



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

11
2.EJ

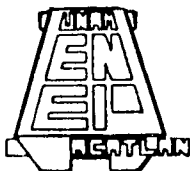
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES "ACATLAN"

"MEDICION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE UN MODELO DE VIGA EN CANTILIVER MEDIANTE EL USO DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE"



T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
P R E S E N T A :
JUAN ALFREDO CORONA PEREZ

ASESOR: ING. MIGUEL M. ZURITA ESQUIVEL



ACATLAN, ESTADO DE MEXICO

1995

FALLA DE ORIGEN



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES ACATLÁN

NOTIFICACION DE TRABAJO CONCLUIDO PARA TITULACION

Biol. Guadalupe Salcedo Aquino
Jefe de la Unidad de Administración Escolar,
P R E S E N T E .

Después de haber asesorado y revisado el trabajo titulado Medición de las propiedades mecánicas básicas de un modelo de viga en cantiliver mediante el uso de extensómetros eléctricos de resistencia variable.

que para obtener el grado de licenciado en Ingeniero Civil bajo la opción de Tesis.

elaboró Juan Alfredo Corona Pérez

con número de cuenta 8301223-9 generación 86 - 90

notifico a usted que considero debidamente concluido el trabajo por las siguientes razones: ES UN TRABAJO BIEN FUNDAMENTADO, CORRECTAMENTE ELABORADO DESDE EL PUNTO DE VISTA TÉCNICO, SUFICIENTEMENTE DESARROLLADO Y COMPLETO, QUE CUMPLE CON LOS OBJETIVOS QUE SE DEBEN PLANTEAR EN UNA TESIS, ADEMAS DE QUE EL TEMA ANALIZADO ES NOVEDOSO Y REQUIRIR SE LLEVARAN A CABO TANTO ACCIONES DE INVESTIGACION COMO ESTUDIOS DE LABORATORIO.

15-06-95
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU"
Acatlán, Edo. de México, a 10 de febrero de 1995

Ing. Miguel Moisés Zurita Esquivel
Nombre y firma del asesor

ESCUELA NACIONAL DE INGENIERIA

INSTRUCCIONES

- 1.- Liénesse a máquina.
- 2.- El original y las copias del presente documento deberán entregarse de acuerdo a lo siguiente:

Original blanco:	Unidad de Administración Escolar
Copia amarilla:	Jefatura del Programa correspondiente
Copia azul:	Asesor asignado
Copia rosa:	Alumno

Con cariño y respeto dedico esta tesis a quienes en ningún momento perdieron la fe y la confianza en mí al otorgar incondicionalmente todo su apoyo, dándome la oportunidad de estudiar una carrera profesional, a ellos, **mis padres**

Héctor Carlos Corona y Reyes
Ma. Guadalupe Pérez Calderón

que me dieron una parte de su vida. A **mis hermanos**

Charly
Dany
Laura
Oll
y
Faby

que me alentaron a seguir en los momentos más difíciles; y a mis familiares que de alguna manera han influido en mi formación personal y profesional.

Gulle

A tí, que me has dado gran parte de tu vida apoyandome con amor y comprensión en los momentos más difíciles, como la gran amiga que fuiste, la inigualable novia que tuve y la gran compañera de toda mi vida, a tí, mi esposa, con todo mi amor.

A mi hija

Ana Laura, la que me motivo a cada momento en la realización de este trabajo y a la que viviré amando por siempre.

A la Universidad Nacional Autónoma de México

Por ser una institución que colabora con su esfuerzo a preparar profesionistas, con el firme propósito de contribuir al desarrollo de integral de nuestro país.

A la ENEP Acatlán

Por todo lo que viví y aprendí en sus aulas colaborando a mi formación como persona y profesionista. No te defraudaré y llevaré muy en alto tu nombre querida escuela.

A mis maestros

Por su incomparable asesoría y su estímulo profesional.

A mi asesor Ing. Miguel M. Zurita Esquivel

Con afecto y respeto por su valiosa ayuda y apoyo que de usted he recibido, en la elaboración de esta tesis, así como por sus comentarios y consejos profesionales. A usted mil gracias.

Con estimación y respeto a

Ing. Ma. del Carmen Fernández Orozco por ser un ejemplo como maestro y por su valiosa colaboración de convertirme en profesionista.

Con admiración y respeto a

Ing. Alfredo Olivares Ponce

Dr. Luis A. Ferrer Argoite

Ing. Manuel Gómez

L.C. Ma. de los Angeles Montes Castro

Sr. Julio A. González Medina

Sr. Fernando Díaz G.

Sr. Héctor Alonso Contreras

Por que sin su valioso apoyo no habría sido posible la elaboración de esta tesis.

A todos y cada uno de mis amigos, compañeros, y en especialmente a ti que lees esta tesis.

"MEDICION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE UN MODELO DE VIGA EN CANTILIVER MEDIANTE EL USO DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE"

OBJETIVO GENERAL:

ESTABLECER LOS CONCEPTOS Y PRINCIPIOS FUNDAMENTALES QUE SE REQUIEREN PARA APLICAR EL METODO EXPERIMENTAL DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE, PLANTEANDO DE UNA MANERA CLARA Y SENCILLA COMO SE UTILIZA ESTE , PARA LA DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE UN MODELO DE VIGA EN CANTILIVER.

INDICE

INTRODUCCION

ANTECEDENTES

CAPITULO 1. PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE LOS MATERIALES

Objetivo: Conocer las propiedades mecánicas básicas de los materiales.

