en el desarrollo de la investigación de la Termofluencia.

I. TEORIA DE LA TERMOFLUENCIA

1. LA TERMOFLUENCIA.

La fluencia es una deformación lenta de un material bajo un esfuerzo que da como resultado un cambio permanente en la forma. Generalmente, la fluencia se presenta en velocidades de deformaciones menores de 1.0%/min., las velocidades más rápidas usualmente están asociadas con trabajo mecánico (procesos tales como : forjado y laminación). Los cambios de forma originados por la fluencia, generalmente son indeseables y pueden ser un factor limitante en la vida de una pieza; por ejemplo, las hélices de rotores en motores de turbinas, las cuales crecen lentamente en su longitud durante la operación y deben ser reemplazadas antes de tocar el bastidor.

Aunque la fluencia puede ocurrir a cualquier temperatura, sólo a temperaturas que excedan la temperatura más baja de recristalización del material o aleación, se presentan los alcances con efectos visibles, y conociéndose como termofluencia.

La temperatura más baja de recristalización no se ha fijado, pero depende tanto de la cantidad de deformación, como del tiempo en que el metal es mantenido a esa temperatura; sin embargo, hay una temperatura bajo la cual no se presentará la recristalización sin tomar en cuenta la cantidad de deformación, esto se ilustra en la Figura 1.

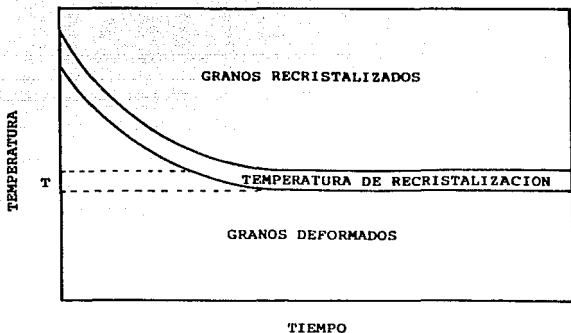


FIGURA 1. Efectos del Tiempo a Temperatura de Recristalización.

T = Temperatura más baja de recristalización.

Se cree que la temperatura más baja de recristalización es constante para un metal o aleación. Ya que la temperatura de recristalización es también una función de la cantidad de deformación en un metal, el tiempo necesario para que se presente la recristalización no es constante. Sin embargo, el trabajo en esta área parece indicar que la temperatura más baja a la que se puede presentar la recristalización es una constante para una aleación dada. Esto es aproximadamente el 0.40 de la temperatura de fusión absoluta del material o aleación.

Por lo tanto, "La Termofluencia es una deformación lenta en función del tiempo, de un material o aleación sujeto a un esfuerzo constante y a temperaturas que exceden la temperatura más baja de recristalización".

$$T \geq 0.40 T_M$$

Donde :

T = Es la temperatura.

T_M = Es la temperatura del punto de fusión absoluto del material o aleación.

A menores temperaturas ($T < 0.40 T_M$), la fluencia se caracteriza generalmente, por una velocidad de deformación o velocidad de fluencia decreciente, mientras que a temperaturas elevadas ($T \geq 0.40 T_M$), la termofluencia avanza a través de 3 distintas etapas y finalmente resulta en falla.

Una representación esquemática de la fluencia y la termofluencia se muestra en la Figura 2.

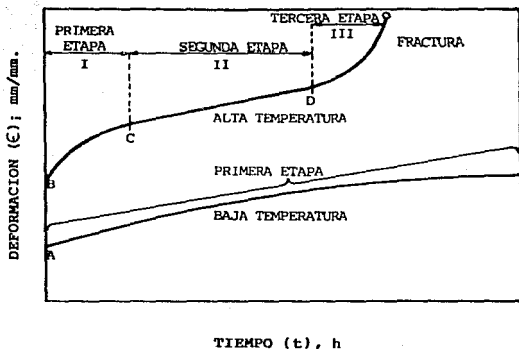


FIGURA 2. Fluencia y Termofluencia de un material bajo carga constante.

A y B denotan la deformación elástica bajo carga; C denota la transición desde la etapa primaria de la termofluencia (primer etapa) hasta el estado estacionario de termofluencia (segunda etapa); D denota la transición desde el estado-estacionario hasta la tercera etapa de termofluencia (tercera etapa).

En tiempo = 0, se aplica la carga, la cual produce una deformación elástica (ϵ_0) inmediata, que es la más grande para pruebas a altas temperaturas con respecto al tiempo, debido a los módulos de elasticidad más bajos (E) :

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (\text{Pa})$$

$$\epsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0} \quad \left(\frac{\text{mm.}}{\text{mm.}} \right)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (\text{Pa})$$

Donde :

$$\sigma = \text{Esfuerzo} \quad (\text{Pa})$$

$$P = \text{Carga} \quad (\text{N})$$

$$A_0 = \text{Area Original de la Sección Transversal} \quad (\text{m}^2)$$

$$\epsilon = \text{Deformación (unitaria)} \quad \left(\frac{\text{mm.}}{\text{mm.}} \right)$$

$$l_f = \text{Longitud Final} \quad (\text{mm.})$$

$$l_0 = \text{Longitud Inicial} \quad (\text{mm.})$$

$$E = \text{Módulo de Elasticidad} \quad (\text{Pa})$$

Una vez cargado el material se deforma a una velocidad muy rápida, pero conforme avanza el tiempo, la velocidad de la deformación decrece progresivamente. Para bajas temperaturas este comportamiento puede continuar indefinidamente.

En altas temperaturas el régimen de la velocidad de deformación decrece constantemente (primera etapa de la termofluencia primaria), continuando con las condiciones, la velocidad de deformación llega a ser independiente del tiempo y de la deformación. Cuando esto ocurre, la termofluencia está en su segunda etapa o régimen de estado-estacionario.

Aunque una deformación considerable puede ocurrir bajo estas condiciones de estado-estacionario, eventualmente la velocidad de deformación empieza a acelerarse con el tiempo, y el material entra en la tercera etapa de la termofluencia. Entonces la deformación se produce a una velocidad muy alta, hasta que el material no puede soportar más el esfuerzo aplicado y se presenta la fractura.

Así la velocidad de deformación está determinada por :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad \left(\frac{\text{mm.}/\text{mm.}}{(\text{s})} \right)$$

Donde :

$\dot{\epsilon}$ = Velocidad de Deformación, o
Velocidad de Termofluencia

$\Delta \epsilon$ = Incremento de la deformación (mm./mm.)

Δt = Incremento del tiempo (s)

La termofluencia consiste en lo siguiente :

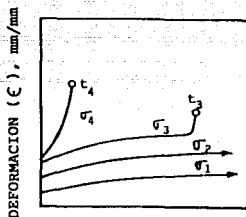
COMPORTAMIENTO GENERAL DURANTE LA TERMOFLUENCIA

ETAPA	TEMPERATURA	CARACTERISTICAS
Primera (Primaria)	$T > 0.40 T_H$ o $T < 0.40 T_H$	$\dot{\epsilon}$ decrecen como t y ϵ aumentan.
Secundaria (Estado-Estacionario)	$T \geq 0.40 T_H$	$\dot{\epsilon}$ es constante. (ϵ_{SS})
Tercera (Terciaria)	$T \geq 0.40 T_H$	$\dot{\epsilon}$ aumenta como t y ϵ aumentan.

Donde :

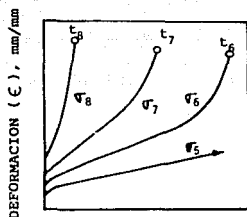
$\dot{\epsilon}_{SS}$ = velocidad de Deformación en Estado-Estacionario

Además de la temperatura, el esfuerzo también afecta la termofluencia como se muestra en la Figura 3. En ambos regímenes de temperatura la deformación elástica esta bajo incrementos de carga.



TIEMPO (t), h

(a)



TIEMPO (t), h

(b)

FIGURA 3. Termofluencia de un material a elevadas temperaturas como una función de esfuerzos, donde el tiempo de ruptura es t_i para esfuerzo σ_i .

- a) Fluencia a baja temperatura donde, $\sigma_4 > \sigma_3 > \sigma_2 > \sigma_1$.
- b) Termofluencia a elevadas temperaturas donde,
 $\sigma_8 > \sigma_7 > \sigma_6 > \sigma_5$.

A bajas temperaturas (Figura 3a), muy altos esfuerzos (σ_4) cerca o arriba del esfuerzo de tensión último, resulta en una rápida deformación y la fractura en el tiempo t_4 . Un esfuerzo poco menor (σ_3) puede resultar en un largo periodo de constante disminución de la velocidad de deformación, seguida por una transición a una velocidad acelerada y falla en t_3 .

Finalmente, esfuerzos más bajos (σ_2 y σ_1) muestran velocidades de deformación decrecientes, donde σ_2 produce más deformación elástica y plástica que σ_1 en el mismo período. El rango de esfuerzo sobre el cual cambia el comportamiento de σ_4 en comparación de σ_2 es pequeño y la fractura bajo el esfuerzo σ_3 es el resultado de inestabilidades microestructurales y/o mecánicas.

A elevadas temperaturas, Figura 3b, aumentando el esfuerzo inicial usualmente se acorta el período de tiempo gastado en cada etapa de la termofluencia. De aquí, el tiempo de ruptura (t_6 , t_7 y t_8) disminuye conforme se aumenta el esfuerzo. Además, el estado-estacionario de la velocidad de deformación disminuye, si el esfuerzo aplicado disminuye. El rango de esfuerzo sobre el cual el comportamiento cambia del mostrado por los esfuerzos σ_8 y σ_5 (Figura 3b), es mucho más amplio que el rango necesario para producir un comportamiento similar a bajas temperaturas (Figura 3a).

La mayor parte del comportamiento mostrado en las Figuras 2 y 3 (Primera y Segunda Etapa de la termofluencia), pueden ser entendidas como el resultado de la competencia entre los procesos de recristalización y trabajo-endurecimiento.

A bajas temperaturas, si se aplica una carga a un metal, éste empieza con una rápida deformación, pero ésta no se mantiene, ya que los granos deformados aumentan la resistencia a mayor deformación, por lo que, la velocidad de fluencia siempre estará

disminuyendo, hasta que el metal alcanza un punto de equilibrio en el que ya no se deformará, ya que la temperatura está abajo de la temperatura más baja de recristalización, llegando a una deformación límite.

Sin embargo, si a elevadas temperaturas se aplica una carga a un metal, los granos se deformarán hasta llegar a una deformación límite, pero los granos empiezan a recristalizarse con el tiempo y se disipará la deformación límite, con lo cual los procesos de endurecimiento y recristalización se balancean uno a otro. Conforme aumenta la temperatura, la recristalización llega a ser más fácil de activar y sobreviene el endurecimiento. Debido a que a menor deformación corresponde una mayor temperatura para que se active la recristalización, y por lo tanto, la recristalización se presentará cuando llegue a cierta deformación nuevamente. De esta manera la transición de la primera etapa a la segunda etapa de la termofluencia, ocurre generalmente en bajas deformaciones conforme aumenta la temperatura.

La tercera etapa de la termofluencia es el resultado de inestabilidades microestructurales y/o mecánicas durante el deslizamiento de los planos, y conforme el metal experimenta la recristalización, los átomos se mueven hacia dentro o fuera de la línea de dislocación por difusión, en una dirección perpendicular a la del plano de deslizamiento, causando un movimiento o escalamiento en las dislocaciones, como se muestra en la Figura 4.

Este movimiento permite que se desarrollen los defectos microestructurales, tales como vacancias e intersticialidades, ocasionando en los límites de los granos dislocaciones y microgrietas que hacen que aumente la velocidad de deformación (tercera etapa de la termofluencia) y debido a la disminución en el área de la sección transversal, por la formación de un cuello, a lo cual corresponde un esfuerzo ligeramente más alto en esta región, pudiendo llegar hasta la falla.

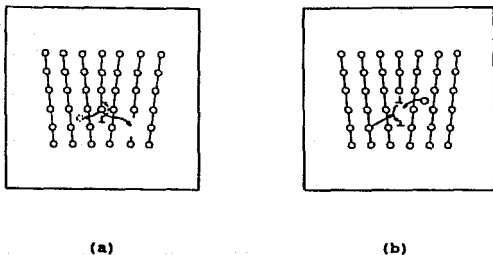


FIGURA 4. Aumento de las dislocaciones.

- (a) Los átomos dejan la línea de dislocación para crear intersticialidades o llenar vacancias.
- (b) Los átomos están junto a la línea de dislocación creando vacancias o eliminando intersticialidades.

Debido a que la velocidad de deformación depende del esfuerzo, la deformación y la cantidad de deformación aumentarán con la proximidad de un defecto, entonces esto conducirá a un aumento en el número y tamaño de las fallas microestructurales, las cuales alternativamente disminuyen el área local de la sección transversal y aumenta la deformación. Adicionalmente, los defectos microestructurales como vacancias e intersticialidades, así como también, otras heterogeneidades, pueden actuar como lugares para la formación de un cuello.

Una vez formada la deformación, tiende a aumentar en esta región porque el esfuerzo local es más alto que en otras partes de la probeta. El cuello continua creciendo porque a más deformaciones locales corresponde un mayor esfuerzo.

1.- CURVAS DE TERMOFLUENCIA.

Si un esfuerzo es aplicado repentinamente a metales puros, algunas soluciones solidas y la mayoría de las aleaciones de ingeniería a una temperatura cerca o más alta de $0.40 T_M$, la deformación procede como se muestra en la Figura 5.

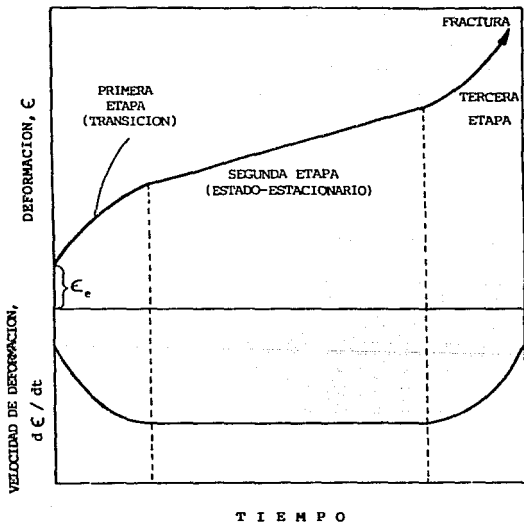


FIGURA 5. Variación de la Termofluencia y la velocidad de deformación con respecto al tiempo.

La aplicación inicial del esfuerzo causa una deformación elástica instantánea, ϵ_e . A bajas temperaturas, cesa la deformación significativamente, después de la aplicación inicial del esfuerzo, y se requiere un aumento en el esfuerzo para causar más deformación.

A elevadas temperaturas ($T \geq 0.40 T_M$), la deformación bajo una carga constante aplicada continúa con el tiempo. La etapa temprana de tal deformación, llamada Termofluencia Primaria, se caracteriza por una velocidad inicial de alta termofluencia, $d\epsilon/dt$, la cual disminuye gradualmente con el tiempo. Eventualmente se observa con el tiempo una variación lineal de acumulación de deformación de termofluencia.

La región de termofluencia de estado-estacionario, se caracteriza por un valor constante, una velocidad mínima de deformación. Las velocidades de deformación del estado-estacionario, dependen significativamente de un esfuerzo, temperatura y son usados frecuentemente para comparar la resistencia a la termofluencia entre aleaciones. La pendiente de la curva de termofluencia es la velocidad de deformación o velocidad de termofluencia :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta t} \quad \frac{(\text{mm/mm})}{(\text{s})}$$

Después de una significativa deformación en la termofluencia de estado-estacionario, ocurre la formación de un cuello o el suficiente daño interno en la forma de vacancias o cavidades, que se acumulan para reducir el área de la sección transversal, resultando en un aumento en el esfuerzo y velocidad de deformación. El proceso se acelera rápidamente y ocurre la falla. Esta región de la curva de termofluencia se conoce como Termofluencia Terciaria.

La Figura 5, también muestra la derivada de la curva de termofluencia a la velocidad de esta curva.

2.- INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE GRANO.

En base a la teoría de la termofluencia, un material que tenga un tamaño de grano grande, deberá mostrar una mejor resistencia a la termofluencia que un material de grano fino. Ya que los límites de los granos llegan a ser la posición de fallas de dislocaciones, por lo que, menos límites de grano allí presentes, tomará mayor tiempo a las dislocaciones la migración a estos límites. También, si hay muchos granos, hay muchos planos cristalinos, sobre los cuales pueden ocurrir deslizamientos. Así, el endurecimiento por deformación puede tomar lugar más rápidamente y el balance entre trabajo-endurecimiento y la recristalización tomarán lugar a una velocidad más alta de termofluencia.

Un metal entonces, deberá tener una velocidad de termofluencia más baja y una resistencia a la ruptura más alta, cuando éste tenga tamaño de grano más grande que el que tenga grano fino. Este es, sin duda, el caso y es una de las razones del porque el Incoloy 800 y la serie de Aceros Inoxidable 300 se especifican como una solución completa para aplicaciones a alta temperatura.

3.- TIPOS DE FRACTURAS.

En investigaciones recientes, se notó que a elevadas temperaturas la aparición de fracturas, en los metales, en las pruebas a tensión cambian de acuerdo a la cantidad de la carga. También, se ha notado que al disminuir la cantidad de la carga de la probeta, disminuye la resistencia a la fractura del metal.

Se observó que al disminuir la velocidad de deformación, que dió la resistencia más baja a la fractura, la fractura apareció con la separación de granos uno de otro. La fractura fue intergranular. A temperaturas más bajas, donde la deformación llega a una deformación límite y posteriormente sobreviene la fractura, la falla fue transgranular, o que los granos se rompieron en sí mismos.

Ahora se sabe que estaban observando la influencia de la termofluencia. Ya que los metales están constituidos por muchos granos, la resistencia del metal se determina por la resistencia total de los granos y de sus límites de granos. Si los límites

de los granos son más fuertes que los granos, la falla en la fractura se presentará a través de los granos o transgranularmente; sin embargo, si los granos son más fuertes que los límites de los mismos, la falla en la fractura se presentará alrededor de los granos y a través de los límites de los granos, o intergranularmente.

Ya que parece ser un cambio en la resistencia relativa de los granos y de los límites de los granos con aumento de temperatura, deberá haber alguna temperatura en la cual la resistencia de los dos sea aproximadamente igual. Esta condición se representa esquemáticamente en la Figura 6. El lado izquierdo del diagrama representa un rango donde los límites de los granos son más fuertes que los granos en sí, mientras que en el lado derecho los granos son más fuertes que los límites de los mismos. El punto en el que estas dos líneas de resistencia se cruzan una con otra, es donde los dos tienen aproximadamente igual resistencia y es conocida como temperatura equicohesiva.

La temperatura equicohesiva es aquella en la que el tipo de fractura cambia de transcristalina a intercristalina. La posición de esta temperatura depende de la composición, la cantidad de deformación y el tiempo que el metal es mantenido a esa temperatura. Pero para una aleación o metal dado, la posición de esta temperatura es constante. Por lo tanto, la temperatura equicohesiva y la temperatura más baja de recristalización, son esencialmente la misma.

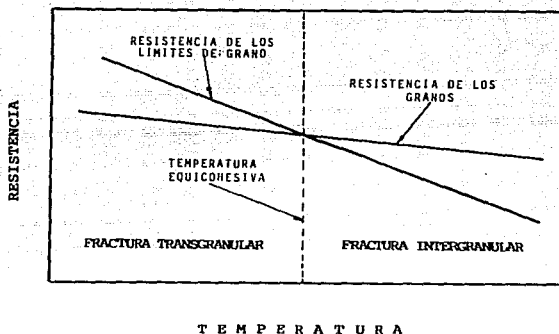


FIGURA 6. Relación esquemática entre tipo de fractura y temperatura.

A menudo, cuando la fractura es transgranular en una prueba de termofluencia, los granos parecen estar severamente deformados o "trabajados en frío". Esto muestra que la deformación que aparece durante la prueba no se ha eliminado por recristalización. Por otro lado, cuando la fractura es intergranular, aún si la pieza ha sido alargada considerablemente los granos generalmente aparecen libres de deformación y equiaxiales. Estos granos son más o menos del mismo tamaño en cualquier dirección. Esto indica que el grano no se deforma durante la prueba o se recristalizó, porque

el metal estaba arriba de su temperatura más baja de recristalización o equicohesiva.