	Página
1.1. Generalidades	1-1
1.2. Relaciones esfuerzo - deformación	1-3
1.3. Propiedades mecánicas de los materiales	1-9
1.4. Módulo de elasticidad	1-14
1.5. Relación de Poisson	1-16
1.6. Esfuerzos y deformaciones principales	1-17

CAPITULO 2. ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS

Objetivo: Mencionar y explicar los principales métodos experimentales para la determinación de esfuerzos.

2.1. Principios fundamentales	2-1
2.2. Método de extensómetros mecánicos	2-2
2.3. Método de Molre	2-16
2.4. Método de barnices frágiles	2-19
2.5. Método fotoelástico	2-22
2.6. Método de extensómetros eléctricos de resistencia variable	2-28

CAPITULO 3. EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE

Objetivo: Mencionar y explicar las características y el funcionamiento de los extensómetros eléctricos de resistencia variable.

	Página
3.1. Principios fundamentales	3-1
3.2. Construcción	3-2
3.3. Características técnicas de operación	3-8
3.4. Tipos de extensómetros eléctricos de resistencia variable	3-12
3.5. Instrumentación	3-21
3.6. Equipo	3-23

CAPITULO 4. UTILIZACION DEL METODO EXPERIMENTAL DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE PARA LA DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS EN UN MODELO DE VIGA EN CANTILIVER

Objetivo: Determinar las propiedades mecánicas básicas a partir de los datos obtenidos por medio de los extensómetros eléctricos de resistencia variable.

4.1. Características del modelo	4-1
4.2. Equipo utilizado	4-2
4.3. Determinación del módulo de elasticidad	4-6
4.4. Determinación de la relación de Poisson	4-19

CONCLUSIONES

BIBLIOGRAFIA

INTRODUCCION

En el estudio de la Mecánica de los Materiales el análisis experimental de esfuerzos ha formado parte importante para su desarrollo, existiendo una gran variedad de métodos desde muy simples como los de extensómetros mecánicos hasta muy sofisticados como los fotoelásticos o los de extensómetros eléctricos de resistencia variable; debido al manejo de la teoría, operación e interpretación de resultados.

Para la comprensión del análisis experimental de esfuerzos se requiere conocer y manejar los fundamentos de la Mecánica de los Materiales y para ello se utilizará el principio de la viga empotrada (en cantiliver o ménsula) siendo ésta particularmente apropiada para medir las propiedades básicas de los materiales, realizar una amplia variedad de mediciones de deformación, así como otros experimentos de análisis; tales como, factor de concentración de esfuerzos, determinación de esfuerzos principales, vibraciones libres, relación entre cortante y momento, entre otros.

En el análisis experimental de esfuerzos por el método de extensómetros eléctricos de resistencia variable, existe una gran variedad de equipos para diferentes fines (enseñanza, de aplicación e investigación). Al presente trabajo se le dará un enfoque de tipo didáctico, ya que el equipo que existe en los laboratorios de ingeniería civil en la Escuela Nacional de Estudios Profesionales "Acatlán" está concebido para este fin, siendo un dispositivo simple y útil para pruebas de esfuerzo en vigas, ideal para la demostración de las leyes de flexión, comportamiento de los materiales, análisis de esfuerzos, técnicas de medición de deformaciones y otros temas de Mecánica de los Materiales, dando una visión clara al estudiante de ingeniería de estos fenómenos. Utilizando el equipo antes mencionado se pueden implementar diferentes prácticas para el Laboratorio de Resistencia de Materiales el cual es complementario a las materias de Resistencia de Materiales I y II que se imparten en la institución antes mencionada.

ANTECEDENTES

Un extensómetro eléctrico de resistencia variable es un dispositivo de medición de deformación por medio de una resistencia eléctrica con ciertas características en sus dimensiones geométricas y del material que está hecho, dicha resistencia está montada en una base de soporte que a su vez va adherida a la superficie de cualquier cuerpo a ensayar. Al aplicar una fuerza que provoque una deformación en la superficie de ensayo, ésta se transmitirá a la base de soporte y posteriormente a la resistencia eléctrica, provocando una variación en sus dimensiones geométricas y por consiguiente la variación de la resistencia eléctrica del extensómetro; dado que la variación de resistencia eléctrica es proporcional a la deformación, podemos determinar el esfuerzo que se produce en la superficie del cuerpo de ensayo.

Los primeros indicios que se tienen sobre un extensómetro eléctrico de resistencia variable datan de fines del siglo pasado; exactamente en 1899 en Alemania al obtener Verner Helberger una patente de Estados Unidos de Norteamérica, para una resistencia del tipo lámina, teniendo un gran parecido a un moderno extensómetro eléctrico de resistencia variable.

Fue hasta 1936 en los Estados Unidos de Norteamérica cuando Edward Simmons realizó por primera vez una investigación sobre extensómetros eléctricos de resistencia variable mediante hilos metálicos sensibles a la deformación, pegados a una superficie de la estructura a ensayar; dos años más tarde, Artur Ruge realizó un trabajo similar al anterior.

Frank Tatnall de la Balwin Locomotive Works bautizó al primer extensómetro eléctrico de resistencia variable con el nombre de SR-4, en honor de las personas que se consideraron más implicadas en su desarrollo, Edwards Simons y Artur Ruge.

En la segunda mitad de la década de los cuarentas se realizaron en Inglaterra trabajos de investigación para el desarrollo de extensómetros eléctricos de lámina impresa; pero fue hasta 1950 que recibieron por primera vez sería atención comercial en los Estados Unidos de Norteamérica.

A lo largo de los sesentas, diferentes empresas como Balwin-Lima-Hamilton Corporation, Budd Company y Micro-Measurements Inc., entre otras, se dedicaron a fortalecer sus estructuras corporativas para el desarrollo comercial de productos e instrumentos para el análisis experimental de esfuerzos.

En base al desarrollo tecnológico iniciado en la década de los sesentas hasta nuestros días, el análisis experimental de esfuerzos cuenta con equipos sofisticados para su aplicación, van desde equipos portátiles digitales como los PL 3500 ó PL 3650 hasta sistemas de información computarizada como el sistema 2100, 2400 ó el sistema 4000 de Measurements Group Inc. (vishay), siendo este último el más completo para el análisis experimental de esfuerzos en estructuras y materiales mediante la extensometría eléctrica.

CAPITULO 1

PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE LOS MATERIALES

OBJETIVO:

CONOCER LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS DE LOS MATERIALES.

1.1. GENERALIDADES

- INTRODUCCION

El análisis experimental de esfuerzos se refiere a los ensayos o pruebas de laboratorio y campo que se realizan a materiales de construcción, para determinar su estado de esfuerzos; las técnicas aplicadas miden deformaciones unitarias a partir de las cuales se obtienen los esfuerzos. Por ende, las relaciones entre esfuerzos y deformaciones constituyen temas que estudia la teoría de la elasticidad y la plasticidad. Ahora bien, ¿un esfuerzo que es?, en la forma más sencilla podemos decir que es la fuerza que tiende a deformar un material por tensión, compresión, flexión, torsión, o cortante, en una área dada.

Este concepto y otros más, se analizarán más específicamente en los siguientes apartados.

- EQUILIBRIO DE FUERZAS

Al aplicarle fuerzas externas a un cuerpo, si sus apoyos están soportados de tal manera que después de ocurrir una pequeña deformación no se permite ningún movimiento adicional, ya que el cuerpo se encuentra estáticamente equilibrado; esto es, las fuerzas internas contrarrestan exactamente a las fuerzas externas. Al fenómeno anterior se le llama equilibrio estático o equilibrio de fuerzas.

- FUERZA DE TENSION

Cuando se le aplica una fuerza a un material, de tal modo que éste es estirado, el material se deforma produciéndose una elongación, la cual se da por la separación de sus átomos haciendo intervenir fuerzas de atracción entre ellos. (fig. 1.1) A dicha fuerza se le denomina fuerza de tensión.



Figura 1.1 Fuerzas actuando a tensión

- FUERZA DE COMPRESION

Cuando se le aplica una fuerza a un material, de tal modo que éste es comprimido, el material se deforma produciéndose contracción longitudinal, la cual se da por la aproximación de sus átomos haciendo intervenir fuerzas de repulsión entre ellos. (fig. 1.2) A dicha fuerza se le denomina fuerza de compresión.

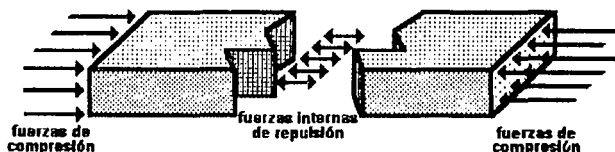


Figura 1.2 Fuerzas actuando a compresión

- ESFUERZO UNITARIO

Es la cantidad máxima de fuerza interna que soporta un material (tensión, compresión o cortante) por unidad de área.

Para ciertos métodos de diseño se suele aplicar un factor de seguridad para determinar un esfuerzo unitario que no se puede exceder cuando el material soporta ciertas cargas; a este esfuerzo permisible o esfuerzo de trabajo, se acostumbra expresarlo como la resistencia última del material, teniendo como unidades fuerza entre área, representándose con la letra griega minúscula sigma (σ).

- DEFORMACION UNITARIA

Es la deformación que sufre un material en cualquier dirección por unidad de longitud en esa dirección, siendo la deformación el cambio total en la dimensión del material. Se puede calcular dividiendo la deformación entre la longitud original, cuando ésta es constante en todo el material, representando su valor límite de diseño el cual no deberá ser excedido; el valor de la deformación unitaria entre un punto y otro del material generalmente varía. La deformación unitaria se representa con la letra griega minúscula épsilon (ϵ), teniendo por unidades longitud entre longitud, por lo que es adimensional. A veces se usa la expresión de deformación total para indicar el alargamiento en centímetros.