4.- MICROESTRUCTURA.

Durante la termofluencia, cambios microestructurales importantes ocurren a todos lo niveles.

En la escala atómica, las dislocaciones se crean y forzan para moverse a través del material. Esto permite que al deformarse tanto el endurecimiento como la densidad de dislocaciones aumente y las dislocaciones encuentren barreras que limiten su movimiento.

La acción combinada de endurecimiento y procesos de recuperación (recristalización) durante la termofluencia primaria, puede llevar a la formación de una distribución estable de subgranos o una distribución de dislocación uniforme.

Estas configuraciones de dislocaciones uniformes o subgranos son mantenidas y son características del estado-estacionario o segunda etapa de la termofluencia.

La deformación de termofluencia, también produce cambios en las macro y micro estructuras. Tales cambios incluyen bandas de dislocación, límites de granos deformes, formación de vacancias, y crecimiento de cristales. El alcance de estos cambios

microestructurales es, generalmente, incrementando cerca de los lugares de fractura, comparado con otras regiones.

La microestructura de una probeta sometida a una prueba de termofluencia o esfuerzo-ruptura, raramente se parece a la microestructura inicial. La mayoría de los metales no son termodinámicamente estables, por lo tanto, la exposición prolongada bajo las condiciones de termofluencia, puede resultar en la precipitación de nuevas fases, disolución o incremento de fases diferentes, crecimiento de granos, etc. Aunque muchos de los cambios estructurales pueden ser duplicados a través de un tratamiento térmico, algunos cambios sólo podrán ocurrir bajo la influencia combinada de esfuerzo y temperatura.

Los cambios microestructurales, por la influencia combinada de temperatura y esfuerzo, son los más difíciles de controlar. Aún si los cambios son esencialmente completos después de la primera etapa de la termofluencia y la estructura resultante es más resistente a la termofluencia que la estructura original, la deformación del metal puede ser tan grande que el material no puede usarse; para evitar estos cambios, resulta necesario la simulación de esta primera etapa de la termofluencia en las pruebas.

2. PRUEBAS.

El uso de pruebas que miden las propiedades a la termofluencia, esfuerzo-ruptura y esfuerzo-relajación ha aumentado, debido al diseño y aplicación de piezas de metales que deberán resistir altas carga a elevadas temperaturas, durante largos períodos de tiempo. Muchas piezas son diseñadas para dar un período de vida esperado. Para determinar ese período de vida, se necesita información confiable para predecir la deformación esperada bajo las condiciones de esfuerzo y temperatura a la que se encontrará en servicio. Toda esta información se puede obtener bajo cargas a tensión, compresión, tensión combinada, flexión y torsión.

1.- PRUEBA DE TERMOFLUENCIA.

En esta prueba se mide la deformación de un metal, como una función del tiempo a temperatura constante. En esta prueba la carga es mantenida usualmente constante a lo largo de la prueba. Así, conforme la probeta se elonga y decrece el área de la sección transversal, la deformación axial aumenta. El esfuerzo inicial que fue aplicado a la probeta es usualmente el valor reportado de esfuerzo. La curva "A" en la Figura 7, ilustra una curva típica de termofluencia para una prueba de carga constante.

a. Prueba de Termofluencia-Ruptura.

En esta prueba es la misma que la de termofluencia, sólo que la prueba es corrida hasta la fractura.

b. Prueba de Termofluencia Bajo Esfuerzo-Constante.

Se han desarrollado métodos de compensación para el cambio de dimensiones de la probeta, de modo que se lleva a cabo la prueba de termofluencia bajo condiciones de esfuerzo-constante. Cuando se realizan pruebas de esfuerzo-constante, no se presenta la tercer etapa de la curva típica de termofluencia, y frecuentemente se obtiene una curva similar a "B" de la Figura 7.

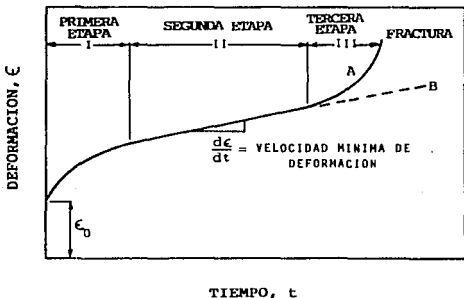


FIGURA 7. Curva Típica de Termofluencia, mostrando las tres etapas.

Curva A, Prueba de Carga Constante.

Curva B, Prueba de Esfuerzo Constante.

2.- PRUEBA DE ESFUERZO-RUPTURA.

Estas pruebas determinan la tendencia de los materiales que pueden romperse bajo una sobrecarga. Es ampliamente usada en la selección de materiales, para aplicaciones en donde las tolerancias dimensionales no son críticas, pero en la cual no se puede tolerar la ruptura. La prueba de esfuerzo-ruptura, es similar a una prueba de termofluencia de carga-constante, usando el mismo tipo de probeta y máquina de pruebas. Sin embargo, no se hace ninguna medición de la deformación durante la prueba. La probeta es sometida a un esfuerzo bajo carga constante a una temperatura constante, como en la prueba de termofluencia, y se mide el tiempo de fractura.

3.- PRUEBA DE ESFUERZO-RELAJACION.

Esta prueba es un poco semejante a la prueba de termofluencia, pero la carga baja continuamente en lugar de permanecer constante. En una prueba de Esfuerzo-Relajación, la carga se reduce a intervalos para mantener una deformación constante. El eje "y" en la curva de Esfuerzo-Relajación, es más bien esfuerzo o carga que deformación (elongación), como en la curva de termofluencia.

3. PROBETAS PARA PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA Y ESFUERZO-RUPTURA.

Las probetas para pruebas de carga constante son preparadas para encontrar las especificaciones de los materiales y de los parámetros de diseño de fin de uso.

El tamaño y la forma de las probetas para pruebas de termofluencia y esfuerzo-ruptura en tensión deben estar basadas primeramente en los requerimientos necesarios para obtener muestras representativas.

Debido a que el tamaño de la probeta tiene un pequeño efecto en el tiempo de ruptura y las propiedades de termofluencia, existe una gran variedad de configuraciones y tamaños a consecuencia de la gran diversidad de máquinas y dispositivos de sujeción.

Aún cuando no existe una estandarización de probetas para pruebas de termofluencia y esfuerzo-ruptura, la A.S.T.M., (normas E-139), considera como aceptables las probetas para pruebas de tensión (normas E-8 y E-8M) como se ilustran, en las Figuras 8a, 8b, 8c, 8d y 8e).

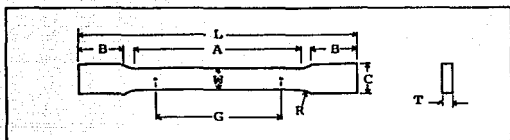
De acuerdo a la A.S.T.M., (normas E-8 y E-8M), las probetas deben estar orientadas de modo que su eje esté paralelo a la dirección de la fabricación.

En las probetas de sección circular, independientemente del tamaño, la longitud calibrada en la sección reducida, debe ser

de cuatro veces el diámetro de la sección reducida.

Debe tenerse especial cuidado en el maquinado de las probetas, si se quiere asegurar una precisión y una veracidad en los resultados, ya que las superficies de las probetas deben estar libres de rayaduras, cortes u otro concentrador de esfuerzos y presentar un pulido en su superficie por métodos metalográficos, esto es, a base de polvos de óxido de aluminio en un medio líquido, ya que una preparación inapropiada a menudo es la razón de que los resultados sean insatisfactorios e incorrectos en las pruebas.

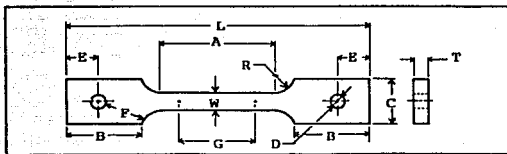
Existen muchos sistemas de sujeción de las probetas utilizados exitosamente, entre los más comunes está el de probetas con los extremos roscados y las probetas con cabeza de botón; sin embargo, cualquiera que sea, debe asegurar una perfecta alineación.



DIMENSIONES ESTANDAR

	<u>PROBETA ESTANDAR</u>		<u>PROBETA PEQUEÑA</u>
	TIPO PLACA mm./ (Pulgadas)	TIPO LAMINA mm./ (Pulgadas)	mm./ (Pulgadas)
G	200.0 ± 0.2 (8.00 ± 0.01)	500 ± 0.1 (2.00 ± 0.005)	25.0 ± 0.1 (1.00 ± 0.003)
W	40.0 ± 2.0 (1 1/2 ± 1/8 - 1/4)	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	6.0 ± 0.1 (0.250 ± 0.005)
T	ESPESOR DE		MATERIAL
R min.	25 (1)	12.5 (1/2)	.6 (1/4)
L min.	450 (18)	200 (8)	100 (4)
A min.	225 (9)	57 (2 1/4)	32 (1 1/4)
B min.	75 (3)	50 (2)	30 (1 1/4)
C aprox.	50 (2)	20 (3/4)	10 (3/8)

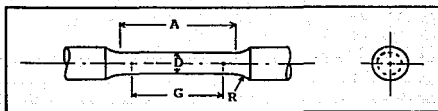
FIGURA 8a. Probetas de Tensión Rectangular.



DIMENSIONES ESTANDAR

	mm.	Pulgadas
G	5.0 ± 0.1	2.000 ± 0.005
W	12.5 ± 0.2	0.500 ± 0.010
T max.	12.5	5/8
R min.	13	1/2
L min.	200	8
A min.	57	2 1/4
B min.	50	2
C aprox.	50	2
D min.	13	1/2
E aprox.	40	1 1/2
F min.	15	(1/2)

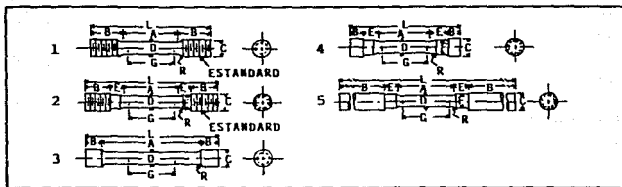
FIGURA 8b. Probeta de Tensión con Carga por Medio de Ferno.



DIMENSIONES ESTÁNDAR

	PROBETA ESTÁNDAR	PROBETAS PEQUEÑAS PROPORCIONALES A LA ESTÁNDAR			
	mm./ (Pulgadas)	mm./ (Pulgadas)	mm./ (Pulgadas)	mm./ (Pulgadas)	mm./ (Pulgadas)
G	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	45.0 ± 0.1 (1.400 ± 0.005)	30.0 ± 0.1 (1.000 ± 0.005)	20.0 ± 0.1 (0.640 ± 0.005)	12.5 ± 0.1 (0.450 ± 0.005)
D	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	9.0 ± 0.1 (0.350 ± 0.007)	6.0 ± 0.1 (0.250 ± 0.005)	4.0 ± 0.1 (0.160 ± 0.003)	2.5 ± 0.1 (0.113 ± 0.002)
R mín.	10 (3/8)	8 (1/4)	6 (3/16)	4 (5/32)	2 (3/32)
A mín.	75 (2 1/4)	54 (1 3/4)	36 (1 1/4)	24 (3/4)	20 (5/8)

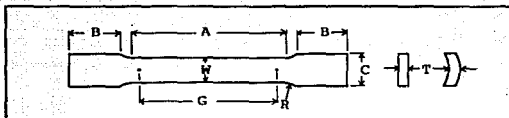
FIGURA Bc. Probeta de Tensión, de Sección Circular, Estándar y Ejemplos de Probetas Pequeñas Proporcionalas a lo Estándar.



DIMENSIONES ESTÁNDAR

	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3	PROBETA 4	PROBETA 5
	mm. / (Pulgadas)	mm. / (Pulgadas)	mm. / (Pulgadas)	mm. / (Pulgadas)	mm. / (Pulgadas)
G	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	62.5 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)
D	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)
R min.	10 (3/8)	10 (3/8)	2 (1/16)	10 (3/8)	10 (3/8)
A	75 min. (2 1/4 min.)	75 min. (2 1/4 min.)	100 aprox. (4 aprox.)	75 min. (2 1/4 min.)	75 min. (2 1/4 min.)
L aprox.	145 (5)	155 (5 1/2)	140 (5 1/2)	140 (4 3/4)	255 (9 1/2)
B	35 aprox. (1 3/8 aprox.)	25 aprox. (1 aprox.)	20 aprox. (3/4 aprox.)	15 aprox. (1/2 aprox.)	75 min. (3 min.)
C	20 (3/4)	20 (3/4)	20 (23/32)	22 (7/8)	20 (3/4)
E aprox.		15 (5/8)		20 (3/4)	15 (5/8)
F		15 (5/8)		15 (5/8)	15 (19/32)

FIGURA Bd. Probetas de Tensión de Sección Circular de Varios Tipos de Terminaciones.



DIMENSIONES ESTANDAR

	PROBETA 1 mm./ (Pulgadas)	PROBETA 2 mm./ (Pulgadas)	PROBETA 3 mm./ (Pulgadas)
G	50 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	50 ± 0.1 (2.000 ± 0.005)	200 ± 0.2 (8.000 ± 0.010)
W	12.5 ± 0.2 (0.500 ± 0.010)	40 ± 2.0 (1 1/2 ± 1/8 - 1/4)	40 ± 2.0 (1 1/2 ± 1/8 - 1/4)
T	ESPESOR DE LA PROBETA		
R min.	12.5 (1/2)	25 (1)	.25 (1)
A min.	60 (2 1/4)	60 (2 1/4)	230 (9)
B min.	75 (3)	75 (3)	75 (3)
C aprox.	20 (11/16)	50 (2)	50 (2)

FIGURA 8e. Probeta de Tensión para Productos Tubulares de Diámetro Largo.

II. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE LA MAQUINA PARA
PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA.

1. DISEÑO Y CONSTRUCCION.

1.- PRINCIPIOS BASICOS DEL DISEÑO.

La determinación de poder obtener las propiedades de los metales sometidos bajo condiciones de termofluencia, nos llevó al requerimiento de un equipo de pruebas aceptable.

Para el diseño de este equipo de pruebas, se consideraron los principios establecidos por la A.S.T.M., (norma E-139) y los propios de los equipos analizados, con el fin de tener una base particular. Los principios esenciales son :

- * Un sistema de carga.
- * Alineamiento axial de la carga en la probeta.
- * Evitar cargas de choque o repentinas.
- * Evitar la aplicación de torque a la probeta.
- * El calentamiento debe ser por una resistencia eléctrica u horno de radiación, con la probeta en el aire a presión atmosférica.
- * Control automático de temperatura aceptable.
- * Sistema idicador de elongación.
- * Concentricidad de la probeta.

Además, la máquina a diseñar, debía cumplir otros factores propios como :

- * Un brazo de palanca regulable, como sistema de carga para probetas uniaxiales sometidas a tensión.
- * Diseño sencillo.
- * Estructura económica.
- * Poder realizar pruebas de termofluencia a la tensión bajo carga constante y pruebas de esfuerzo-ruptura.
- * Sistema de graficación de la elongación con respecto al tiempo.

Como Principio del Diseño, se analizó un sistema de brazo de palanca como sistema de carga, ya que las cargas muertas serian demasiado grandes, por lo que se eligió un sistema de una sola palanca con articulación en el extremo, Figura 9 (b).

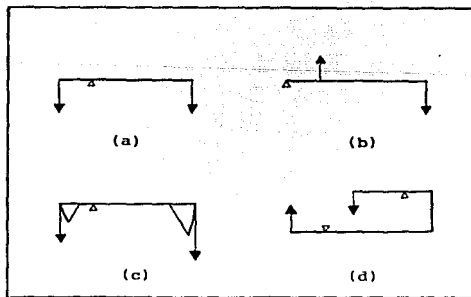


FIGURA 9. Sistemas de carga, involucrando una sola Palanca (a, b, c) y arreglo de una Palanca Doble (d).

Una vez elegido el sistema de carga (Figura 9 (b)), se tenía que proporcionar a dicho sistema una estructura que le permitiera a la máquina la mayor estabilidad posible, por lo cual se incorporó al sistema de carga una estructura compuesta por cuatro columnas.

Hasta esta etapa del diseño, se cuenta con los Sistemas Básicos, a partir de los cuales se desarrollará y conformará la máquina para pruebas de termofluencia a la tensión.

Además de los principios básicos y los factores propios que debería cumplir la máquina, se debería tomar en cuenta, para el desarrollo del diseño, la existencia de materiales y equipo que se tenían disponibles en el CENTRO DE ASIMILACION TECNOLOGICA (CAT).

En base a lo anterior y teniendo en cuenta que se trata de un prototipo, las dimensiones de los elementos que conforman la máquina han sido excedidos, asegurando con ello su funcionamiento; sin embargo, aquellos elementos que tienen que soportar esfuerzos críticos, han sido calculados para cumplir con la capacidad aproximada de carga de la máquina, ya que los valores utilizados en los cálculos son en base a materiales estándares.

2.- ESTRUCTURA DE LA MAQUINA.

El desarrollo del diseño de la estructura de la máquina, debería cumplir con los principios planteados al inicio :

- * Diseño Sencillo.
- * Estructura Económica.

Por lo tanto, teniendo como base el material y equipo disponible, la estructura fue conformada por cuatro columnas, las cuales están apoyadas en dos perfiles estructurales "T" normales invertidos, los cuales fueron anclados al piso.

De las cuatro columnas, dos son perfiles estructurales "c" o "canal" (columnas posteriores) y dos son perfiles tabulares rectangulares "PT'R" (columnas frontales).

Las cuatro columnas están unidas entre sí por soleras y piezas de placa comercial, por medio de soldadura por arco eléctrico en tipo de filete (junta en T y a traslape) y esto a los perfiles de apoyo, como se muestra en la Figura 10.

Teniendo en cuenta que en la estructura existen elementos axiales sometidos a compresión (columnas) y a flexión (placa superior y de apoyo), es necesario estimar aproximadamente la capacidad máxima de carga de aquellos elementos que soportan esfuerzos críticos.

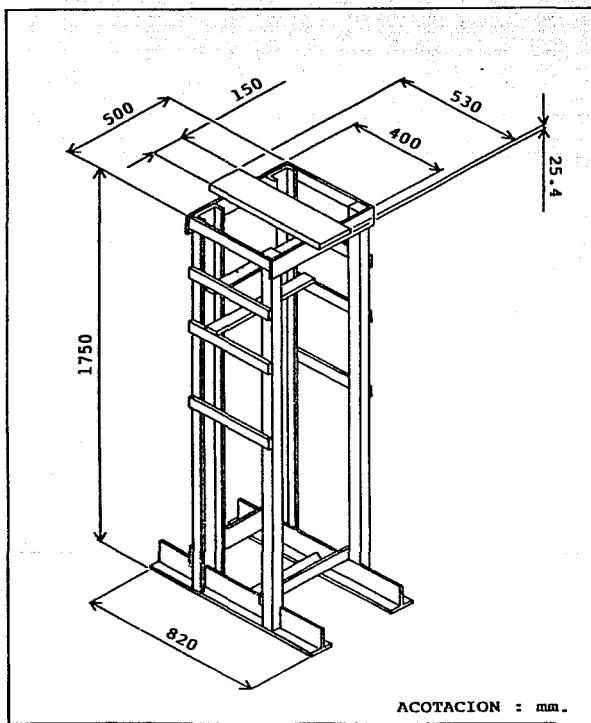


FIGURA 10. Estructura de la Máquina.

a. Cálculos.

1). Perfil Estructural "c" o "canal".

En base a la ecuación de Euler para columnas empotradas en ambos extremos.

$$P = 4 \frac{EI\pi^2}{L^2} \quad (N) \quad (1)$$

Donde :

P = Carga a soportar. (N)

E = Módulo de Elasticidad. (Pa)

I = Momento de Inercia. (m⁴)

L = Longitud de la columna. (m)

Por lo tanto, para un perfil comercial C100X8⁽¹⁾:

$$I = 0.132 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

$$E = 207 \text{ G Pa.}$$

$$L = 1.750 \text{ m.}$$

Sustituyendo en la Ecuación (1)

$$P_c = \frac{4 (207 \times 10^9) (0.132 \times 10^{-6}) \pi^2}{(1.750)^2}$$

$$P_c = 352231.27 \text{ N.}$$

(1) Singer, Ferdinand y Pitel, Andrew. Resistencia de materiales. pp. 538-539. / Shigley, Joseph y Mitchell Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica ... p. 844

- 2). Perfil estructural "PTR" de 50.8 X 50.8 X 3.175 mm.
(2 X 2 X 1/8 pulgadas)

Donde ⁽¹⁾:

$$E = 207 \text{ G Pa}$$

$$L = 1.750 \text{ m.}$$

Considerando la sección transversal mostrada en la
Figura 11.

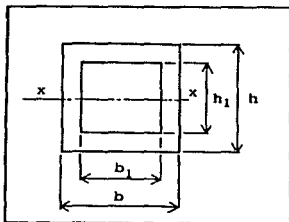


FIGURA 11. Sección Transversal Rectangular Hueca.

$$I = \frac{bh^3 - b_1h_1^3}{12} \quad (\text{m}^4) \quad (2)$$

Sustituyendo valores en la Ecuación (2).

$$I = 2.2966 \times 10^{-7} \text{ m}^4 .$$

(1) Shigley, Joseph y Mitchell Larry. Diseño en Ingeniería.
Mecánica p. 844

Sustituyendo en la Ecuación (1).

$$P_{PTR} = 612829.05 \text{ N.}$$

Considerando el tipo de columnas menos resistentes, tendríamos que las cuatro columnas soportarán una carga máxima, antes de flexionarse de :

$$P_T = 4 P_C = 4 (352231.27)$$

$$P_T = \underline{1408925.1 \text{ N.}}$$

3). Placa Superior.

Se consideraron para la placa superior las dimensiones mostradas en la Figura 10; sin embargo, la longitud que se tomará para efectos de cálculos es de 415.7 mm. debido a que es la distancia entre los apoyos, por lo tanto, para la placa comercial (AISI 1018) ⁽¹⁾ :

$$E = 207 \text{ G Pa.}$$

$$\sigma_{PC} = 150 \text{ M Pa.}$$

$$L = 415.7 \text{ mm.}$$

(1) Shigley, Joseph y Mitchell Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica ... p. 844

Singer, Ferdinand y Pitel, Andrew. Resistencia de Materiales ... p. 527

Considerando la sección rectangular mostrada en la Figura 12.

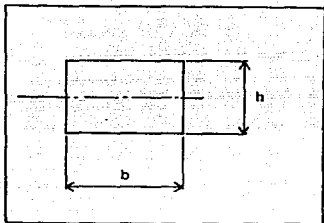


FIGURA 12. Sección Transversal Rectangular.

El momento de inercia y el módulo elástico de resistencia de una sección transversal rectangular será :

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (m^4) \quad (3)$$

$$S = \frac{bh^2}{6} \quad (m^3) \quad (4)$$

Donde :

σ_{pc} = Límite de Proporcionalidad a cortante. (Pa)

S = Módulo Elástico de Sección. (m^3)

Tomando en cuenta que la Placa Superior está trabajando como viga con carga al centro, tendríamos la ecuación para la flexión en vigas :

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S} \quad (Pa) \quad (5)$$

σ_{\max} = Esfuerzo Máximo Permissible. (Pa)

M_{\max} = Momento Flexionante Máximo. (N.m)

Sustituyendo la ecuación (4) en la ecuación (5) :

$$\sigma_{\max} = \frac{6 M_{\max}}{bh^2} \quad (\text{Pa}) \quad (6)$$

Por tanto, el diagrama de fuerza cortante y momento flexionante se muestra en la Figura 13.

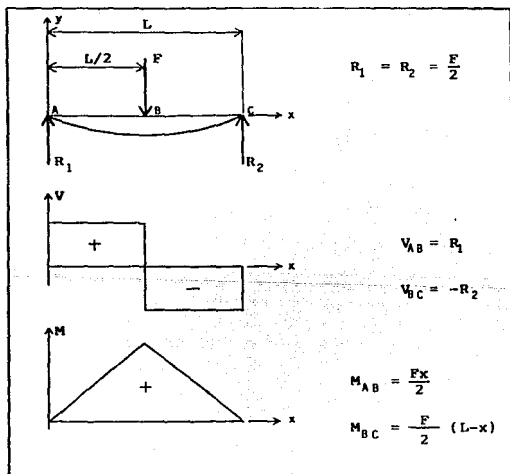


FIGURA 13. Fuerza Cortante y Momento Flexionante de una Viga con Doble Apoyo y Carga al Centro.

Por lo que el momento flexionante máximo es :

$$M_{\max} = \frac{FL}{4} \text{ (N.m)} \quad (7)$$

Sustituyendo la ecuación (7) en la ecuación (6)

$$\sigma_{\max} = \frac{6 FL^2}{4 bh^2} \text{ (Pa)} \quad (8)$$

Donde :

F = Carga aplicada. (N)

b = Base de la sección transversal rectangular. (m)

h = Altura de la sección transversal rectangular.(m)

Despejando la carga de la ecuación (8)

$$F = \frac{2 \sigma_{\max} b h^2}{3L} \text{ (N)} \quad (9)$$

Sustituyendo los valores para la placa superior en la ecuación (9)

$$F = \frac{2 (150 \times 10^6) (0.15) (0.0254)^2}{3 (0.4157)}$$

$$F = 23279.8 \text{ N.}$$

Así nuestra placa superior resistirá una carga de 23 kN antes de comenzar con la deformación permanente; sin embargo, cobria la necesidad de determinar cuánto se deformará la placa superior si se aplica esta carga, considerando para efectos de cálculo un elemento diferencial de viga (Figura 14).

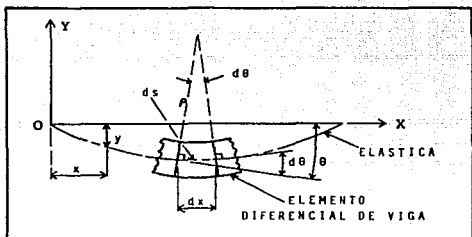


FIGURA 14. Elemento Diferencial de Viga.

Si tenemos :

$$\theta = \frac{dy}{dx} \quad (10)$$

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (11)$$

Si la variación de θ en una longitud diferencial ds

es : $ds = \rho d\theta$ (12)

Siendo ρ el radio de curvatura en la longitud de arco ds como la curvatura elástica es casi recta :

$$ds \approx dx$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d\theta}{ds} \approx \frac{d\theta}{dx} \quad \text{o bien} \quad \frac{1}{\rho} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (13)$$

Según la fórmula de deflexión :

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_{max}}{EI} \quad (14)$$

ρ = Radio de Curvatura

EI = Rigidez a la Flexión

Sustituyendo la ecuación (13) en la ecuación (14)

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M \max \quad (15)$$

Suponiendo a EI constante e integrando dos veces

$$\begin{aligned} EI y &= \iint M \max dx dx + C_1 x + C_2 \\ y &= \text{Deflexión Máxima} \end{aligned}$$

Por lo tanto, integrando para el momento flexionante de la placa superior.

$$M \max = \frac{1}{4} FL \quad \text{Pero como } \frac{L}{2} = x$$

$$M \max = \frac{1}{2} Fx \quad (\text{N.m}) \quad (16)$$

Sustituyendo el valor del momento flexionante máximo (ecuación (16)) en la ecuación (15).

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{1}{2} Fx \quad (17)$$

Integrando :

$$EI \frac{dy}{dx} = \frac{1}{4} Fx^2 + C_1 \quad (18)$$

Integrando nuevamente :

$$EI y = \frac{1}{12} Fx^3 + xC_1 + C_2 \quad (19)$$

Si $x = 0$ y $y = 0$ en la ecuación (19) entonces, $C_2 = 0$

Por simetría la pendiente en el centro $dy/dx = 0$, para

$x = L/2$, sustituyendo en la ecuación (18)

$$C_1 = -\frac{FL^2}{16} \quad (20)$$

Sustituyendo valores de C_1 y C_2 en la ecuación (19)

$$EI y = \frac{1}{12} Fx^3 + x \left(-\frac{1}{16} FL^2 \right)$$

Sustituyendo el valor de $x = L/2$, donde ocurre la máxima deflexión.

$$Y = -\frac{FL^3}{48 EI} (m) \quad (21)$$

Este será el valor de la máxima deflexión para una viga con carga al centro.

Sustituyendo los valores, para la placa superior en la ecuación (3) y en la ecuación (21).

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0.15)(0.0254)^3}{12} =$$

$$I = 2.0484 \times 10^{-7} m^4$$

Donde :

$$Y = -\frac{FL^3}{48 EI} = \frac{-(23279.8)(0.4157)^3(1000)}{48 (207 \times 10^9) (2.0484 \times 10^{-7})} =$$

$$Y = -0.821 \text{ mm.}$$

Así que aplicando una carga de 23 KN, esto es, la capacidad máxima, la placa superior tendrá una deflexión máxima de 0.821 mm. que resultaría ser una deformación insignificante y cuyo valor aseguraría que dicho elemento no fallará durante las pruebas. Además, de que este valor, no afectaría en el resultado de las mismas.

4). Placas de Apoyo para la Placa Superior.

Considerando las dimensiones de las placas de apoyo, las mostradas en la Figura 10 y teniendo para la placa comercial (AISI 1018) ⁽¹⁾:

$$E = 207 \text{ G Pa}$$

$$\sigma_{pc} = 150 \text{ M Pa}$$

Tomando en cuenta que se trata también, de una sección transversal rectangular y que trabaja como viga con carga al centro como la placa superior, sustituyendo valores en la ecuación (9) :

$$F = \frac{2 (150 \times 10^6) (0.0127) (0.0889)^2}{3 (0.40)}$$

$$F = 25092.7 \text{ N.}$$

Considerando de que son dos las placas que soportan la placa superior (dos apoyos) tenemos, que la carga que soportan es :

$$F = 2 (25092.7)$$

$$F = 50185.4 \text{ N.}$$

(1) Singer, Ferdinand y Pitel, Andrew. Resistencia de Materiales. pp. 538-539.

Shigley, Joseph y Mitchell Larry. Diseño de Ingeniería Mecánica... p. 844

La deformación, si se aplicara dicha carga la obtendríamos sustituyendo valores en la ecuación (3) y la ecuación (21).

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0.0127)(0.0889)^3}{12}$$

$$I = 7.4358 \times 10^{-7} \text{ m}^4$$

Donde :

$$y = - \frac{FL^3}{48 EI} = - \frac{(25092.7)(0.40)^3 (1000)}{48 (207 \times 10^9) (7.4358 \times 10^{-7})}$$

$$y = -0.217 \text{ mm.}$$

Así que las placas soportarían una carga de 50 KN, teniendo una deflexión máxima de 0.217 mm. Pero como la capacidad máxima de la máquina es de 23 KN, las placas estarían trabajando con dicha carga (23 KN) al 46% de su capacidad y lo cual nos demuestra que no fallarán durante las pruebas y que con esta carga, sólo tendrán una deflexión de 0.099 mm.

a). Uniones Soldadas :

Tomando en cuenta que las uniones de los elementos que conforma la estructura son por medio de soldadura por arco eléctrico, hay que considerar como secciones de soldadura sometida a esfuerzos críticos, aquella que une a las placas de apoyo (de la placa principal) con las columnas.

Así, el área de la sección de la garganta sometida a cortante, es igual a la longitud "L" del cordón por el espesor de la garganta (Figura 15) .

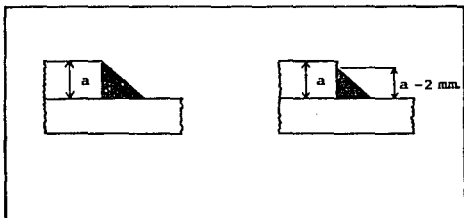


FIGURA 15. Ancho de la Base del Cordón.

Donde :

$$A = (L) (a) (\text{Sen } 45^{\circ}) = 0.707 L \cdot a \text{ mm}^2 \quad (22)$$

Los esfuerzos permitidos por el reglamento AISC (AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION), así como el código AWS (AMERICAN WELDING SOCIETY) para un cordón de soldadura de tipo a tope o de filete sometida a cortante es⁽¹⁾

$$\tau = 0.40 S_y \text{ (Pa)} \quad (23)$$

(1) Shigley, Joseph y Mitchell Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica ... p. 456

Donde :

τ = Esfuerzo cortante máximo. (Pa)

S_y = Resistencia a la fluencia. (Pa)

Por lo que la AISC y la AWS establece para un electrodo E6013⁽¹⁾ (utilizado en las uniones soldadas).

$S_y = 380 \text{ M Pa.}$

Sustituyendo valores en la ecuación (23)

$$\tau = 0.40 (380 \times 10^6)$$

$$\tau = 152 \text{ M Pa}$$

Considerando :

$$\tau = \frac{P}{A} \text{ (Pa)} \quad (24)$$

Despejando la carga P :

$$P = \tau A \text{ (N)} \quad (25)$$

Sustituyendo la ecuación (22) en la ecuación (25)

$$P = \tau (0.707 L.a \times 10^{-6}) \text{ (N)} \quad (26)$$

Si la fuerza admisible q por milímetro de longitud soldada es :

(1) American Welding Society, Inc. Specification for Covered Carbon Steel Arc Welding Electrodes p. 4.

$$q = \frac{P}{L} \frac{(N)}{(mm)} \quad (27)$$

Sustituyendo la ecuación (26) en la ecuación (27)

$$q = \tau (0.707 \cdot a \times 10^{-6}) \frac{(N)}{(mm)} \quad (28)$$

Si en las uniones soldadas de las placas de apoyo con las columnas, el espesor de las placas es de 12.7 mm. (1/2 Pulgada), por lo tanto, el ancho de las bases "a" (Figura 15), será :

$$a = e - 2 \text{ mm.} = 12.7 - 2$$

$$a = 10.7 \text{ mm.}$$

Sustituyendo el valor del ancho de las bases "a" en la ecuación (28) y el valor del esfuerzo cortante para el electrodo usado :

$$q = \tau (0.707) (a) \times 10^{-6} = (152 \times 10^6) (0.707) (10.7) \times 10^{-6}$$

$$q = 1149.9 \text{ N/mm.}$$

Aún cuando se soldó por los cuatro costados del perfil rectangular y del perfil estructural "C" hay que considerar sólo dos costados como unión a traslape, ya que los otros dos fueron rebajados para dar mejor apariencia a las uniones; además, tomando en cuenta el perfil de menor área soldada que en este caso es el perfil estructural con un ancho de 51 mm. (2 pulgadas) y una altura de la placa de apoyo de 88.9 mm.

$$L = 4 (88.9) + 4 (51)$$

$$L = 559.6 \text{ mm.}$$

Por lo tanto, la carga total a soportar por las cuatro uniones soldadas a las columnas sometidas a esfuerzos cortantes de las dos placas de apoyo se obtendrá, sustituyendo en la ecuación (27) :

$$q = \frac{P}{L} \left(\frac{N}{\text{mm}} \right)$$

Despejando la carga a soportar :

$$P = qL (N)$$

Sustituyendo valores :

$$P = (1149.9) (559.6)$$

$$P = \underline{643484. N.}$$

Por lo tanto, la carga máxima que soportarían las placas de apoyo, antes de sufrir deformación plástica es de 50 KN, mientras que las uniones soldadas resistirán 643 KN. Así que con la carga máxima de la máquina (23 KN), las uniones soldadas están trabajando al 3.57% de su capacidad.

3.- DISPOSITIVO DE CARGA.

En el dispositivo de carga, habría que cumplir con :

- * Diseño sencillo.
- * Un sistema de carga.
- * Alineación axial de la carga en la probeta.
- * Evitar cargas de choque o repentinas.
- * Evitar la aplicación de torque a la probeta.
- * Brazo de palanca regulable.

Además, de tener en cuenta material y equipo disponible.

El diseño del dispositivo de carga, está compuesto de elementos, como se puede observar en la Figura 16.

a. Brazo de Palanca Regulable.

El sistema de carga fue desarrollado en base a un sólo brazo de palanca (Figura 9b), el cual permitirá aplicar grandes cargas a tensión a la probeta.

El brazo de palanca fue construido de un perfil estructural "I" normal (S100 X 11), el cual cuenta con una articulación en el extremo, que es posible por un perno principal, como se muestra en la Figura 18.

Cumpliendo con el principio de tener un brazo de palanca regulable, la relación de radios con respecto del apoyo articulado (perno principal), puede ir de 2:1 hasta 9:1.

Pudiendo ser posible esto con el diseño de una trole, la cual soporta la canastilla de pesos y por medio de una cinta métrica adherida al perfil, permite colocar la carga en el brazo de palanca deseado (o radio deseado).

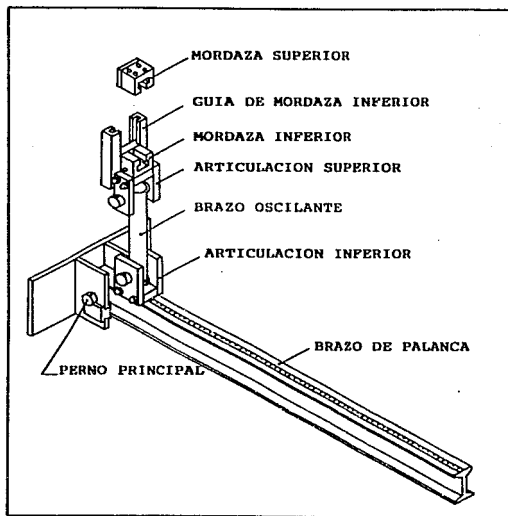


FIGURA 16. Dispositivo de Carga.

1). Cálculos.

Cuando el brazo de palanca es sometido a las condiciones más críticas de carga (relación de radios

de 9:1), está trabajando como una viga simplemente apoyada con carga en el extremo voladizo, por lo que es conveniente saber qué carga máxima soporta en dicho extremo voladizo. En base al dimensionamiento del brazo de palanca construimos los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante, como se muestra en la Figura 17.

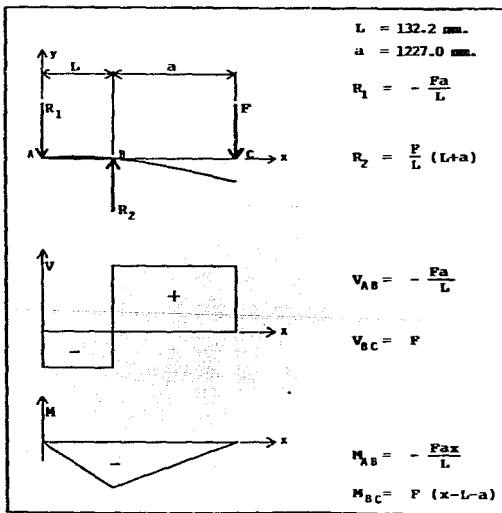


FIGURA 17. Fuerza Cortante y Momento Flexionante de una viga simplemente apoyada con carga en el extremo voladizo.

El momento flexionante máximo lo tenemos en el segmento BC.

$$M_{\max} = F_a \cdot (N \cdot m) \quad (29)$$

Sustituyendo la ecuación (29), en la ecuación (5) del esfuerzo flexionante máximo.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{S} \quad (\text{Pa})$$

Para un perfil estructural "I" normal, S100 X 11⁽¹⁾:

$$S = 49.4 \times 10^3 \text{ mm}^3 = 4.94 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\sigma_{\max} = 150 \text{ MPa}$$

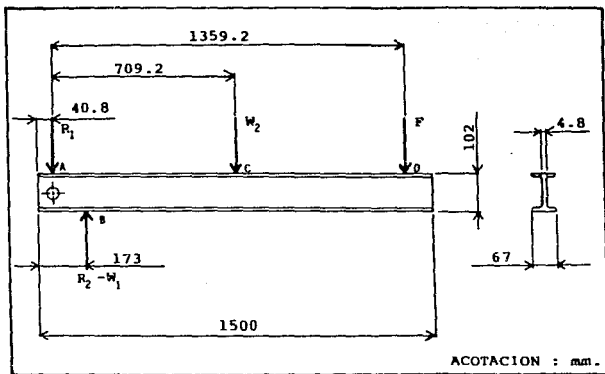


FIGURA 18. Brazo de Palanca.