1.2. RELACION ESFUERZO-DEFORMACION

Al estar sometido a fuerzas externas, un material desarrollará uno o más de los siguientes tipos de deformación: elástica lineal, elástica no lineal, viscoelástica, inelástica, y plástica. Al aplicar cargas de diseño a los materiales estructurales, la mayoría de éstos exhiben deformaciones lineales elásticas, siendo la deformación unitaria directamente proporcional al esfuerzo unitario; al momento que no se cumple esta relación, en ese punto (Punto σ_{pr} fig. 1.3) se encuentra su límite de proporcionalidad. A esta relación se le conoce como la Ley de Hooke; esto es, a cargas axiales de tensión o compresión el esfuerzo es directamente proporcional a las deformaciones; se puede expresar esta relación de la siguiente manera:

$$\sigma = K\epsilon$$

donde:

σ = esfuerzo unitario en kg/cm^2

ϵ = deformación unitaria (adimensional)

K = constante de proporcionalidad en kg/cm^2

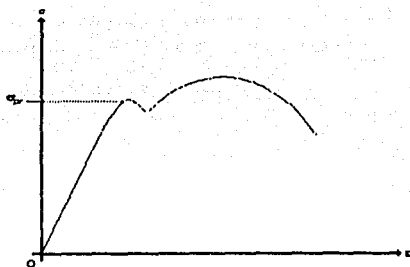


Figura 1.3 Límite de proporcionalidad

- DEFORMACION ELASTICA LINEAL

En el comportamiento elástico lineal la deformación es proporcional al esfuerzo, esto es, que a un material que está siendo cargado dentro del límite elástico, al retirarle la carga a la que se encuentra sometido, no presenta deformaciones permanentes. Los aceros estructurales tienen esta propiedad y se expresa de la forma antes mencionada:

$$\sigma = K\varepsilon$$

- DEFORMACION ELASTICA NO LINEAL

En el comportamiento elástico no lineal, al retirarle la carga al cuerpo de ensayo, éste no presenta deformaciones permanentes, y el esfuerzo no es proporcional a la deformación; la relación entre éstos se puede expresar de la siguiente manera:

$$\varepsilon = (\sigma/K)^{1/n}$$

donde:

K = módulo pseudoelástico determinado por pruebas

n = constante determinada por pruebas

σ = esfuerzo unitario en kg/cm^2

ε = deformación unitaria (adimensional)

- DEFORMACION VISCOELASTICA

Este tipo de deformación es similar a la deformación elástica lineal, la diferencia principal entre ellas es que en el comportamiento elástico lineal, la deformación deja de aumentar si no aumenta la carga, pero en el comportamiento viscoelástico la deformación continúa aumentando aunque la carga permanezca constante, manteniéndose una deformación residual cuando se retira la carga. Esto es característico de muchos plásticos.

- DEFORMACION INELASTICA

En la deformación inelástica, la deformación se puede recuperar por completo al retirarle la carga al cuerpo de ensayo, estando esta deformación en función del tiempo y siendo proporcional al cambio en el esfuerzo en cualquier instante dado. El efecto combinado de varios cambios en el esfuerzo es la suma de los efectos de cambio de éstos, considerados en forma individual.

- DEFORMACION PLASTICA

Este tipo de deformación no es proporcional al esfuerzo, quedando una deformación residual permanente al retirar la carga. Contrario al comportamiento inelástico, la deformación plástica depende en forma fundamental del esfuerzo, pudiéndose decir que a previos cambios en los esfuerzos la deformación plástica es independiente.

- CURVA ESFUERZO-DEFORMACION

La curva esfuerzo-deformación se utiliza para determinar las propiedades mecánicas de cualquier material, al realizarle una prueba de tensión o compresión, ésta aporta los datos necesarios para construir la curva antes mencionada. Se pueden tener varias curvas de esfuerzo-deformación para diferentes tipos de materiales típicos en ingeniería (fig. 1.4)

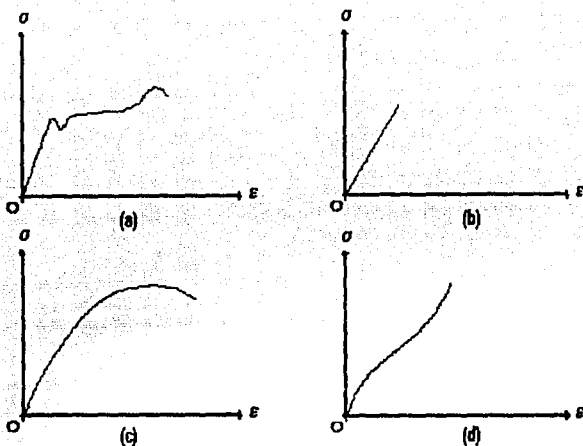


Figura 1.4 Curvas esfuerzo-deformación para materiales típicos de ingeniería
 a) Elástico lineal con límite de proporcionalidad definido,
 b) Frágil
 c) Elástico no lineal con límite de proporcionalidad no definido,
 d) Viscoelásticos como gomas o plásticos

Para poder explicar la relación entre esfuerzos y deformaciones analizaremos la curva esfuerzo-deformación para un acero, del cual podemos determinar las propiedades mecánicas, las cuales se definirán más adelante. Si se somete una barra a una fuerza de tensión o compresión en un sistema de coordenadas y se registra el valor de los esfuerzos aplicados y las deformaciones correspondientes, se obtendrá la curva esfuerzo-deformación, también conocida como diagrama de esfuerzos y deformaciones (representados por las ordenadas y las abscisas respectivamente). Analizando la curva esfuerzo deformación para el acero (fig. 1.5) podemos determinar lo siguiente:

-Dentro del límite elástico, los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones (σ_e). El material analizado es perfectamente elástico y válida la ley de Hooke, siendo un material que cumple con las siguientes características: que sea homogéneo, isótropo, elástico, lineal y continuo. El cociente de la relación del incremento de esfuerzos entre el incremento de las deformaciones dará el módulo de elasticidad.