(1) Singer, Ferdinand y Pitel, Andrew. Resistencia de Materiales... pp. 527, 536-537.

Despejando la máxima fuerza permisible de la ecuación (5), al sustituir el valor del momento flexionante máximo, el módulo elástico de sección y el esfuerzo máximo permisible :

$$\sigma_{\max} = \frac{F a}{S} \quad (\text{Pa})$$

$$F = \frac{\sigma_{\max} S}{a} \quad (\text{N})$$

$$F = \frac{(150 \times 10^6) (4.94 \times 10^5)}{1.227}$$

$$F = \underline{6039.12 \text{ N.}}$$

Aún cuando el perfil estructural "I", utilizado como brazo de palanca en su condición más crítica (relación de radios de 9:1), soportaría una carga en su radio mayor de 6.0 kN, la cual transmitirá a la probeta una carga R_2 (ver Figura 19).

Resolviendo el sistema, para determinar R_2 :

$$\sum M_A = 0$$

$$F (1.3592) + W_2 (0.7092) - (R_2 - W_1) (0.1322) = 0$$

$$R_2 = \frac{F (1.3592) + W_2 (0.7092)}{0.1322} + W_1$$

Donde :

$$W_1 = 18.55 \text{ Kg} = 181.975 \text{ N.}$$

$$W_2 = 17.5 \text{ Kg} = 171.675 \text{ N.}$$

Sustituyendo :

$$R_2 = \underline{63193.502 \text{ N.}}$$

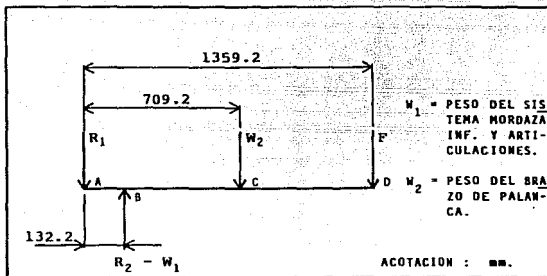


FIGURA 19. Diagrama del Cuerpo Libre del Brazo de Palanca.

Como se determinó, la carga máxima a soportar por la placa principal es de 23 KN., la máxima carga en el extremo del radio mayor a colocar en base a la placa principal sera :

$$R_2 = 23279.8 \text{ N.}$$

$$F = \frac{-W_2 (0.7092) + (R_2 - W_1) (0.1322)}{1.3592}$$

$$F = 2156.989 \text{ N} \approx 2 \text{ KN}$$

Con la carga de 2 KN., en el extremo del radio mayor (1.227 m), el perfil estructural "I" está trabajando al 35.71% de su capacidad máxima.

b. Perno Principal.

Como ya se mencionó anteriormente, el perno principal es el elemento de unión entre la estructura de la máquina y el brazo de palanca, trabajando con este último como articulación (Figura 18).

Debido a las grandes cargas que deberá soportar el perno principal (Figura 20), y a los esfuerzos cortantes a que es sometido, se seleccionó un acero AISI 9840.

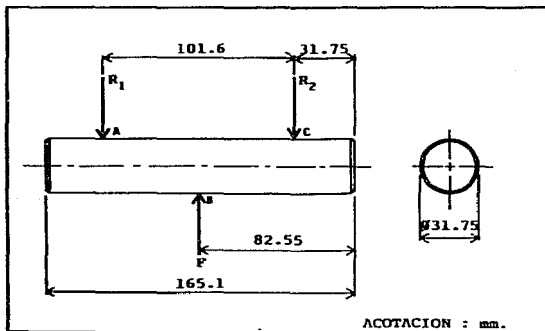


FIGURA 20. Perno Principal.

ACERO AISI 9840

Composición Química

C	:	0.38 - 0.43
Mn	:	0.70 - 0.90
P max	:	0.040
S max	:	0.040
Si	:	0.20 - 0.35
Ni	:	0.85 - 1.15
Cr	:	0.70 - 0.90
Mo	:	0.20 - 0.30

1). Tratamiento Térmico.

El tratamiento térmico del perno principal del acero AISI 9840, se realizó en base al siguiente procedimiento elaborado por el DR. FRANCISCO ESPARZA H., Figura 21.

1. Relevado de Esfuerzos..... 300 °C durante 120 minutos.
2. Precalentamiento.... 675 °C durante 30 minutos.
3. Austenitizado..... 870 °C durante 75 minutos.
4. Temple Al aceite.
5. Revenido..... 150 °C durante 30 minutos.
Dureza Obtenida : 52 Rc.

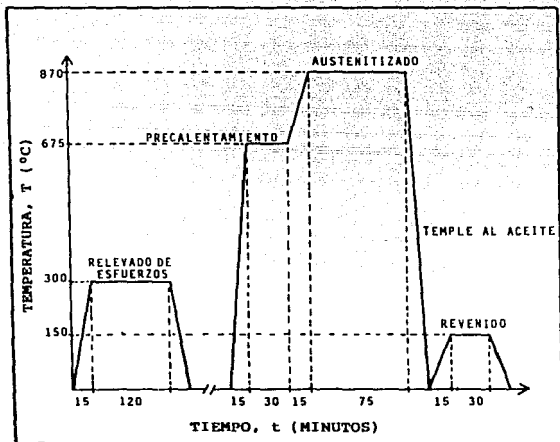


FIGURA 21. Procedimiento para el Tratamiento Térmico del Perno Principal hecho de Acero AISI 9840.

2). Cálculos.

Para calcular la carga máxima que resiste el perno principal, hay que considerar que está siendo sometido a esfuerzos cortantes debido a la carga constante (R_1) transmitida por el brazo de palanca como se muestra en la Figura 19.

En base a lo anterior y debido a que la carga cortante (R_1) está al centro del perno principal, se establece que está trabajando como una viga con carga al centro y con doble apoyo; por lo que, para efectos de cálculos, consideraremos el diagrama mostrado en la Figura 13.

Por lo tanto, para el perno principal de acero AISI 9840 ⁽¹⁾:

$$S_y = 1371.11 \text{ M Pa.}$$

En base al esfuerzo máximo permisible para una carga a cortante constante :

$$\tau_{pc} = \frac{S_y}{1.5} \text{ (Pa)}$$

Por lo tanto, para el perno principal :

$$\tau_{pc} = 914 \text{ M Pa.}$$

$$L = 0.1016 \text{ m.}$$

$$\phi = 0.03175 \text{ m.}$$

El módulo elástico de resistencia (S), de una sección transversal circular llena es :

$$S = \frac{\pi^2 \phi^3}{32} \quad (\text{m}^3) \quad (30)$$

(1) Shigley, Joseph y Mitchell, Larry. Diseño en Ingeniería Mecánica p. 867.

Como se mencionó que se trata de una viga con doble apoyo y carga al centro (Figura 13), el momento flexionante será el de la ecuación (7).

$$M_{\max} = \frac{FL}{4} \quad (\text{N.m})$$

Considerando la ecuación (5), para la flexión en vigas :

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{S} \quad (\text{Pa})$$

Sustituyendo en la ecuación (5), las ecuaciones (7) y (30) :

$$\sigma_{\max} = \frac{32FL}{4\pi b^3} \quad (\text{Pa}) \quad (31)$$

Despejando la carga máxima (F) a soportar :

$$F = \frac{\sigma_{\max} \pi b^3}{8L} \quad (\text{N}) \quad (32)$$

Sustituyendo valores en la ecuación (32) :

$$F_{\max} = \frac{(914 \times 10^6) (\pi) (0.03175)^3}{8 (0.1016)}$$

$$F_{\max} = \underline{113069.003} \text{ N} \approx \underline{113} \text{ KN.}$$

La fuerza máxima a soportar por el perno principal es de 113 KN., resolviendo el sistema mostrado en

la Figura 19, teniendo en cuenta que el valor de la carga en el extremo del brazo de palanca está restringido a 2007.634 N, debido a la placa principal. Para obtener el valor de R_1 que sería la carga máxima transmitida al perno :

$$\sum M_A = 0$$

$$F (1.3592) + W_2 (0.7092) - (R_2 - W_1) (0.1322) = 0$$

$$R_2 = \frac{F (1.3592) + W_2 (0.7092)}{0.1322} + W_1$$

Donde :

$$F = 2007.634 \text{ N.}$$

$$W_1 = 181.9755 \text{ N.}$$

$$W_2 = 171.675 \text{ N.}$$

Sustituyendo :

$$R_2 = 21744.214 \text{ N.}$$

Resolviendo para obtener R_1 :

$$\sum F_y = 0$$

$$- R_1 + R_2 - W_2 - W_1 - F = 0$$

$$R_1 = R_2 - W_2 - W_1 - F$$

Sustituyendo valores :

$$R_1 = \underline{19382.930 \text{ N.}} \approx \underline{19 \text{ KN.}}$$

Por lo anterior la máxima carga transmitida al perno principal es de 19 KN., cuando éste puede soportar 113 KN., por lo cual, en su condición más crítica estará trabajando al 17.14% de su capacidad.

c. Sistema de Transmisión de Carga a la Probeta.

El sistema de transmisión de carga, está formado por dos articulaciones, un brazo oscilante, mordaza inferior y mordaza superior.

1). Articulaciones.

Las articulaciones están formadas cada una de tres elementos y un perno.

Los tres elementos están hechos de placa rolada de 19 mm. (porta pernos) y de 25.4 mm. (sujetadores del brazo de palanca y mordaza inferior), de espesor. Estando unidos entre sí por tornillos para poder realizar mantenimientos posteriores.

Los pernos han sido maquinados de acero AISI 9840, ya que éstos deberán soportar la misma carga de la probeta, pero a cortante. Figura 22.

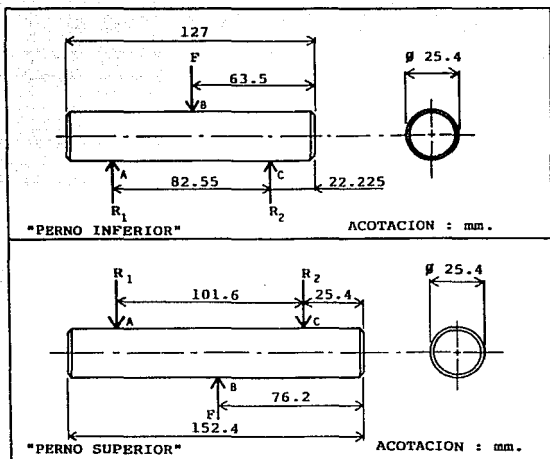


FIGURA 22. Perno Superior e Inferior.

a). Tratamiento Térmico.

El tratamiento térmico para ambos pernos, es básicamente el mismo que para el utilizado en el perno principal. La variación está en la reducción del tiempo de austenitizado.

1. Relevado de
Esfuerzos 600 °C durante 30 minutos.
2. Pre calentamiento 675 °C durante 30 minutos.

3. Austenitizado 870 °C durante 60 minutos.
4. Temple Al aceite.
5. Revenido 150 °C durante 30 minutos.

Dureza obtenida : 52 Rc.

b). cálculos.

Tomando en cuenta que los pernos están trabajando en las mismas condiciones que el perno principal, además de ser del mismo material y la misma sección transversal ambos pernos, la ecuación para la flexión en los pernos será la ecuación (32).

$$F = \frac{\sigma_{\text{MAX}} \pi \vartheta^3}{8L} (N)$$

Donde :

$$\sigma_{\text{pc}} = 914 \text{ M Pa.}$$

- Para el perno inferior :

$$\vartheta = 0.0254 \text{ m.}$$

$$L = 0.08255 \text{ m.}$$

Sustituyendo en la ecuación (32) :

$$F = \frac{(914 \times 10^6) (\pi) (0.0254)^3}{8 (0.08255)}$$

$$F = \underline{71250.867} \text{ N.}$$

- Para el perno superior :

$$\beta = 0.0254 \text{ m.}$$

$$L = 0.1016 \text{ m.}$$

Sustituyendo en la ecuación (32) :

$$F = \frac{(914 \times 10^6) (\pi) (0.0254)^3}{8 (0.1016)}$$

$$F = \underline{57891.329 \text{ N.}}$$

Teniendo en cuenta que la capacidad máxima de carga en la probeta (R_2), está determinada por la capacidad máxima en la placa principal.

$$R_2 = 23279.8 \text{ N.}$$

Por lo tanto :

- * El perno superior está trabajando al 32.67% de su capacidad.
- * El perno inferior está trabajando al 40.21% de su capacidad.

2). Brazo Oscilante.

El brazo oscilante, es el elemento de unión entre las dos articulaciones mencionadas anteriormente.

Su longitud (0.33 m.), está determinada en relación al perno principal, articulaciones, mordazas, horno y al tamaño de la probeta; está hecho de acero 1018, con un diámetro de 50.8 mm., (2 pulgadas).

Por medio de el brazo oscilante, las dos articulaciones, el posicionador y las guías de la mordaza se mantiene la axialidad de la carga en la probeta a medida que ésta se elonga. Esto es, a medida que el brazo de palanca gira con respecto al perno principal.

Así, conforme se elonga la probeta el brazo oscilante absorbe la pequeña desviación de la carga producida por el brazo de palanca.

3). Mordazas.

Existen muchos métodos diferentes de sujeción de probetas para pruebas de termofluencia. Ya que la principal finalidad de las mordazas es transmitir la carga a la probeta lo más axialmente posible.

El sistema de sujeción roscado es de los más comunes; sin embargo, el roscado debe ser muy preciso para no transmitir deformación por flexión a la probeta, además cuando es hecha una prueba de termofluencia-ruptura o esfuerzo-ruptura es muy difícil de separar la probeta de la sujeción roscada.

El diseño de las mordazas debería de ser sencillo y cumplir con :

- * Maquinado sencillo.
- * Maquinado sencillo de la sección de unión de la probeta.
- * Fácil montaje y desmontaje de la probeta.
- * Garantizar perfecta sujeción a la probeta.
- * Garantizar la axialidad de la carga a la probeta.
- * Soportar las cargas aplicadas.

Por todo lo anterior, las mordazas fueron diseñadas como se muestra en la Figura 23.

A las mordazas se les incorporó una tapa en uno de los extremos, permitiendo con esto el centramiento de la probeta automáticamente al ser colocada al fondo la probeta, esto se observa en la Figura 24.

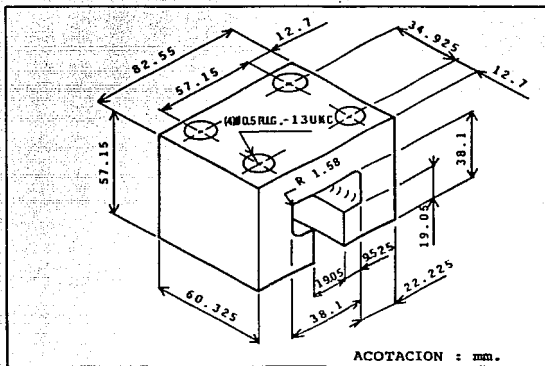


FIGURA 23. Diseño de las Mordazas.

a). Selección del Material y Tratamiento Térmico.

Para obtener la mayor resistencia de las mordazas, éstas se maquinaron de un acero AISI 9840 y el tratamiento térmico fue el mismo que para el perno principal.

b). Alineación de las Mordazas.

Las mordazas se alinearon una con respecto de la otra,

y éstas con respecto al centro de carga de la estructura.

- Mordaza Superior.

La mordaza superior obtiene su alineamiento al ser fijada a la placa superior de la estructura por medio de cuatro tornillos.

- Mordaza Inferior.

La mordaza inferior obtiene su alineamiento al incorporarle como tapa en su extremo el posicionador, el cual se desliza sobre las guías de la mordaza que se encuentran soldadas a la estructura de la máquina.

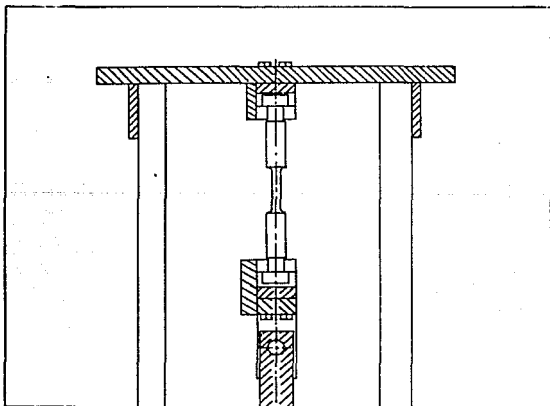


FIGURA 24. Sección de Corte de las Mordazas, Mostrando la Alineación de la Probeta.

4). Posicionador de la Mordaza.

El posicionador de la mordaza se encuentra unido a la mordaza inferior en uno de sus extremos. Este se desliza en sus extremos a través de las guías de las mordazas, evitando torques y permitiendo mantener la carga axialmente a la probeta conforme ésta se elonga.

Además, como las superficies de sus tres caras de los extremos fueron rectificadas, al igual que los canales de las guías de la mordaza, permiten evitar cargas de choque o repentinas, ya que las superficies en contacto, además de estar rectificadas, se encuentran bien lubricadas, permitiendo un deslizamiento libre.

El posicionador y las guías de mordaza están hechas de placa comercial (AISI 1018), debido a que dichos elementos no son sometidos a ninguna carga, sólo son guías para evitar los movimientos en las direcciones perpendiculares al eje de la carga.

Las guías de la mordaza están soldadas a la estructura de la máquina, dando mayor estabilidad al sistema de carga.

d. Trole y Canastilla de Pesos.

Partiendo del principio de tener un brazo de palanca regulable, se diseñó una trole similar a las existentes en el mercado, pero con la peculiaridad de tener :

- * Un volante unido a una flecha, sobre la cual está montada una rueda de hule maciso, que permita mover la trole en la dirección requerida.
- * Un sistema de fijación al brazo de palanca, compuesto por dos gomas que están unidas a dos manerales roscados en los lados de la trole, que, al apretarlos mantienen la trole en la posición deseada durante toda la prueba.
- * Un indicador, que junto con la cinta métrica adherida al brazo de palanca, permiten colocar rápidamente los pesos (trole y canastilla) en el brazo de palanca seleccionado para la prueba (variación de radios).

Al no contar con un conjunto de pesas comerciales, perfectamente calibradas a diferentes pesos, se diseñó una canastilla, la cual contendría los pesos, no importando su forma.

La canastilla está unida a la trole por un perno que se introduce en dos cilindros huecos que se encuentran soldados al centro de la canastilla, logrando con ello que el eje central de la canastilla sea el mismo que el de la trole.

e. Soporte para el Brazo de Palanca.

Debido a las pruebas de termofluencia-ruptura y esfuerzo-ruptura, la prueba es corrida hasta la fractura de la probeta, por lo cual en el momento de la fractura el brazo de palanca con los pesos en su extremo, por la fuerza de gravedad y al haber perdido su elemento de sujeción (probeta), gira por medio del perno principal (apoyo articulado), hasta que la canastilla llega al piso. El golpe que pudiera recibir la canastilla, afectaría muchos de los elementos de la máquina, desde un dobles hasta una fractura.

Teniendo en cuenta esta situación, se diseñó y construyó un soporte con perfil PTR y ángulo con diferentes alturas de apoyo, de tal manera que, al caer el brazo de palanca en el apoyo, la canastilla no toque el piso.

El soporte se muestra en la Figura 25.

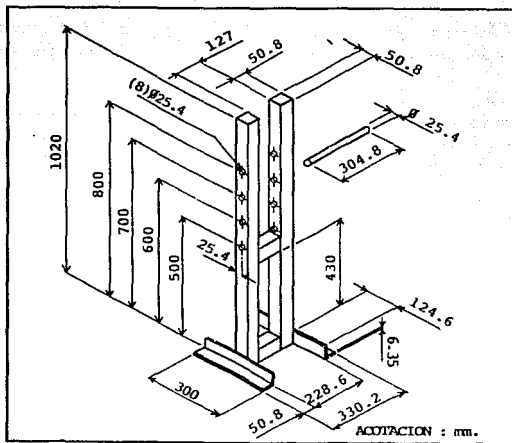


FIGURA 25. Soporte para el Brazo de Palanca.