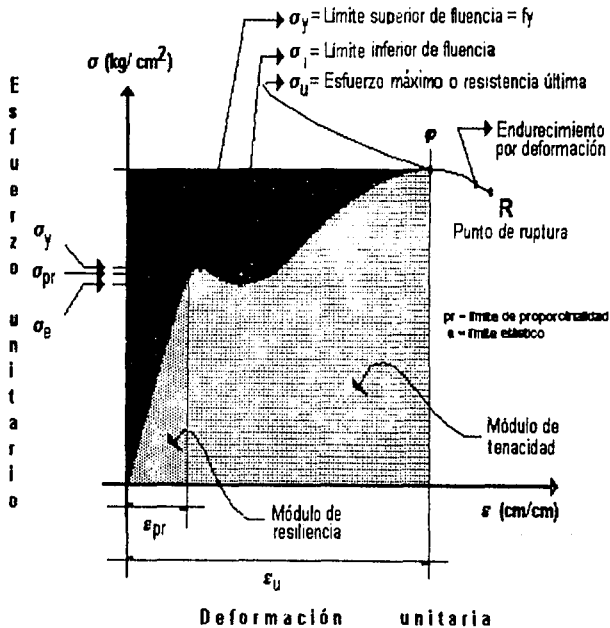


Figura 1.5 Curva esfuerzo-deformación para un acero de bajo contenido de carbono

-La curva comprendida entre el límite elástico σ_e y el límite superior de fluencia σ_y muestra un incremento en la deformación en relación con los esfuerzos, dentro de este intervalo se encuentra el límite de proporcionalidad (σ_{pr}) casi coincidente con el límite elástico (σ_e) en el cual todavía se consideran las deformaciones prácticamente elásticas. A partir del punto (σ_{pr}), el material pasará de un estado de deformaciones elásticas a un estado de deformaciones plásticas o permanentes, por lo que el límite elástico no deberá ser excedido por los elementos estructurales.

-El límite de fluencia superior o elástico aparente σ_y , indica un cambio en las propiedades elásticas del acero, es decir, a partir de este punto el material sufre una deformación pronunciada y una disminución en el esfuerzo hasta llegar a un punto de deslizamiento σ_i siendo éste el límite inferior de fluencia; a partir de este punto el acero muestra un aumento de resistencia al esfuerzo, pero con deformaciones pronunciadas hasta llegar a un máximo de resistencia del material ensayado o resistencia última, fenómeno conocido como estricción (punto σ_U).

-A partir de dicho máximo, las deformaciones crecerán y los esfuerzos sufrirán una disminución hasta llegar a la ruptura del acero, punto R en la figura 1.5.

-La relación σ_U/ϵ_U dará el coeficiente de calidad del acero. El área bajo la curva que va desde el origen hasta σ_U representa el trabajo de la deformación total, siendo igual al área creada por el rectángulo sombreado, definido por el producto $\sigma_U \times \epsilon_U$. Al área que está por debajo del diagrama esfuerzo-deformación se le conoce como módulo de tenacidad y es el trabajo desarrollado contra las fuerzas internas; Al área que está por arriba del diagrama esfuerzo deformación se le conoce como la energía complementaria de deformación.

-Al área bajo la curva que se forma desde cero hasta el límite de proporcionalidad determina el módulo de resiliencia, que es la capacidad para absorber energía en la zona elástica y es igual a la mitad de la carga por el alargamiento:

$$(\sigma_U \times \epsilon_U)/2;$$

1.3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES

Conocer las propiedades mecánicas de los materiales es importante, ya que una comprensión clara de la manera en que éstos se manifiestan ante las sollicitaciones es fundamental para entender como se forman, utilizan y se refuerzan los diferentes materiales utilizados en ingeniería. A partir del comportamiento elástico e inelástico de un material al ser sollicitado se pueden definir sus propiedades mecánicas. Para ello utilizaremos la curva esfuerzo-deformación para el acero (fig. 1.5).

- LIMITE DE PROPORCIONALIDAD

A la ordenada σ_{pr} se le conoce como límite de proporcionalidad, siendo éste el máximo esfuerzo que se puede producir durante un ensayo de tensión simple para el cual la relación esfuerzo-deformación es lineal. (ésto es proporcional a la deformación).

- LIMITE ELÁSTICO

La ordenada σ_e que casi coincide con σ_{pr} se conoce como límite elástico; siendo éste, el máximo esfuerzo que se puede imponer al material sin que haya deformación permanente cuando se remueve la carga en un ensayo de tensión simple. Se considera al límite elástico y al límite de proporcionalidad iguales para muchos materiales, dado que son casi idénticos sus valores numéricos; en los casos que no sucede ésto, el límite elástico por lo general es menor al límite de proporcionalidad.

- ZONA ELASTICA

Región de la curva esfuerzo-deformación que inicia a partir del origen y termina hasta la abscisa del límite de proporcionalidad; también se le conoce como período elástico del material.

- ZONA PLASTICA

Región de la curva esfuerzo-deformación que inicia a partir de la abscisa del límite de proporcionalidad y termina hasta la abscisa del punto de ruptura R. Esta zona se puede dividir en dos: período plástico y zona de grandes alargamientos.

- LIMITE ELASTICO APARENTE O DE FLUENCIA

Al lugar donde se inicia un incremento de deformación sin aumento de esfuerzo se le conoce como límite elástico aparente o límite de fluencia del material, siendo éste la ordenada σ_y en la curva de esfuerzo-deformación; llegando a este punto se dice que se produce fluencia, es decir, deformaciones permanentes en el material aún retirándole la carga. Para cierto tipo de materiales se presentan en la curva de esfuerzo-deformación dos puntos en los que hay aumento de deformación sin que aumente el esfuerzo, que son el límite inferior de fluencia (ordenada σ_l) y límite superior de fluencia (ordenada σ_y) en la curva antes mencionada.