4. HORNO DE CALENTAMIENTO.

El horno diseñado para la máquina de termofluencia es de forma tubular (Figura 26), con dos resistencias eléctricas en forma de espiral, que calientan la probeta de prueba, por medio de radiación en una atmósfera de aire.

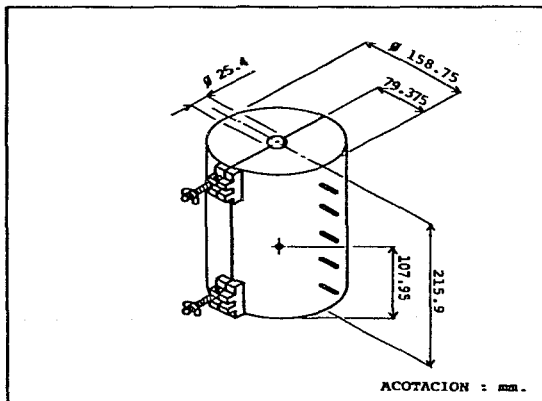


FIGURA 26. Horno de Calentamiento.

Las resistencias fueron hechas con alambre kantál A-1 (aleación a base de Cr, Al, Fe) calibre 16 (1.290 mm.) y con un diámetro interior en las espiras de 9.52 mm. (0.375 pulgadas).

ALAMBRE KANTAL A-1

Temperatura Máxima de utilización en servicio continuo	1375 °C
Punto de Fusión	1510 °C

Para lograr una uniformidad en el calentamiento, cada resistencia fue dividida en tres secciones con igual número de espiras. Las secciones de la resistencia fueron colocadas verticalmente (Figura 27 (a)), a cada 60° (Figura 27 (b)), en un diámetro de 50.8 mm. (2 pulgadas).

La estructura del horno está formada por una sección de un tubo de acero, dividido en dos partes verticalmente; a cada parte se le soldaron dos tapas en sus extremos, las cuales tienen maquinado un medio círculo de 25.4 mm. (1.00 pulgadas).

A la pared del horno, por la parte interna, se soldaron pequeñas varillas de acero AISI 1018 de 4.76 mm. (0.1875 pulgadas) de diámetro por 25.4 mm. (1.000 pulgadas) de largo, en posiciones elegidas al azar. Estas varillas trabajarían como anclaje para el material aislante del horno.

El material aislante, además de cumplir con su función específica, debería de sostener las resistencias fijamente por

lo cual, se utilizó un material termocerámico llamado cemento moldeable kaowool, logrando :

- * Evitar almacenamiento de calor, como ocurre en las paredes de ladrillo refractario.
- * Elevar a la temperatura máxima del horno en un tiempo muy corto.
- * Un enfriamiento en un tiempo reducido.
- * Resistencia excelente al choque térmico.
- * Una disipación de calor extraordinariamente reducida.

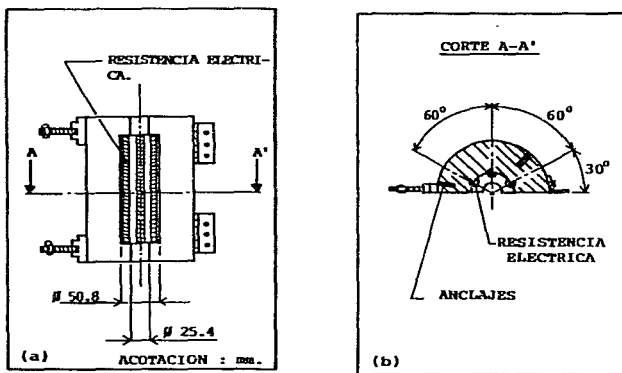


FIGURA 27. (a) Vista Frontal de la Mitad del Horno.

(b) Sección de Corte AA' de (a).

Las características del material termocerámico son :

CEMENTO MOLDEABLE KAOWOOL.

- Apariencia	Blanca
- Temperatura Máxima en uso continuo.....	1260°C
- Temperatura de Fusión	1760°C
- Resistencia a la Compresión, después de secado.....	44.8 M Pa

Las resistencias fueron enbebidas hasta la mitad de su diámetro en el cemento moldeable kaowool y posteriormente, para lograr una buena apariencia, además de un buen sellado al cerrar el horno, se le aplicó una pequeña capa de cemento fiberflax tipo QF-180, también de fibra cerámica.

CEMENTO FIBERFLAX QF-180

- Apariencia	Pintura Blanca
- Densidad	1922 Kg/m ³ .
- Temperatura máxima en uso continuo...	1260°C
- Temperatura de fusión.....	1760°C
- Composición Química	Al ₂ O ₂ - 37.2%
	SiO ₂ - 59.1%
	Na ₂ O - 0.7%

MgO	-	0.3%
Fe ₂ O ₃	-	0.7%
TiO ₂	-	1.4%
Trazas Inorgánicas	-	0.6%

Las dos partes de horno se encuentran unidas en uno de sus lados por bisagras y por el otro con unos tornillos con tuerca de mariposa, con lo que se puede abrir y cerrar el horno para colocar las probetas.

El horno queda fijado a la estructura de la máquina por medio de tornillos.

a. Control de Temperatura.

Para la medición de la temperatura, era necesario un transductor para convertir una diferencial de temperatura a una señal eléctrica, por lo cual se instaló en el horno un termopar que está anexo a la probeta en el centro del horno y éste está conectado a un controlador electrónico de temperatura marca ATTO, modelo CM12 y del tipo K (rango 50 - 1200°C).

El controlador electrónico de temperatura tiene las siguientes características :

- * Protección contra ruptura del termopar.
- * Trabaja con cualquier calibre y longitud de termopar.

- * No le afectan las vibraciones mecánicas.
- * Operación de trabajo continuo.
- * Control electrónico en estado sólido.
- * Entrada - Termopar.
- * Salida - Relevador 1P2T : 127/220 V
- * Contactos - 3 Amps. 127/220 VCA
Carga no inductiva.
- * Suministro - 127 ó 220 V.; 50/60 Hz.
- * Exactitud - Mejor que el 1%.
- * Peso aproximado - 550 grs.

Como se mencionó anteriormente, la necesidad de un relevador, se incorporó al circuito un contactor marca Telemecanique LC1-D253-A60, para 220-240 V y 60 Hz. Con una corriente máxima de trabajo de 40 Amp. y 7.5 Hp.

El circuito de conexión del horno se muestra en la Figura 28.

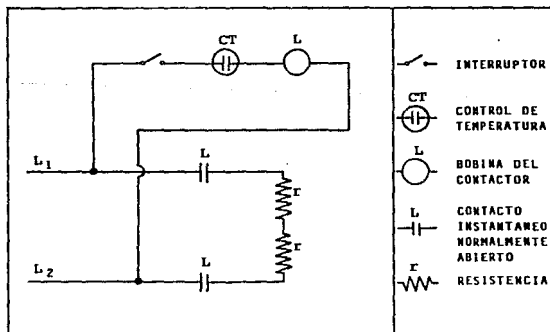


FIGURA 28. Circuito de Conexión del Horno.

El valor de las resistencias es :

$$R_1 = 7.5 \Omega$$

$$R_2 = 7.5 \Omega$$

Como se muestra en el circuito, las resistencias están conectadas en serie, por lo que :

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 7.5 + 7.5 (\Omega)$$

$$R_T = 15 \Omega$$

El circuito está conectado a un voltaje de 220 v C.A., por lo que la corriente en el circuito será de :

$$I = \frac{E}{R} \text{ (Amp)}$$

Donde :

$$E = 220 \text{ v C.A.}$$

$$R_T = 15 \Omega$$

Sustituyendo :

$$I = \frac{E}{R} = \frac{220}{15} \text{ (Amp)}$$

$$I = \underline{14.666 \text{ AMP}}$$

La carga del circuito será :

$$W = \frac{I^2}{R} \text{ (W)}$$

$$W = \frac{(220)^2}{15} \frac{(v)^2}{\Omega}$$

$$W = \underline{3225.666 \text{ W.}}$$

5. DISPOSITIVO INDICADOR DE LA ELONGACION.

El dispositivo indicador de la elongación está formado por una cremayera y tres engranes.

Teniendo la necesidad de saber cuánto se ha elongado la probeta en un determinado tiempo antes de la fractura, sin tener que detener la prueba, se diseñó un indicador de la elongación, de tal manera que, observando una carátula sabremos cuanto se ha elongado nuestra probeta antes de llegar a la fractura.

Para poder obtener la elongación de la probeta directamente, esto sólo es posible por medio de la mordaza inferior, así que, se sujetó una cremayera con un paso circular de 1.25 mm., a la parte trasera de la mordaza con unos tornillos. De tal manera que al elongarse la probeta, la mordaza inferior bajaría al igual que la cremayera (n_4) y ésta última haría girar un engrane con el mismo paso circular pero con 16 dientes (n_3) que se encuentra montado sobre un eje, el cual está apoyado en dos baleros que están soldados a las guías de la mordaza.

De uno de los extremos de la flecha del engrane n_3 , se colocó un acoplador para unir a este engrane con otro de 14 dientes (n_2), el cual transmite el giro a otro de 44 dientes (n_1), como se muestra en la figura 29.

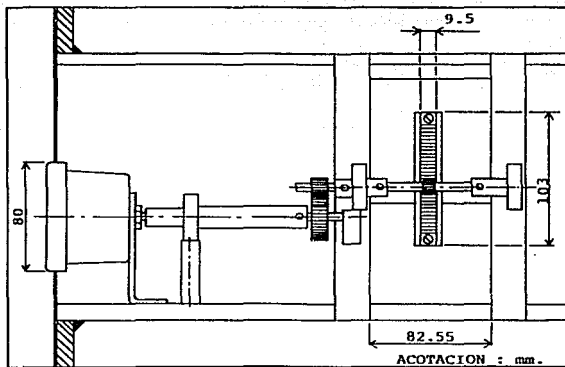


FIGURA 29. Dispositivo Indicador de la Elongación.

De tal manera que para poder graduar nuestra carátula se supuso que n_1 da una vuelta, esto es 360° , para poder saber cuántos grados marcaría nuestra aguja (eje de n_1), para una Elongación de 1 mm. en la probeta.

Calculando por la relación de transmisión :

$$n_1 \text{ RPM}_1 = n_2 \text{ RPM}_2 \quad (33)$$

$$n_1 / n_2 = \text{RPM}_2 / \text{RPM}_1$$

Sustituyendo valores, y considerando $\text{RPM}_1 = 1$:

$$44/14 = \text{RPM}_2 / 1$$

Despejando RPM_2 :

$$\text{RPM}_2 = 3.142857 \text{ vueltas.}$$

Como n_2 y n_3 están acopladas al mismo eje, entonces :

$$\text{RPM}_2 = \text{RPM}_3 = 3.142857 \text{ vueltas.}$$

Por lo que si n_3 gira 3.142857 vueltas, quiere decir que la mordaza inferior bajó :

$$(n_3)(\text{RPM}_3)(\text{paso circular}) = (16)(3.142857)(1.25) = 62.85714 \text{ mm.}$$

Así, nuestra carátula se gradúa en base a :

$$360^\circ = 62.85714 \text{ mm.}$$

$$1^\circ = 0.1746 \text{ mm.}$$

Lo cual quiere decir que si la probeta se elonga 1 mm., nuestra aguja girará 5.72727° .

6. GRAFICADOR PARA EL REGISTRO DE LA ELONGACION CON RESPECTO DEL TIEMPO.

Como un complemento en la información que se puede obtener directamente en el comportamiento de la probeta en la misma

máquina, es el poder observar y tener el registro gráfico del comportamiento del material sometido a condiciones de termofluencia, por lo cual, se diseñó un sistema sencillo de graficación que trabaja simultáneamente con la prueba.

El diseño, partió con la idea de tener un brazo, el cual en su extremo portara un marcador que solamente se apoyara en el papel, el cual avanzaría en razón del tiempo. Figura 30.

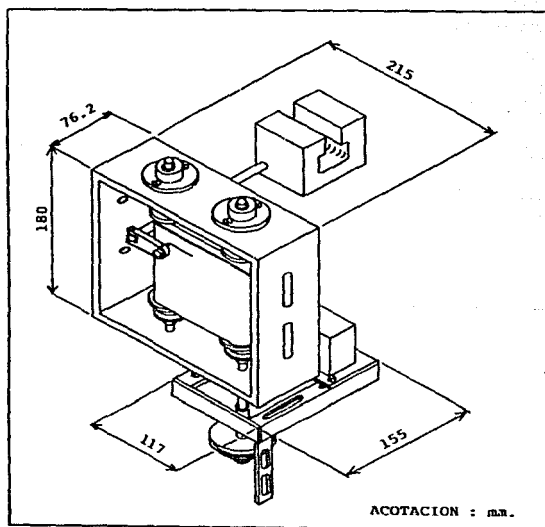


FIGURA 30. Graficador de la Elongación.

a. Brazo Portamarcador.

Por el diseño del sistema de transmisión de carga a la probeta, se identificó a la mordaza inferior como el elemento que al elongarse la probeta varía su posición inicial; así que al igual que con el dispositivo indicador de la elongación, la mordaza inferior será la que registre la elongación.

El brazo portamarcador, está conformado por una varilla de acero con cuerda en uno de sus extremos y en su otro extremo un portamarcador de aluminio que está articulado gracias a un perno, el cual mantendrá la presión del elemento marcador con el papel por medio de un pequeño resorte.

Así, en su conjunto, el brazo portamarcador se atornilla a la mordaza inferior, la cual al variar su posición registrará automáticamente la magnitud de su movimiento.

b. Rodillos Portapapel.

Una vez diseñado el brazo portamarcador, se diseñó el juego de rodillos que al girar el papel se enrollará de uno en el otro.

Los rodillos se hicieron con dos tubos de PVC, los cuales, por medio de unas tapas de aluminio en sus extremos, son fijados cada uno a un eje de acero, uno de los cuales es más largo, ya que por éste se transmitirá el movimiento.

Una vez montados los tubos en sus ejes, se maquinaron para poder tener una buena superficie y para hacer la superficie del tubo concentrica al eje de acero.

Para cada rodillo, se hicieron dos topes para asegurar que al enrollarse el papel, éste se vaya acomodando perfectamente.

c. Carcasa del Graficador.

La carcasa del graficador, debería de mantener a los rodillos verticalmente paralelos, uno con respecto del otro. Además, de mantener su posición fija con respecto a la estructura de la máquina, para que el brazo portamarcador se pudiera deslizar por uno de los rodillos.

La carcasa fue hecha de lamina de acero, en la cual se montaron cuatro portabaleros atornillados; los cuales, alojan a los baleros EE-352.

Los ejes de los rodillos se ajustaron a presión en los baleros, los cuales les permiten un giro libre, además de mantenerlos paralelos.

Una vez montados los rodillos en la carcasa, ésta se fijó a la estructura de la máquina por medio de tornillos y se le colocó una carátula de acrílico para su protección.

d. Generador del Movimiento para los Rodillos.

Teniendo en cuenta de que la deformación se grafica con respecto del tiempo, entonces, en el graficador el giro de lo rodillos tiene que ser en razón del tiempo.

Así, se incorporó el mecanismo de un reloj eléctrico, el cual se montó en una base hecha de ángulo y que permite su fijación a la estructura de la máquina, por medio de tornillos.

Al reloj se le adaptó una pequeña polea con un diámetro para la banda de : 9.52 mm. (0.375 pulgadas), hecha de Nylanid, en su eje que marca los minutos, de tal manera que, en una hora la polea da una vuelta.

De igual modo a uno de los ejes de los rodillos se le instaló una polea escalonada, hecha del mismo material que la del reloj (Nylanid), con unos diámetros para la banda de : 9.52, 19.05, 38.1, 47.62 y 57.15 mm. (0.375, 0.750, 1.5, 1.875 y 2.250 pulg.) Con la polea escalonada se puede reducir el número de vueltas de los rodillos con respecto a las del reloj.

A la polea escalonada, se le transmite el movimiento de la polea del reloj por medio de una banda para auto estéreo. Además, para evitar que el papel se apriete y no gire por la presión del marcador, se colocó otra banda de auto estéreo, más grande, entre los dos rodillos, con lo que el giro entre los dos se mantiene uniforme.

POLEA ESCALONADA

Díámetro	Vueltas	Tiempo
9.52 mm. (0.375")	1	1 Hrs.
19.05 mm. (0.750")	1	2 Hrs.
38.1 mm. (1.5")	1	4 Hrs.
47.62 mm. (1.875")	1	5 Hrs.
57.15 mm. (2.250")	1	6 Hrs.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

1. PREPARACION DE LAS PROBETAS.

El diseño de las probetas a utilizar se desarrolló en base a :

- * Diseño de las Mordazas.
- * Distancia entre Mordazas.
- * Tamaño del Horno.
- * Especificaciones de la A.S.T.M. (norma E-8 y E-8M).

El maquinado de las probetas debe cumplir con lo especificado en el Capítulo I sobre Probetas para Pruebas de Termofluencia y Esfuerzo-Ruptura.

El dimensionamiento de la probeta se estableció en razón de los puntos anteriormente mencionados.

1.- LONGITUD DE LAS PROBETAS.

La longitud de las probetas fue determinada en razón del dimensionamiento de la estructura de la máquina, el dispositivo de carga y el horno (Figura 32).

Sin embargo, si se quiere variar la longitud de las probetas de la Figura 32, esto puede ser posible, integrando al equipo unas extensiones de las mordazas. Incluso, si se desea realizar la prueba simultáneamente a dos probetas, esto es posible con la incorporación de las extensiones de las mordazas y un acoplador

intermedio entre las dos probetas, como se muestra en la Figura 31. En el caso de una prueba simultánea a dos probetas, sólo es posible realizar pruebas de esfuerzo-ruptura, ya que el sistema indicador y graficador de la elongación no se tomarán en cuenta.

2.- SECCION DE SUJECION.

En base al dimensionamiento de las mordazas, se estableció la sección de sujeción de las probetas (Figura 32). Dicho sistema de sujeción ya fue comentado en lo referente al diseño de las mordazas. Pero el sistema de sujeción puede variar, si se desea, incorporando al diseño unas extensiones para las mordazas (Figura 31).

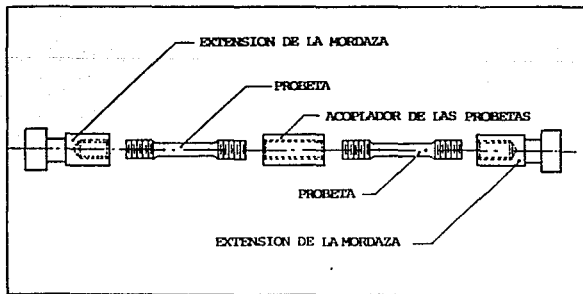


FIGURA 31. Prueba Simultánea a Dos Probetas.

3.- SECCION REDUCIDA DE LA PROBETA.

La sección reducida de la probeta (Figura 32), está determinada por la especificación de la probeta de tensión estándar de sección circular de la A.S.T.M., (norma E-8 y E-8M), ilustrada en la Figura 8c. De tal manera que, cumpliendo con las especificaciones, esto es, con las diferentes probetas proporcionales a la estándar (Figura 8c), es posible la realización de una prueba simultánea a dos probetas como se mencionó en el punto 1.

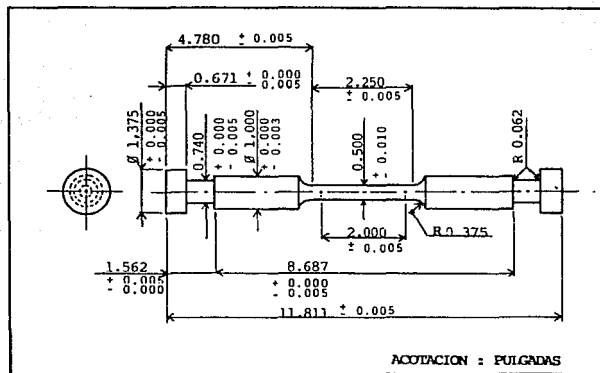


FIGURA 32. Probeta para pruebas de Termofluencia y Esfuerzo-Ruptura, para la Máquina en Cuestión.

2. CONDICION GENERAL DE CARGA DE LA MAQUINA.

Teniendo en cuenta que en la máquina existen elementos fijos como el sistema de carga, el cual interviene por su peso en el valor de la carga aplicada a la probeta, y en razón a que el radio de palanca es variable, es conveniente establecer la ecuación general de carga de la máquina.

Considerando el diagrama de cuerpo libre del brazo de palanca (Figura 19), con la variante de que la distancia desde el perno principal a la aplicación de la carga F (brazo o radio de palanca regulable) será L.

Donde los límites de L serán :

$$0.191 \text{ m} \leq L \leq 1.3592 \text{ m.}$$

Por cuestiones de diseño.

En base al diagrama de la Figura 19.

$$R_2 = \frac{(F)(L) + W_2(0.7092) + W_1}{0.1322} \quad (N) \quad (34)$$

Donde :

R_2 = Carga en la probeta. (N)

F = Carga a una distancia L. (N)

L = Distancia variable de 0.191 m. a 1.3592 m.

W_1 = Peso del sistema de la mordaza inferior
(18.55 Kg_f = 181.9755 N)

W_2 = Peso del brazo de palanca (17.5 Kg_f = 171.675 N)

Considerando que la trole y la canastilla son elementos fijos de la máquina, su peso afecta el valor de F, por lo que :

$$F : \text{Peso de la Trole} + \text{Peso de la Canastilla} + P$$

Donde :

$$\text{Peso de la Trole} = 7.9 \text{ Kg}_f = 77.499 \text{ N.}$$

$$\text{Peso de la Canastilla} = 48.4 \text{ Kg}_f = 474.804 \text{ N.}$$

$$P = \text{Pesos aplicados en la canastilla.}$$

Sustituyendo valores en la ecuación (34), se establece la ecuación general para la carga en la probeta con brazo o radio de palanca variable :

$$R_2 = \frac{(77.499 + 474.804 + P) (L) + (171.675) (0.7092)}{0.1322} + 181.9755$$

$$R_2 = \frac{(552.303 + P) (L) + 121.752}{0.1322} + 181.975 \quad (\text{N}) \quad (35)$$

3. PRUEBAS.

Las pruebas de termofluencia y esfuerzo-ruptura, son utilizadas para obtener mediciones de la habilidad de un material cargado o bajo un esfuerzo para deformaciones limitadas en un período de tiempo prolongado. Por lo cual, una vez diseñada y construida la máquina para pruebas de termofluencia y esfuerzo-ruptura a la tensión, se realizaron pruebas para permitir observar el funcionamiento y comportamiento de la misma.

1.- PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO.

Con esta primer prueba, se observó el comportamiento y funcionamiento de los diferentes sistemas que conforman la máquina, por lo que, no puede tomarse como un estudio del material.

Durante la prueba se variaron las temperaturas para observar el comportamiento y funcionamiento del horno y del controlador de temperatura.

Se observó el comportamiento del indicador y graficador de la elongación, además del sistema de carga.

La probeta utilizada fue hecha de una aleación de Aluminio 6061-T6 y maquinada en base a las dimensiones mostradas en la Figura 32, observándose físicamente en la Figura 33.

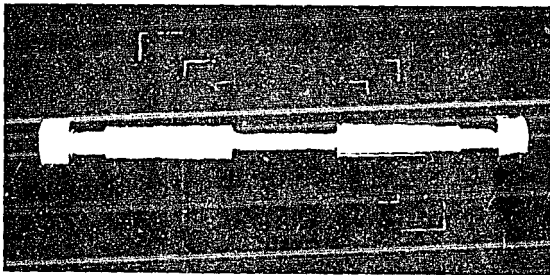


FIGURA 33. Fotografía tomada a la Probeta para la Máquina de Termofluencia, en base a dimensiones de la Figura 32.

ALEACION 6061

COMPOSICION QUIMICA

* Si	0.4 - 0.8%
Fe	0.7%
Cu	0.15 - 0.40%
Mn	0.15%
* Mg	0.8 - 1.2%
Cr	0.04 - 0.35%
Zn	0.25%
Ti	0.15%
Al	Balance

* Aleación : Aluminio-Silicio-Magnesio.

TEMPLE DE LA ALEACION 6061

TRATAMIENTO TERMICO	TEMPERATURA	TIEMPO HORAS	DESIGNACION
Recocido	412 °C (775 °F)	2-3	-0
Solución	521 °C (970 °F)		-T4
Precipitación	160 °C (320 °F)	16-20	-T6
	175 °C (350 °F)	6-10	

PROPIEDADES DE LA ALEACION 6061-T6

TEMPERATURA	RESISTENCIA TENSIL MPa	RESISTENCIA A LA CEDENCIA MPa	ELONGACION %
24 °C (75°F)	310.0	275.6	17
150 °C (300°F)	234.2	213.5	20
205 °C (400°F)	130.9	103.3	28
260 °C (500°F)	51.6	34.4	60
315 °C (600°F)	31.0	17.2	85
370 °C (700°F)	24.1	13.7	95

La prueba fue realizada bajo las siguientes condiciones :

- * Diametro de la sección reducida de la probeta.

Diámetro mínimo = 0.4995" (12.6873 mm.)

- * Area de sección transversal de la probeta en la sección reducida.

$$A = \frac{\pi \beta^2}{4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A = 1.2642 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$

- * Longitud calibrada (G) de la sección reducida.

$$G = 2.00" \text{ (50.8 mm.)}$$

- * Brazo o radio de palanca utilizado.

$$L = 1.15 \text{ m.}$$

- * Carga aplicada en la canastilla.

$$P = 241.23 \text{ Kg.} = 2366.466 \text{ N.}$$

- * Carga aplicada a la probeta (R_2).

(En base a la ecuación (35)).

$$R_2 = \frac{(552.303 + P) \cdot L}{0.1322} + 181.975$$

$$R_2 = 26493.142 \text{ N.}$$

La carga se aplicó despació, por medio de un gato hidráulico, para evitar cargas repentinas, una vez que la probeta estaba estabilizada a la temperatura requerida.

- * Esfuerzo aplicado.

$$\bar{\sigma} = \frac{\text{Carga}}{\text{Area}} = \frac{26493.142}{1.2642 \times 10^{-4}} \text{ (Pa)}$$

$$\bar{\sigma} = 209.564 \text{ M Pa.}$$

- * Temperatura.

Comenzó a 150°C (302°F), finalizó a 550°C (1022°F)

Las lecturas fueron tomadas cada 28 ó 48 horas durante la prueba; sin embargo, se enlistan las deformaciones para las cuales las lecturas registraron cambios.

DEFORMACION (mm. / mm.)	TEMPERATURA (°C)	TIEMPO (Hrs.)
0.0019	150	0
0.0059	150	55
0.0118	150	223
0.0157	150	502
0.0157	250	578
0.0196	350	626
0.0275	450	650
0.0354	500	674
0.0393	550	674.66
0.15 (Fractura)	550	676.96

Resultados :

- * Diámetro menor en el cuello:

$$\text{Diámetro} = 0.310'' \text{ (7.874 mm.)}$$

- * Area de sección transversal en la sección de menor diámetro en el cuello:

$$A_2 = \frac{\pi d^2}{4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_2 = 4.8694 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

- * Reducción del área:

$$\text{Reducción del área} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100$$

Reducción del área = 61.48%

- * Longitud final entre las marcas calibradas.

$$L_f = 2.300'' (58.4 \text{ mm.})$$

- * Elongación.

$$\text{Elongación} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

Elongación = 15%

Durante la prueba de funcionamiento de la máquina, que duró 676.73 hrs., esto es 28 días, 4 horas y 58 minutos de tiempo continuo de funcionamiento, la máquina se comportó de acuerdo a lo esperado.

No se encontró ninguna falla durante la prueba, esto es :

a. Estructura de la Máquina :

La estructura de la máquina no sufrió ninguna deformación y su funcionamiento fue como se esperaba. El anclaje mantuvo a la máquina siempre fija al piso.

b. Sistema de Carga.

El sistema de carga que consta de :

- * El brazo de palanca.
- * El perno principal.
- * Sistema de transmisión de carga a la probeta

* Trole y canastilla.

* Soporte para el brazo de palanca.

No sufrieron ninguna deformación, como ya se tenía previsto. Su funcionamiento fue correcto.

- El posicionador de las mordazas evitó transmitir torque a la probeta e incluso, su deslizamiento en las guías fue perfecto.
- El brazo oscilante absorbió toda la desviación de la carga producida por el radio menor del brazo y junto con las articulaciones no se presentó pérdida de axialidad en la probeta.
- Las mordazas, además de mantener la axialidad, permitieron un montaje y desmontaje rápido de la probeta.
- La trole, como se había supuesto, con sus sistema de fijación al brazo, en el momento de la fractura, esto es, en el momento que el brazo se inclina más, mantuvo los pesos en la misma posición.
- El soporte con sus diferentes alturas de apoyo, logró que en el momento de la fractura la caída de los pesos fuera a una distancia muy reducida, y no tocara el piso la canastilla.

c. Horno de Calentamiento.

La variación de temperatura en esta prueba era primordialmente para observar el comportamiento del horno, el control de temperatura y el contactor, por lo que, se demostró que en servicio continuo (676.73 hrs.) no hubo ninguna falla.

El material termocerámico del horno permitió un buen aislamiento de calor, y posteriormente a la prueba se revisó totalmente el horno, encontrándose en perfecto estado.

d. Dispositivo Indicador de la Elongación.

El dispositivo indicador de la elongación cumplió con el objetivo. Los registros en la carátula permitieron durante la prueba y antes de la fractura, observar como se elongaba la probeta, conforme al paso del tiempo.

Este dispositivo permitió no interrumpir la prueba para saber cuánto se ha elongado la probeta, e incluso es un elemento muy importante en pruebas de termofluencia, donde se requiera medir el tiempo a una determinada deformación o viceversa, sin llegar a la fractura.

e. Graficador para el Registro de la Elongación con respecto del Tiempo.

Como se esperaba, el registro gráfico de la elongación se obtuvo sin interrupción, esto es, el comportamiento del metal en condiciones de termofluencia se obtuvo gráficamente.

Se rayó primeramente en el papel cada vuelta del rodillo, esto es, cada 6 horas con sus incrementos, en cuanto al aumento del diámetro por el espesor de las hojas. Debido a la duración de la prueba el papel fue cambiado en varias ocasiones, por lo que, en estos casos es conveniente hacer después de la prueba, una gráfica más pequeña con los datos del indicador de la elongación, la gráfica obtenida del graficador y la longitud final de la longitud calibrada.

2.- PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA-RUPTURA.

Una vez comprobado el funcionamiento correcto de la máquina, se procedió a realizar dos pruebas de termofluencia.

a. Prueba No. 1.

Condiciones bajo las cuales se realizó la prueba No. 1 :

- * Material : Aleación de Aluminio 6061-T6.
- * Composición Química de la Aleación :
Especificada en la prueba de funcionamiento.
- * Forma de la Probeta : La ilustrada en la
Figura 32.
- * Diámetro de la Sección Reducida de la
probeta :
Diámetro = 0.499" (12.6746 mm.)
- * Area de Sección Transversal de la Probeta
en la Sección Reducida :

$$A_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (m^2)$$

$$A_1 = 1.2617 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$
- * Longitud calibrada (G) de la Sección
reducida :
G = 2.00" (50.8 mm.)
- * Brazo o Radio de Palanca Utilizado :
L = 1.15 m.
- * Carga aplicada en la Canastilla P :
P = 241.23 Kg. = 2366.466 N.

- * Carga aplicada a la Probeta (R_2) :
(En base a la ecuación (35).

$$R_2 = \frac{(552.303 + P) (L) + 121.752 + 181.975}{0.1322}$$

$$R_2 = 26493.142 \text{ N.}$$

La carga se aplicó despacio, por medio de un gato hidráulico, para evitar cargas repentinas. Una vez que la probeta estaba estabilizada a la temperatura requerida.

- * Esfuerzo Aplicado a la Probeta :

$$\bar{\sigma} = \frac{\text{Carga (Pa)}}{\text{Área}}$$

$$\bar{\sigma} = \frac{26493.142 \text{ (N)}}{1.2617 \times 10^{-4} \text{ (m)}^2}$$

$$\bar{\sigma} = 209.979 \text{ MPa.}$$

- * Temperatura (constante) :

$$T = 550^\circ\text{C} (1022^\circ\text{F})$$

Deformación de las Lecturas Tomadas :

DEFORMACION (mm./mm.)	TIEMPO (Hrs.)
0.0019	0.000
0.0059	0.050
0.0118	0.150
0.0137	0.266
0.0177	1.000
0.0196	1.416
0.0255	1.833
0.0295	2.000
0.1500 (Fractura)	2.333

Resultados :

- * Duración de la Prueba :
 $t = 2.383 \text{ h} = 2 \text{ horas con } 23 \text{ minutos.}$
- * Diámetro menor en el Cuello :
 $\phi_2 = 0.309'' (7.8486 \text{ mm.})$

- * Area en la sección de menor diámetro del cuello:

$$A_2 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_2 = 4.8381 \times 10^{-5} \text{ m}^2 .$$

- * Reducción de área :

$$\text{Reducción de área} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100$$

$$\text{Reducción de área} = 61.65\%$$

- * Longitud final entre las marcas calibradas :

$$L_f = 2.300'' (58.4 \text{ mm.})$$

- * Elongación :

$$\text{Elongación} = \frac{L_f - L_0}{L_0} \times 100$$

$$\text{Elongación} = 15\%$$

- * Velocidad minima de termofluencia :

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \text{Deformación}}{\Delta \text{Tiempo}}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{0.0196 - 0.0137}{1.416 - 0.266}$$

$$\dot{\epsilon} = 5.1304 \times 10^{-3} \text{ mm./mm./h.}$$

- * Tiempo de inicio y finalización de la segunda etapa de la termofluencia :

$$t_{\text{INICIO}} = 0.266 \text{ h} = 16 \text{ minutos.}$$

$$t_{\text{FINAL}} = 1.416 \text{ h} = 1 \text{ hora con } 25 \text{ minutos}$$

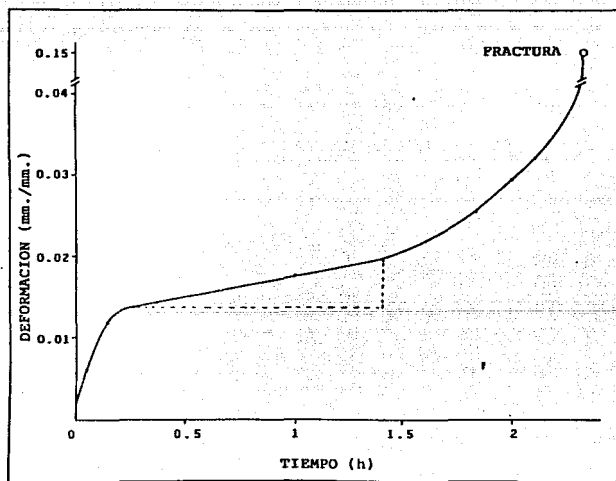


FIGURA 34 . Curva trazada en base a los valores obtenidos

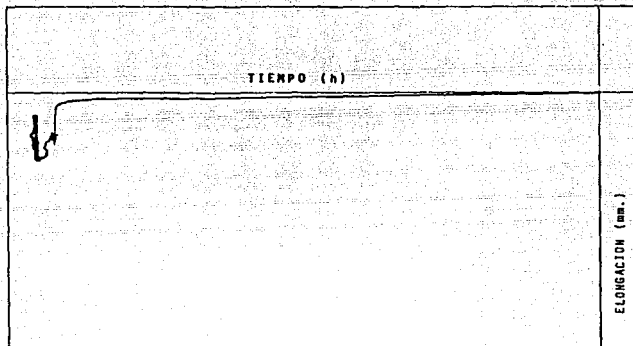


FIGURA 35. Curva trazada por el graficador de la máquina.

b. Prueba No. 2.

La prueba No. 2, se realizó bajo las mismas condiciones de la Prueba No. 1, exceptuando :

* Diámetro de la Sección Reducida de la probeta :

$$g_1 = 0.4995" \quad (12.6875 \text{ mm.})$$

- * Area de Sección Transversal de la probeta en la sección reducida :

$$A_1 = \frac{\pi \beta^2}{4} \text{ (m}^2\text{)}$$

$$A_1 = 1.2642 \times 10^{-4} \text{ m}^2.$$

- * Esfuerzo Aplicado a la Probeta :

$$\sigma = \frac{\text{Carga}}{\text{Area}} = \frac{26493.142}{1.2642 \times 10^{-4}} \frac{\text{(N)}}{\text{(m}^2\text{)}}$$

$$\sigma = 209.564 \text{ MPa.}$$

Deformación de las Lecturas Tomadas :

DEFORMACION (mm./mm.)	TIEMPO (Hrs.)
0.0019	0.000
0.0059	0.050
0.0098	0.100
0.0118	0.150
0.0137	0.233
0.0157	0.583
0.0177	0.916
0.0196	1.283
0.0216	1.500
0.0255	1.750
0.0275	1.833
0.0295	1.916

0.0314	2.000
0.0334	2.083
0.0374	2.166
0.0393	2.200
0.153 (Fractura)	2.216

Resultados :

- * Duración de la prueba :

$$t = 2.216 \text{ h} = 2 \text{ h con } 13 \text{ minutos.}$$

- * Diámetro menor en el cuello:

$$g_2 = 0.308'' \text{ (7.8232 mm.)}$$

- * Area en la sección de menor diametro del cuello:

$$A_2 = \frac{\pi g_2^2}{4} \quad (\text{m}^2)$$

$$A_2 = 4.8068 \times 10^{-5} \text{ m}^2.$$

- * Reducción de área :

$$\text{Reducción de área} = \frac{A_1 - A_2}{A_1} \times 100$$

$$\text{Reducción de área} = 61.97\%$$

- * Longitud final entre las marcas calibradas :

$$L_f = 2.308'' \text{ (58.6232 mm.)}$$

- * **Elongación :**

$$\text{Elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

$$\text{Elongación} = 15.4\%$$

- * **Velocidad mínima de termofluencia :**

$$\dot{\epsilon} = \frac{\Delta \text{Deformación}}{\Delta \text{Tiempo}}$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{0.0196 - 0.013}{1.283 - 0.233}$$

$$\dot{\epsilon} = 5.6190 \times 10^{-3} \text{ mm./mm./h.}$$

- * **Tiempo de inicio y finalización de la Segunda Etapa de la Termofluencia :**

$$t_{\text{INICIO}} = 0.233 \text{ h} = 14 \text{ minutos.}$$

$$t_{\text{FINAL}} = 1.283 \text{ h} = 1 \text{ h con } 17 \text{ minutos.}$$

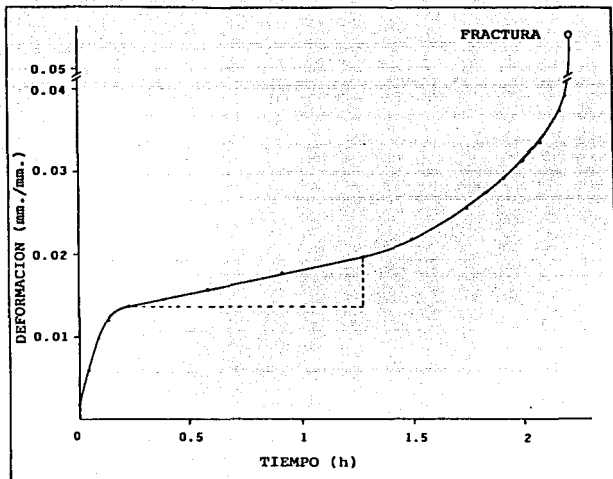


FIGURA 36. Curva trazada en base a los valores obtenidos.

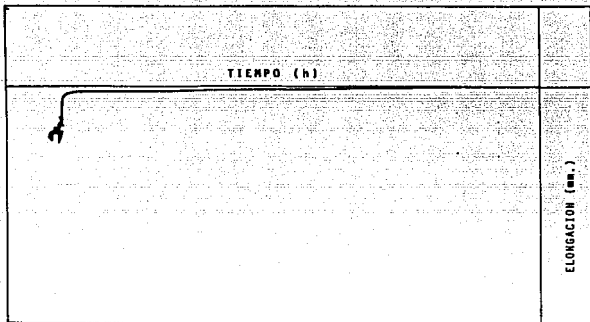


FIGURA 37. Curva trazada por el graficador de la máquina.