- RESISTENCIA A TENSION

Es la carga máxima que puede soportar un material durante un ensayo de tensión simple, siendo la ordenada σ_u en la curva esfuerzo-deformación, llamándose también resistencia última a la tensión. A partir de este punto el material presenta grandes deformaciones y disminuye el esfuerzo, presentándose el fenómeno de estricción el cual se analizará más adelante

- RESISTENCIA DE RUPTURA

A la ordenada del punto R (justamente antes de la falla) se le llama resistencia de ruptura del material; en este punto se produce la deformación máxima posible. (abscisa del punto R)

- MODULO DE RESILIENCIA

Es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para "esforzar" el material desde una condición de esfuerzo cero hasta la abscisa del límite de proporcionalidad σ_{pr} ; puede calcularse por el área bajo la curva esfuerzo-deformación desde el origen hasta el límite de proporcionalidad, representada por la superficie sombreada, las unidades en que se mide son fuerza entre volumen. Puede interpretarse la resiliencia de un material como su capacidad de absorber energía cuando se deforma elásticamente y devolverla cuando se descarga.

- MODULO DE TENACIDAD

Es el trabajo realizado por volumen unitario de material, cuando se aumenta una fuerza de tensión simple gradualmente desde cero hasta el punto de ruptura, siendo éste el área total que se crea bajo la curva de esfuerzo-deformación comprendida entre estos dos puntos. Se puede decir que la tenacidad de un material es su capacidad de absorber energía en la zona plástica.

- ESTRICCIÓN

Es la relación entre la disminución del área de la sección transversal con respecto a la inicial, dividida entre el área inicial y multiplicada por cien. En otras palabras, cuando el esfuerzo alcanza el valor en el cual el material empieza a fluir, provocando que la sección de una parte de la probeta comience a disminuir, a partir de este alargamiento o esfuerzo constante es preciso aumentar la fuerza de tensión sobre la probeta. A este fenómeno se le conoce como estricción, considerándose como una medida de la ductilidad del material.

- ALARGAMIENTO DE RUPTURA

Es la relación entre el aumento de la longitud patrón y la longitud inicial multiplicada por cien en un cuerpo ensayado a tensión simple; al igual que la estricción, se considera al alargamiento de ruptura como una medida de ductilidad del material.

- ESFUERZO DE TRABAJO

Es el esfuerzo real que soporta el material bajo la acción de cargas, no debiendo sobrepasar el esfuerzo admisible, que es el máximo esfuerzo al que puede ser sometido el material. Frecuentemente este esfuerzo se determina simplemente dividiendo el esfuerzo en la fluencia o ruptura por un número llamado coeficiente de seguridad. La elección de este coeficiente se basa en el buen juicio y experiencia del proyectista o se llegan a especificar en los reglamentos de la construcción, en el cual se encuentran valores determinados de coeficientes de seguridad. Por ello, los esfuerzos de trabajo admisibles deben estar dentro de la zona elástica del material.

En un material frágil donde la curva esfuerzo-deformación no es lineal, es decir, que no tiene una zona donde los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones, se pueden observar o medir otras propiedades mecánicas como son:

- LIMITE ELASTICO CONVENCIONAL

A la ordenada σ_e' de la curva esfuerzo-deformación (fig. 1.6) para la cual se ha predeterminado una deformación permanente al suprimir la carga y aplicársela de nuevo se le llama límite elástico convencional del material. Se puede tomar como deformación permanente al suprimirle la carga a un valor igual al 0.2 o 0.35 % de la deformación unitaria (0.002 o 0.0035 cm por cm.), siendo estos valores empíricos con base en ensayos realizados. Para materiales donde la curva esfuerzo-deformación no es lineal, se considera una deformación permanente ϵ_1 en el eje de las deformaciones y se ha trazado una recta de O'-Y paralela a la tangente inicial a la curva. A la ordenada del

punto de intersección de esta recta con la curva esfuerzo-deformación σ_e' , se le denomina límite elástico convencional o pseudoelástico del material, conocido también como esfuerzo de prueba.

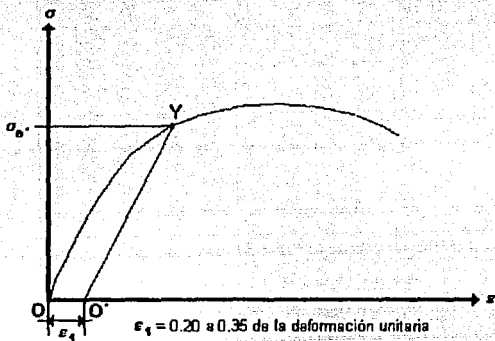


Figura 1.6 Determinación del límite elástico convencional.

- MODULO TANGENTE

Si se traza una línea recta que sea tangente a la curva esfuerzo-deformación desde el origen, se tendrá la llamada línea del módulo. A la pendiente de esta línea se le conoce como módulo tangente del material.

- COEFICIENTE DE DILATACION LINEAL

Se define como la variación por unidad de longitud de una barra recta cuando sufre un cambio de temperatura de un grado. El valor de este coeficiente es independiente de la unidad de longitud, pero depende de la temperatura empleada. La variación de temperatura en una estructura da origen a las tensiones internas al igual que las cargas aplicadas.

Donde

ϵ = Deformación unitaria en eje indicado

μ = Relación de Poisson

σ = Esfuerzo unitario n en eje de las x

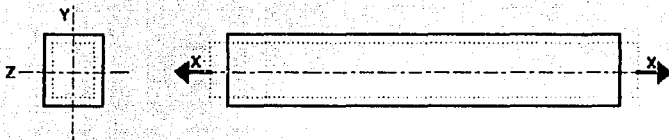


Figura 1.7 Deformaciones longitudinales y transversales

Donde μ es denominado como la relación de Poisson o coeficiente de Poisson, que es constante para cada material. Para materiales isótropos, es decir que presentan las mismas propiedades físicas en todas direcciones el valor de este coeficiente es aproximadamente igual o constante a 0.25. Para el acero dulce en deformaciones elásticas por lo general se toma un valor de μ igual a 0.30, para el aluminio y el cobre que son deformados de la misma manera que el acero los valores de μ son ligeramente mayores. La expresión de la cual se obtiene la relación de Poisson es la siguiente:

$$\mu = \epsilon_T / \epsilon_L$$

Donde:

ϵ_T = Deformación transversal

ϵ_L = Deformación longitudinal

1.6. ESFUERZOS Y DEFORMACIONES PRINCIPALES

- Esfuerzo

Quando un cuerpo esta sometido a una carga exterior (P) y el material del que está hecho resiste, transmite dicha carga a lo largo de su sección transversal interna, la cual tiene una reacción de la misma magnitud,

1.4. MODULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad (E) o módulo de Young es una medida de la rigidez de un material y es utilizada en la relación que representa matemáticamente a la ley de Hooke

$$\sigma = K \epsilon$$

Sustituyendo la constante de proporcionalidad (K) por la del módulo de elasticidad (E), la ecuación anterior queda como sigue:

$$\sigma = E \epsilon$$

Entendiéndose que para un esfuerzo dado los valores grandes de E producen deformaciones elásticas menores, esto significa que mientras más alto sea el módulo de elasticidad, será menor la respuesta del material a un esfuerzo dado, teniendo como unidades fuerza entre área. El valor del módulo de elasticidad es diferente para cada material según se observa en la tabla siguiente.

VALORES DE MODULO DE ELASTICIDAD (E) DEL MATERIAL

MATERIAL	E (kg / cm ²)
Acero (0.15-0.30% C)	2.10 X 10 ⁶
Acero (3-3.5% Ni)	2.10 X 10 ⁶
Fundición gris	1.05 X 10 ⁶
Concreto (1:2:3.5)	1.76 X 10 ⁶
Madera de pino	1.27 X 10 ⁶
Madera de roble	1.12 X 10 ⁶
Aluminio; Fundición (99% Al)	0.70 X 10 ⁶
Latón (60% Cu; 40% Zn)	0.90 X 10 ⁶
Bronce (90% Cu; 10% Sn)	0.80 X 10 ⁶
Cobre	0.90 X 10 ⁶

El módulo de elasticidad es una propiedad mecánica prácticamente sensible de cualquier material usado en Ingeniería, ya que a mayor temperatura la magnitud del módulo de elasticidad disminuye y por ende su rigidez. Este fenómeno se debe a un comportamiento entre los átomos del material siendo éste inverso al módulo de elasticidad es decir que la relación entre las distancias interatómicas o interiónicas del material (metales y cerámicas respectivamente) y el módulo de elasticidad son del tipo inverso, por lo que al aumentar la temperatura incrementa la separación de equilibrio entre los átomos o iones y el módulo de elasticidad disminuye respectivamente.

El módulo de elasticidad se puede determinar gráficamente a partir de la pendiente de la porción inicial recta de la curva esfuerzo-deformación (fig. 1.5), o matemáticamente a partir de la ley de Hooke

$$\sigma = E\varepsilon$$

Despejando el módulo de elasticidad tenemos:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

O bien

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

(En la región lineal de la curva esfuerzo-deformación)

Existe también otro módulo de elasticidad, pero este es provocado por un esfuerzo cortante unitario entre una deformación angular unitaria. A este módulo se le denomina módulo de elasticidad a esfuerzo cortante, de rigidez o módulo de Coulomb; determinado por la siguiente ecuación:

$$G = \nu / \gamma = E / (2(1 + \mu)) \quad G = \frac{\text{esfuerzo cortante unitario}}{\text{deformación angular unitaria}}$$

donde:

G = Módulo de rigidez

v = Deformación cortante unitaria

γ = Deformación angular unitario

E = Módulo de elasticidad

μ = Relación de Poisson

La ecuación anterior tiene las mismas unidades que el módulo de elasticidad (E), ya que μ (relación de Poisson) es adimensional, variando esta magnitud según el tipo de material en estudio. A continuación tenemos algunos valores de G para diferentes tipos de materiales.