FIGURA 38. Fotografía de la Probeta fracturada.

Como se pudo observar, aún cuando las pruebas de Termofluencia-Ruptura se realizaron en tiempos muy cortos, pudo establecerse el comportamiento de una probeta de la aleación de aluminio 6061-T6, sometida a un esfuerzo de 209 M Pa. y a una temperatura de 550 °C.

Sin embargo, no hay una medida exacta de veracidad de los resultados obtenidos en las pruebas de Termofluencia y Esfuerzo-Ruptura, debido a :

- 1). La prueba no puede ser repetida a la misma probeta.
- 2). Variación de las propiedades de los materiales probados.
- 3). El resultado depende de la interacción de :
 - * Temperatura.
 - * Carga o Esfuerzo.
 - * Relación de Radios de Palanca.

Esto es, en cuanto a la precisión que se tenga, de cada uno de los anteriores puntos.

IV. CONCLUSIONES.

El buen funcionamiento de la máquina, durante las pruebas, así como el perfecto estado de ésta, hasta el momento de la emisión de este trabajo, ha permitido cumplir con los objetivos planteados.

Por lo tanto, la máquina diseñada y contruida tiene las siguientes características generales :

1. Capacidad Máxima : 23 KN.
2. Temperatura Máxima : 1200 °C.
3. Relación Máxima de Radios : De 9 a 1.
4. Sistema de Brazo o Radio de Palanca Regulable.
5. Sistema Indicador de la Elongación.
6. Sistema de Graficación de la Elongación.
7. Controlador Automático de Temperatura.

Todos los puntos anteriormente mencionados, son el resumen de los resultados obtenidos en el Capítulo II.

Además de haber cumplido, en lo posible, con la sencillez del

diseño, esta máquina tiene la versatilidad de :

1. Poder aumentar la capacidad de carga a 50 KN, si es necesario para alguna prueba; colocando sobre la placa principal una placa similar en medidas a ésta y con un espesor de 11.9 mm.

2. Poder realizar una prueba simultánea a 2 materiales, (Capítulo III).

Cabe aclarar, que en el caso de realizar una prueba simultánea a dos materiales, el sistema indicador y graficador de la deformación no se tomarían en cuenta; por lo que para pruebas simultáneas, sólo es posible realizar en esta máquina pruebas de Esfuerzo-Ruptura.

En cuanto a las pruebas realizadas se refiere, se ha mostrado el comportamiento de la aleación de aluminio 6061-T6, sometida a un esfuerzo de 209 MPa. y a una temperatura de 550 °C, estudios mencionados a detalle en el Capítulo III.

La máquina en cuestión, abre un sinnúmero de investigaciones en lo que se refiere al comportamiento de los metales sometidos a condiciones de termofluencia, objetivo principal alcanzado con la creación de esta tesis.

V. BIBLIOGRAFIA.

1. DIETER E. GEORGE.
Mechanical Metallurgy
Ja. Ed., U.S.A. Ed. McGraw-Hill Book Company, 1986.
2. IUTAM SYMPOSIUM GOTHEMURG 1970.
Creep in Structures 1970
Germany Ed. Hult Jan. 1972
3. R.W. EVANS AND B. WILSHIRE
Creep of Metals and Alloys
The Institute of Metals
Dotesios Printers Ltd., Bradford on Avon, Wilshire
England 1985
4. THE BRITISH IRON AND STEEL RESEARCH ASSOCIATION AND THE
IRON AND STEEL INSTITUTE.
High-Temperature Properties of Steels
England Ed. Her Majesty's Printers AT.
The Thanet Press, 1967
5. SUBDIRECCION DE CAPACITACION DEL INSTITUTO MEXICANO DEL
PETROLEO.
Curso Especializado de Metalúrgia.
Tomo 1, México, D.F.

6. ASKELAND R. DONALD
The Science and Engineering of Materials.
Boston, Massachusetts, 1984

7. AMERICAN SOCIETY FOR METALS
Metals Handbook Ninth Edition
Mechanical Testing Vol. 8, 1979

8. REVISTA DEL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO.
Las Fallas por Sobrecalentamiento de Tubos de Caldera y sus
Características Metalográficas.
México, Vol. V, N. 1, Enero 1973

9. CLAUSS, F.
Engineer's Guide to High-Temperature Materials.
Ed. Eddison-Wesley Publishing Company, 1969

10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ANNUAL BOOK OF
A.S.T.M. STANDARDS.
Section 3, Vol. 03.08, "Metals Test Methods and Analytical
Procedures"
U.S.A., 1985.

11. AVNER, SYDNEY.
Introducción a la Metalurgia Física.
2a. Ed., McGraw-Hill
México, Enero de 1990

12. SHIGLEY, JOSEPH Y MITCHELL LARRY.
Diseño en Ingeniería Mecánica.
3a. Ed. en Español, McGraw-Hill
México, Julio de 1985

13. SINGER, FERDINAND Y PYTEL, ANDREW.
Resistencia de Materiales.
Ed. Harla, México 30 de Julio de 1985

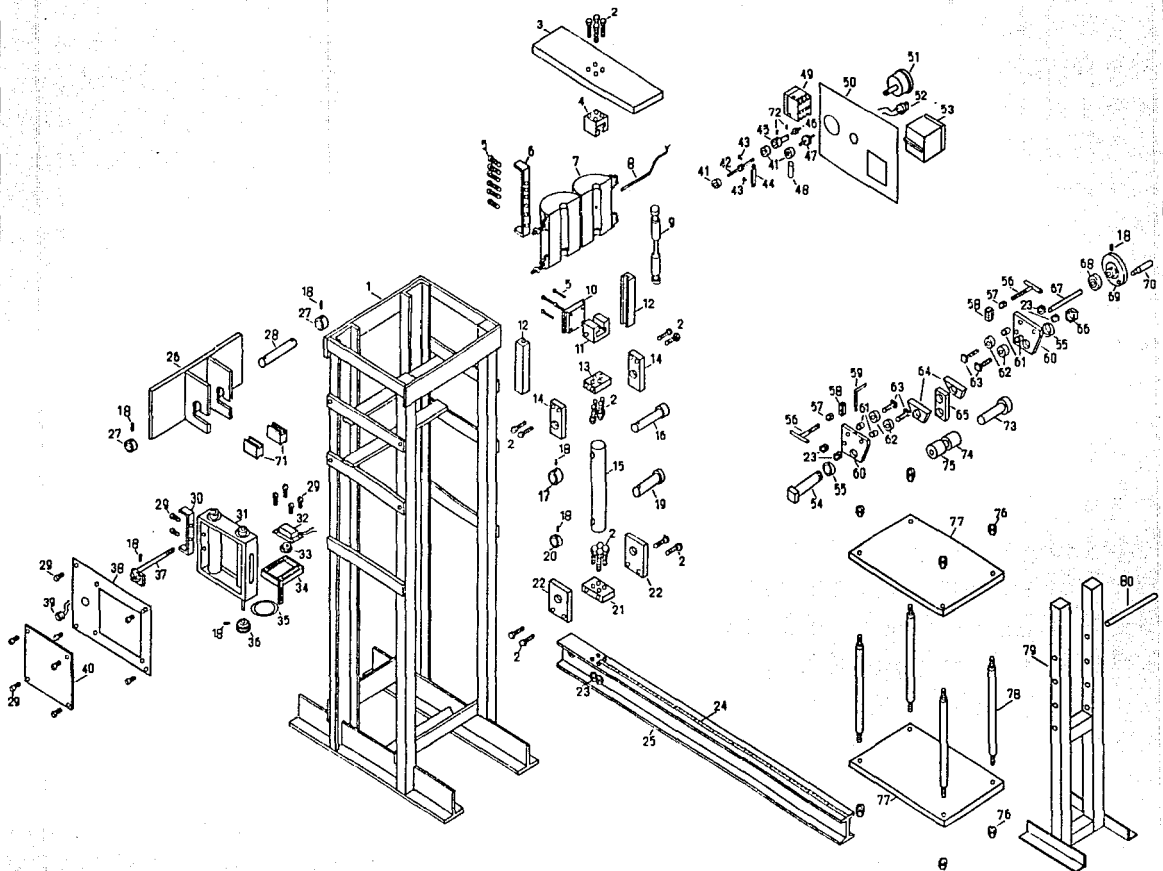
14. AMERICAN WELDING SOCIETY, INC.
Specification for Covered Carbon Steel Arc. Welding
Electrodes.
Octubre 30, 1981


15. CHEVALIER, A.
Dibujo Industrial
Montaner y Simon, España 1979

A P E N D I C E "A"

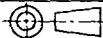
**DIBUJO EN EXPLOSIVO
DE LA MAQUINA PARA**

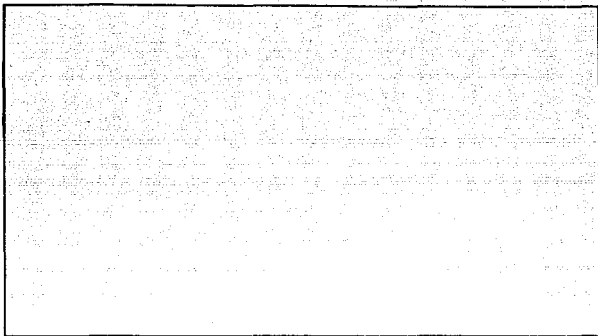
MEDICION DE TERMOFLUENCIA



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN - U.N.A.M.			
ESCALA: 1:10	ACOTACION: SIN	FECHA: ENERO 1952	REV OR F ESPARZA H
		MAQUINA PARA MEDICION	DBUJO / OSORRIO R
		DE TERMOFLUENCIA	C.A.T.
I.M.E.		(CONJUNTO)	LAMINA No 1 DE 4

32	1	RELOJ ELECTRICO	ACERO	ESTANDAR
31	1	CARCAZA DEL GRAFICADOR	LAMINA NEGRA	MAQUINADO, SOLDADO Y SUJETADO
30	1	SOPORTE DEL GRAFICADOR	AISI 1018	MAQUINADO
29	10	TORNILLO CABEZA SOTA	AISI 1018 Ø 0.25 - 20 UNC x 1"	ESTANDAR
28	1	PERNO PRINCIPAL	AISI 9840	MAQUINADO Y SOLDADO
27	2	POSICIONADORES	AISI 1018	MAQUINADO
26	1	PORTA PERNO PRINCIPAL	PLACA ROLADA	MAQUINADO Y SOLDADO
25	1	BRAZO DE PALANCA	PERFIL 5100 X 11	MAQUINADO
24	1	CINTA METRICA	LAMINA NEGRA	ESTANDAR
23	8	TUERCA HEXAGONAL	AISI 1018 Ø 0.5-13 UN.	ESTANDAR
22	7	PORTA PERNO INFERIOR	PLACA ROLADA	MAQUINADO
21	1	SUJETADOR A LA PALANCA	PLACA ROLADA	MAQUINADO
20	1	POSICIONADOR INFERIOR	AISI 1018	MAQUINADO
19	1	PERNO INFERIOR	AISI 9840	MAQUINADO Y SOLDADO
18	7	PRISIONEROS	Ø 0.250-20 UNC x 0.250"	ESTANDAR
17	1	POSICIONADOR SUPERIOR	AISI 1018	MAQUINADO
16	1	PERNO SUPERIOR	AISI 9840	MAQUINADO Y SOLDADO
15	1	BRAZO OSCILADOR	AISI 1018	MAQUINADO
14	2	PORTA PERNO SUPERIOR	PLACA ROLADA	MAQUINADO
13	1	SUJETADOR MORDAZA INF.	PLACA ROLADA	MAQUINADO
12	2	GUÍAS MORDAZA INF.	AISI 1018	MAQUINADO Y SOLDADO
11	1	MORDAZA INFERIOR	AISI 9840	MAQUINADO Y SOLDADO
10	1	POSICIONADOR DE LA MORDAZA.	PLACA ROLADA	MAQUINADO Y SOLDADO
9	1	PROBETA	CUALQUIER METAL	MAQUINADO
8	1	TERMOPAR	CHROMEL - ALUMEL	TIPO K
7	1	HORNO	AISI 1018, CEMENTO MOLDEABLE, MICROMIL	MAQUINADO, SOLDADO Y MOLDADO
6	1	SOPORTE DEL HORNO	AISI 1018	MAQUINADO Y SOLDADO
5	10	TORNILLO CABEZA PLANA	AISI 1018 Ø 0.25 - 20 UNC x 1.5"	ESTANDAR
4	1	MORDAZA SUPERIOR	AISI 9840	MAQUINADO Y SOLDADO
3	1	PLACA SUPERIOR	PLACA ROLADA	MAQUINADO Y SOLDADO
2	20	TORNILLO CABEZA HEXAGONAL	ACERO MEDIANO CARBONO Ø 0.5 - 13 UNC 7"	GRADO SAE 5, ESTANDAR
1	1	ESTRUCTURA	ACERO ESTRUCTURAL AISI 1018, PLACA ROLADA	MAQUINADO Y SOLDADO
No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACION
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTILAN - U. N. A. M.				
ESCALA: SIN		ACOTACION: SIN	FECHA: ENERO 1992	REV. DR F. ESPARZA H.
 I. M. E.		MAQUINA PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA (LISTA DE PARTES)		DIBUJO: J. OSORRIO R.
				C. A. T.
				LAMINA No. 2 DE 4

64	2	SEPARADOR INTERIOR	PLACA BOLADA	MAQUINADA
63	4	TORNILLOS	# 0.5 - 13 UNC x 2"	MAQUINADOS
62	4	RODAMIENTOS	SKF 6203	ESTANDAR
61	4	SEPARADOR DE LOS RODAMIENTOS	AISI 1018	MAQUINADO
60	1	PLACA RODAMIENTOS	P.A. A BOLADA	MAQUINADO
59	1	INDICADOR DEL BRAZO DE PALANCA	AISI 1018	MAQUINADO
58	2	FRENOS	NEOPRENE	ESTANDAR
57	2	TUERCA HEXAGONAL	AISI 1018 # 0.375 - 16 UNF	ESTANDAR
56	1	AJUSTADOR DEL FRENO	AISI 1018	MAQUINADO Y SOLDADO
55	2	SEPARADOR CON ANSULACION	AISI 1018	MAQUINADO
54	1	PLANO DE LA TRUJE	AISI 9340	MAQUINADO Y TEMPLADO
53	1	CONTROLADOR DE TEMPERATURA	AITO CM12	TIPO X
52	1	INTERRUPTOR	ACRILICO Y AISI 1018 ELECTRANIQUE 782 87101	ESTANDAR
51	1	INDICADOR DE LA FLUJACION	PLASTICO, LAMINA NEGRA	MAQUINADO
50	1	TAPA IZQUIERDA	LAMINA NEGRA	CORTACA
49	1	CONTACTOR	TELEMECANIQUE CCL - 3253	ESTANDAR
48	1	SOPORTE RODAMIENTO	AISI 1018	MAQUINADO
47	1	ENGRANE CON HUSILLO	ACERO 44 DIENTES	MAQUINADO
46	1	ENGRANE CON HUSILLO	ACERO 14 DIENTES	MAQUINADO
45	1	ACOPLEMIENTO	AISI 1018	MAQUINADO
44	1	CREMALLERA	BRONCE	PC - 1.250 mm.
43	2	TORNILLO CABEZA GOTA	# 0 187-24 UNS x 0.375"	ESTANDAR
42	1	ENGRANE CON HUSILLO	ACERO 16 DIENTES	MAQUINADO
41	3	RODAMIENTO	SKF 1-6202-2	ESTANDAR
40	1	MICA DEL GRAFICADOR	ACRILICO	CORTADO Y MAQUINADO
39	1	INTERRUPTOR DEL RELOJ		ESTANDAR DE PALANCA
38	1	TAPA DERECHA	LAMINA NEGRA	CORTACA
37	1	PORTA MARCADOR	AISI 1018 Y ALUMINIO	MAQUINADO
36	1	POLEA ESCALONADA	NYLON	MAQUINADA
35	1	BANDA	BANDA DE GULE PARA AUTOSTEREO	ESTANDAR
34	1	SOPORTE DE RELOJ	AISI 1018	MAQUINADO Y SOLDADO
33	1	POLEA DE RELOJ	NYLON	MAQUINADA
No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACION
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN - U. N. A. M.				
ESCALA: SIN		FECHA: ENERO 1992		REV. DR. F. ESPARZA H.
		MAQUINA PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA (LISTA DE PARTES)		DIBUJO: J. OSORNO R.
I.M.E.				C.A.T.
				LAMINA No. 3 DE 4



80	1	APoyo PARA EL BRAZO	AISI 1018	MAQUINADO
79	1	SOPORTE DEL BRAZO	ACERO ESTRUCTURAL AISI 1018	MAQUINADO Y SOLDADO
78	4	BARROTES	AISI 1018	MAQUINADO
77	2	PLACA DE LA CANASTILLA	PLACA ROLADA	MAQUINADA
76	8	TUERCA HEXAGONAL	AISI 1018 Ø 1.00 - 8 UNO	ESTANDAR
75	1	SUJETADOR DERECHO DE LA CANASTILLA	AISI 1018	MAQUINADO
74	1	SUJETADOR IZQUIERDO DE LA CANASTILLA	AISI 1018	MAQUINADO
73	1	PERNO DE LA CANASTILLA	AISI 9840	MAQUINADO Y T.M. A. 1
72	2	PRISIONEROS	Ø 0.187-24 UNS x 0.25	ESTANDAR
71	2	APOTOS DEL PERNO PRINCIPAL	AISI 1018	MAQUINADO
70	1	MANGO DEL BOLANTE	AISI 1018	MAQUINADO
69	1	BOLANTE	ALUMINIO	MAQUINADO
68	1	LLANTA	HULE	ESTANDAR
67	1	FLECHA DE LA LLANTA	AISI 1018	MAQUINADA
66	1	TUERCA HEXAGONAL	Ø 1.250 - 7 UNS	ESTANDAR
65	1	GANCHO	PLACA ROLADA	MAQUINADA
No.	CANTIDAD	DESIGNACION	MATERIAL	OBSERVACION

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

ESCALA : SIN ACOTACION : SIN FECHA : ENERO 1992 REV. DR. F. ESPARZA H.

	<p>MAQUINA PARA MEDICION DE TERMOFLUENCIA (LISTA DE PARTES)</p>	<p>DIBUJO: J. OSORNO R.</p>
		<p>C. A. T.</p> <p>LAMINA No 4 DE 4</p>

A P E N D I C E "B"

FOTOGRAFIAS DE LA MAQUINA PARA

MEDICION DE TERMOFLUENCIA

**MAQUINA PARA MEDICION DE
TERMOFLUENCIA**

**DISEÑADA Y CONSTRUIDA POR:
JORGE OSORNIO REYES**

**BAJO LA DIRECCION DE:
DR. FRANCISCO ESPARZA HERRADA
ING. SERGIO DE MORAES BENITEZ
PRESENTADA COMO TESIS DE LICENCIATURA PARA OBTENER
EL TITULO DE INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

CENTRO DE ASIMILACION TECNOLOGICA

FES-C

UNAM

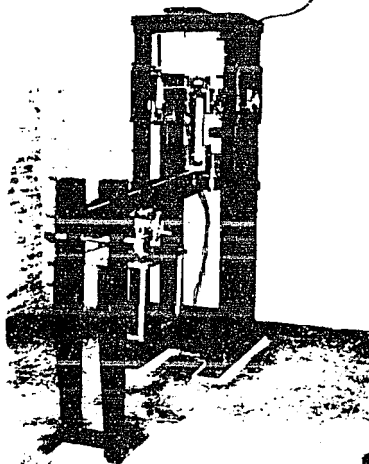


FIGURA 39. Máquina para Medición de Termofluencia.

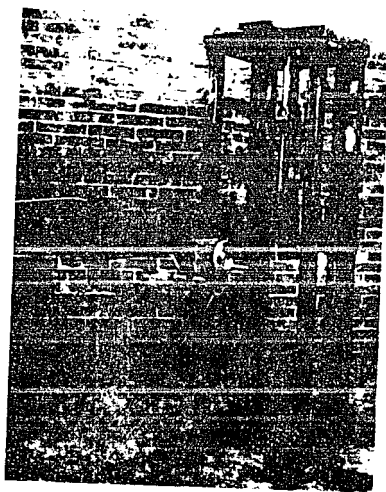
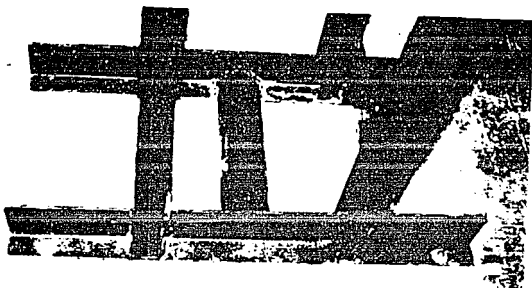


FIGURA 40. Estructura de la Máquina.

181

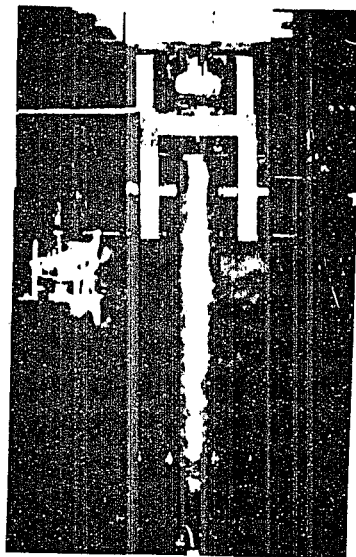


FIGURA 41. Articulaciones y Brazo Ocilante // Soporte para el Brazo de Palanca.

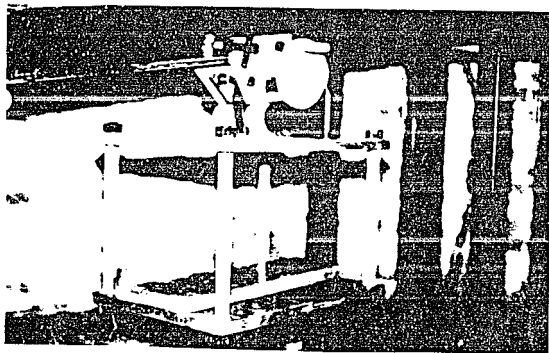
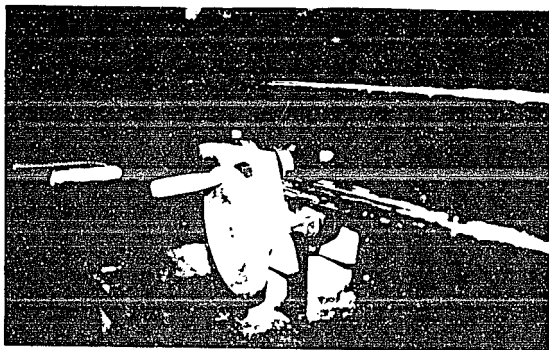


FIGURA 42. Trole // Canastilla de Pesos.

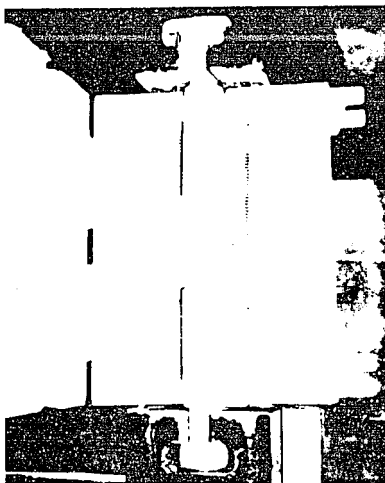
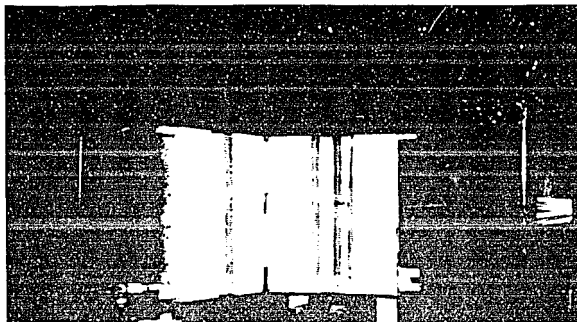


FIGURA 43. Horno // Probeta Instalada en la Máquina.

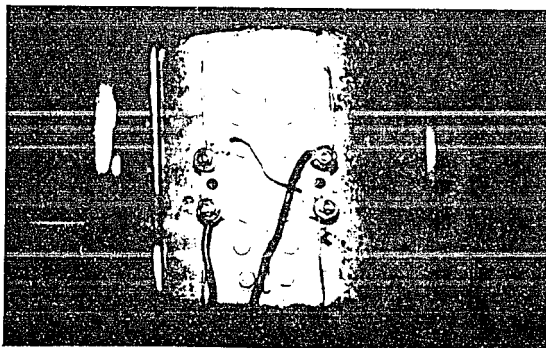
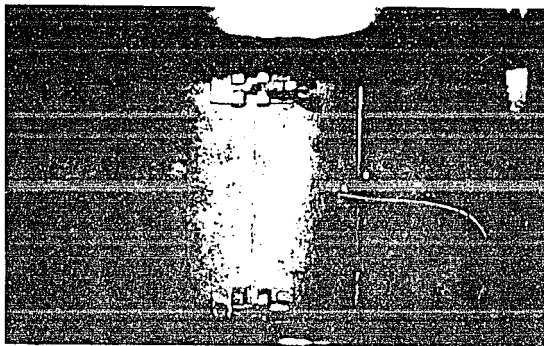


FIGURA 44. Horno // conexión del horno.

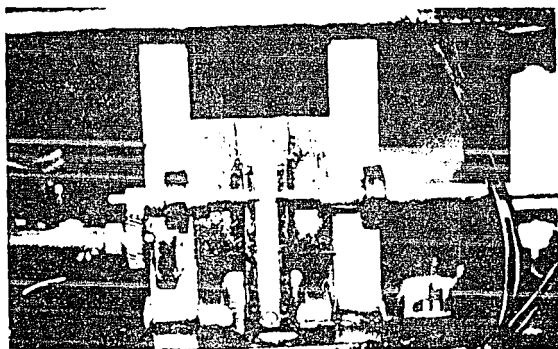
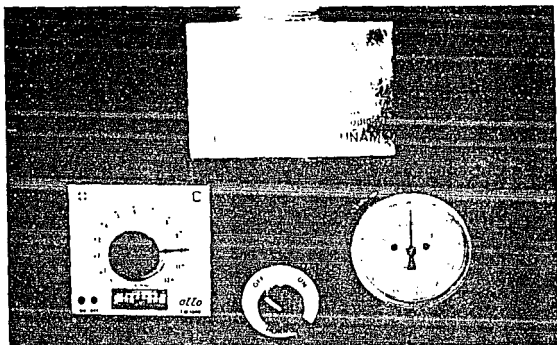


FIGURA 45. Controlador de Temperatura, interruptor e Indicador de la elongación // Sistema Indicador de la elongación.

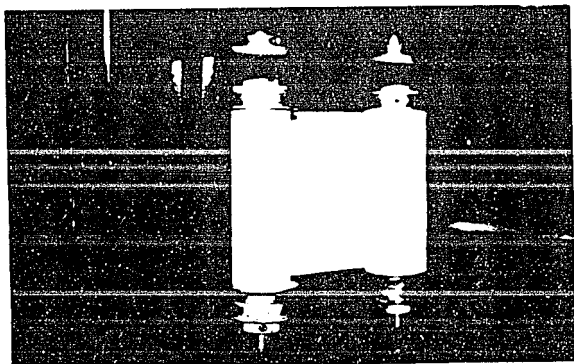
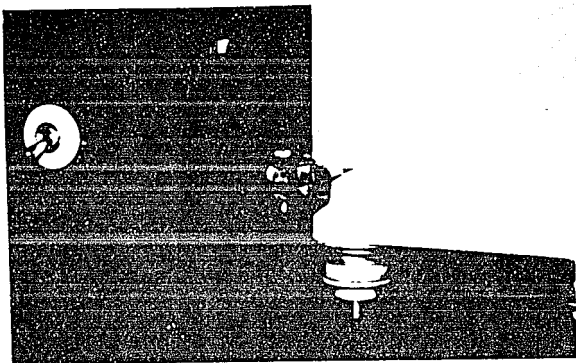


FIGURA 46 . Graficador

A P E N D I C E "C"

DIFERENTES TIPOS DE MAQUINAS PARA

PRUEBAS DE TERMOFLUENCIA

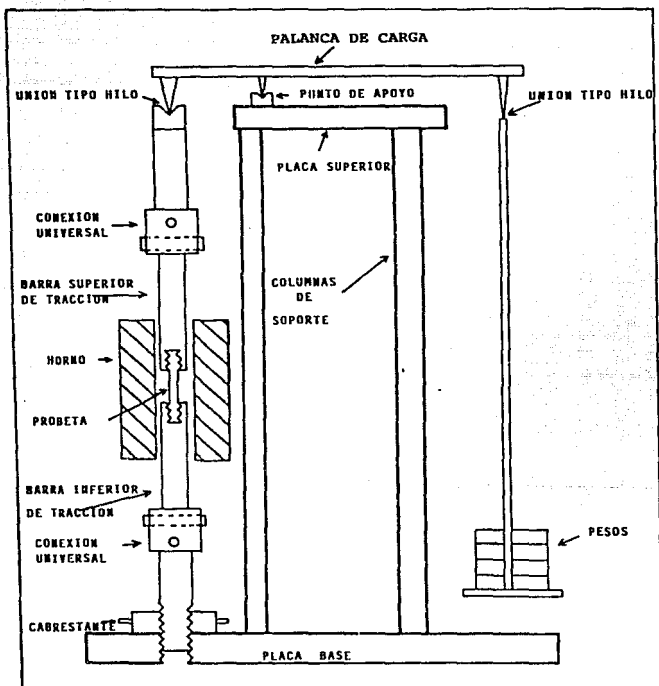


FIGURA 47. Sistema de Carga para Una Máquina de un sólo nivel superior.

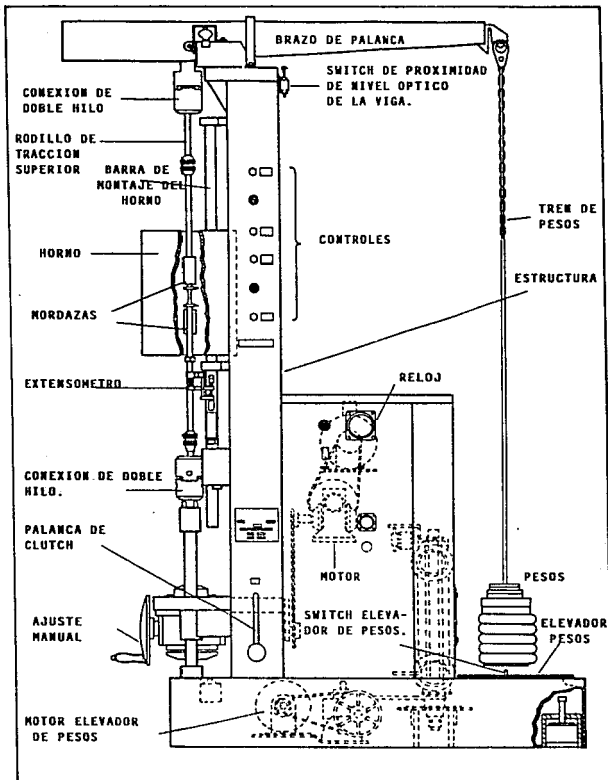


FIGURA 48. Máquina para pruebas de termofluencia y Esfuerzo - Ruptura.

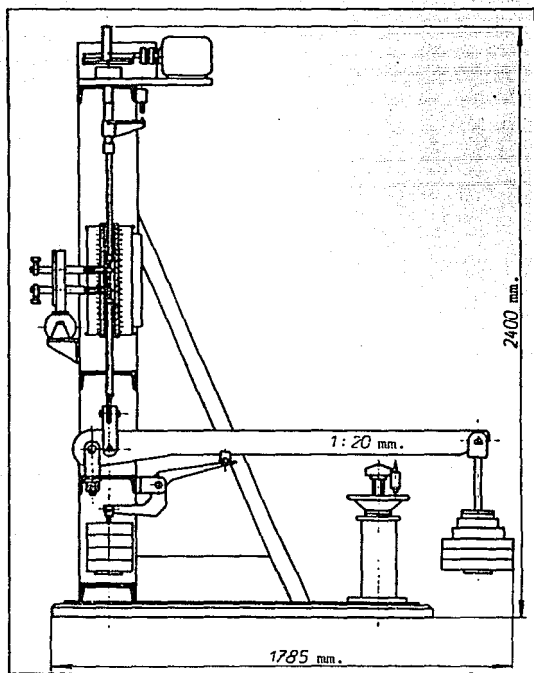


FIGURA 49. Máquina de Termofluencia con medidas ópticas de Deformación.

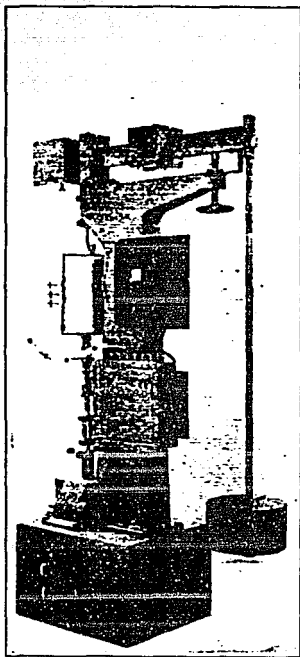


FIGURA 50. Máquina con base compacta con un máximo de carga de 31.86 kN.

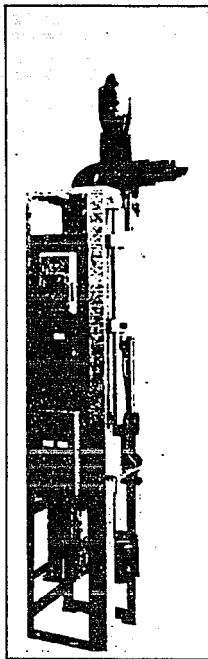


FIGURA 51. Máquina para una sola probeta con una carga máxima de 19.60 kN.

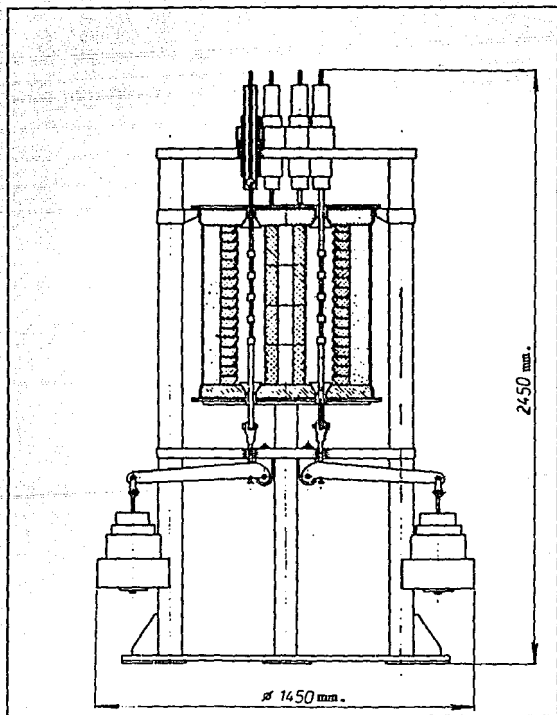


FIGURA 52. Máquina Multi-Probetas con 8 niveles de carga.

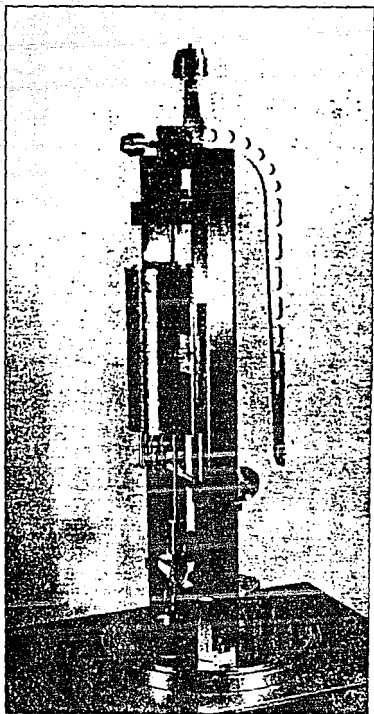


FIGURA 53. Máquina para Pruebas en Vacío, con un máximo de carga de 490.19 N.

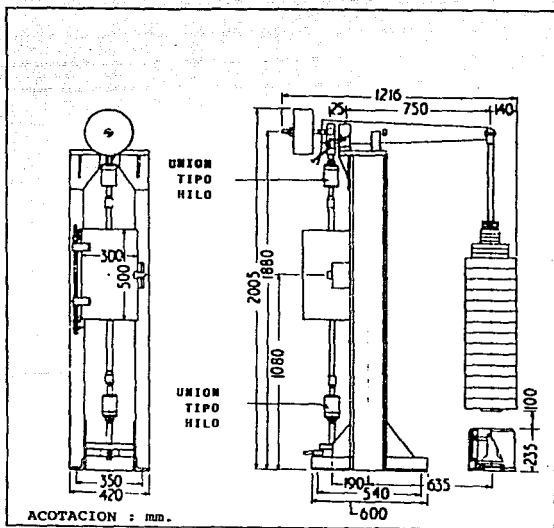


FIGURA 54. Máquina para medición de Termofluencia de tipo estructura soldada.

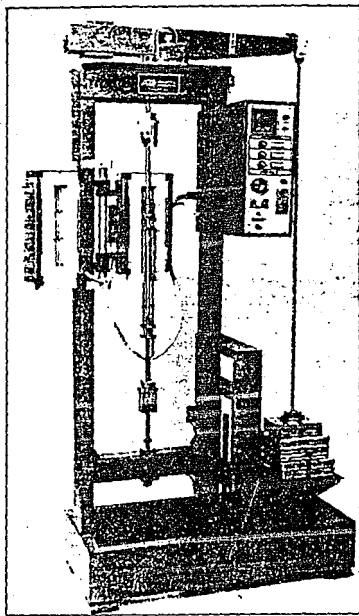


FIGURA 55. Máquina con Brazo de Palanca Superior para pruebas de Termofluencia.

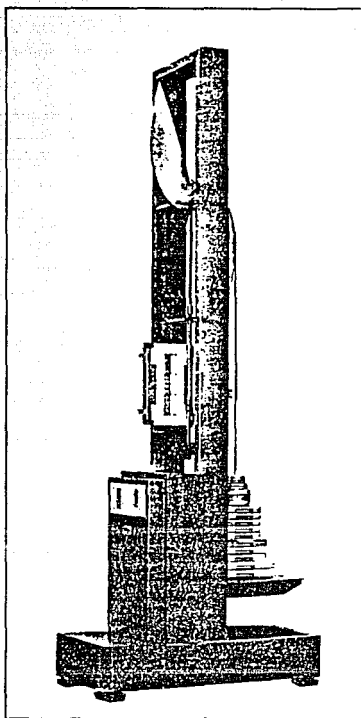


FIGURA 56. Máquina típica de Esfuerzo-Constante
con capacidad de carga de 10 kN.

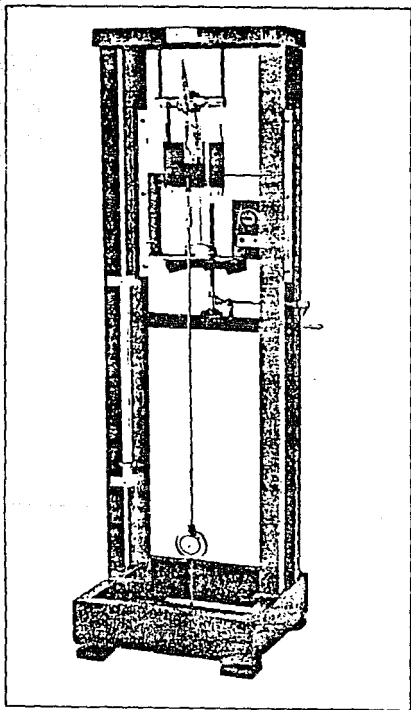


FIGURA 57. Máquina de Esfuerzo-Constante con capacidad de carga de 1 KN.