VALORES DE MODULO DE ELASTICIDAD G DEL MATERIAL

MATERIAL	G (kg / cm ²)
Acero (0.15-0.30% C)	8.44 X 10 ⁵
Acero (3-3.5% Ni)	8.44 X 10 ⁵
Fundición gris	4.22 X 10 ⁵
Aluminio, Fundición (99% Al)	2.80 X 10 ⁵
Latón (60% Cu; 40% Zn)	3.52 X 10 ⁵
Bronce (90% Cu; 10% Sn)	4.22 X 10 ⁵
Cobre	4.22 X 10 ⁵

1.5. RELACION DE POISSON

En un material ensayado a tensión simple se observa que simultáneamente al alargamiento del material se produce una disminución de las dimensiones de la sección transversal de éste. Para una pieza de sección longitudinal y transversal regular como un rectángulo (fig. 1.7) las deformaciones transversales se norman por las siguientes expresiones

$$\epsilon_y = -\mu (\sigma_{nx} / E) ; \epsilon_z = -\mu (\sigma_{nx} / E)$$

pero en sentido opuesto a ella; es decir, que al aplicarle una carga al material, la fuerza interna (P') que se produce es distribuida en toda el área de la sección transversal (BB') del material (fig. 1.8), el esfuerzo (σ) que se crea en cada área unitaria o elemental (ΔA) se debe oponer a la carga externa (P). Si se tuviese un material de mayor sección que otro, éste soportaría más carga externa, pero el esfuerzo límite en área transversal unitaria o elemental sería el mismo que el anterior conduciendo a la idea de que la resistencia de un material está medida en términos de carga (P) por unidad de área (A) y se calcula :

$$\sigma = P/A$$

- Esfuerzos Principales.

Si tomamos una sección distinta de la perpendicular al eje del cuerpo y se aplica una fuerza resultante P como se muestra en la figura 1.9, dicha resultante surge de la relación de dos fuerzas, una que es la normal a la sección (N) y otra que actúa tangencialmente a la superficie de la sección oblicua (T). Siendo ésta una componente adicional que da el equilibrio al sistema de fuerzas.

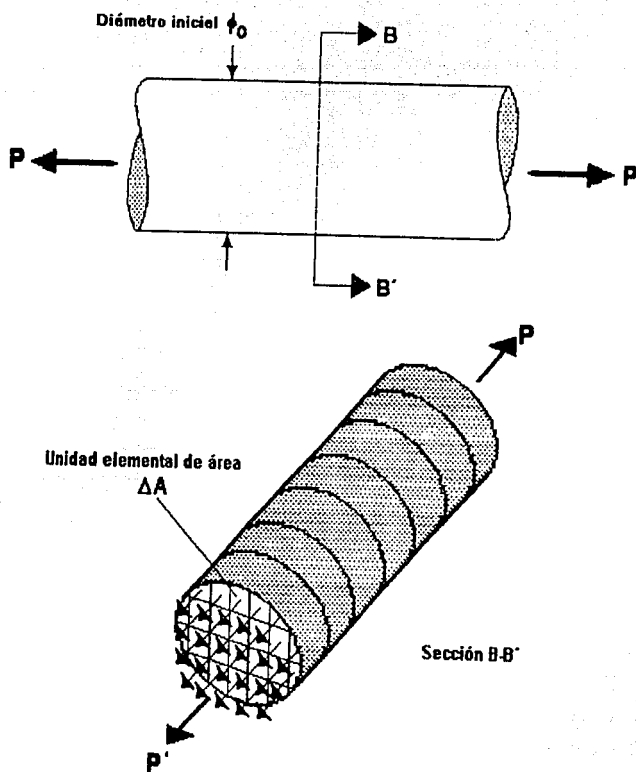


Figura 1.8 Respuesta de una barra cilíndrica a la aplicación de una carga. El corte muestra una resistencia uniforme que equilibra a (P).

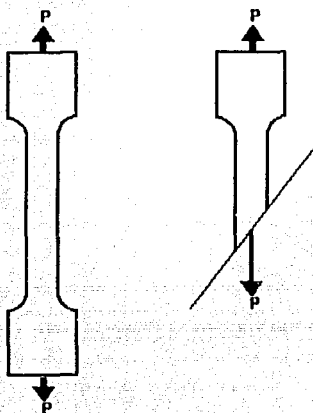


Fig 1.9 Fuerza resultante al aplicar una carga

Estas dos componentes del sistema de fuerzas en el material resistente son completamente diferentes, ya que estas fuerzas al dividirías por las áreas de sección transversal y oblicua del material nos crean dos tipos de esfuerzos fundamentales, $\sigma = N/A$ llamado esfuerzo normal y $\tau = T/A$, llamado tensión cortante.

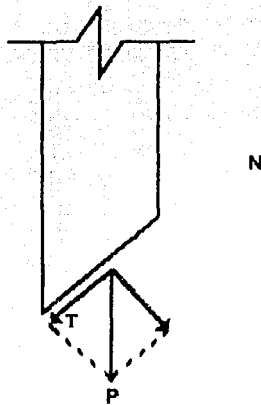


Figura 1.10 Componentes de la fuerza resultante (P)

Las componentes del sistema de fuerzas (fig. 1.10) definen un plano que contiene todos los esfuerzos, a esta condición se le conoce como estado de esfuerzos de dos dimensiones, biaxial o plano. Si tomamos un plano XY como plano de esfuerzos, se puede representar un estado general de esfuerzos bidimensional que actúan en una partícula (fig. 1.11), ésta se encuentra sometida a una combinación de esfuerzos normales (sean de tensión o compresión, positiva o negativa respectivamente) y de esfuerzo cortante, representándose de la siguiente manera:

σ_x = Esfuerzo normal sobre un plano cuya normal es paralela al eje X

σ_y = Esfuerzo normal sobre un plano cuya normal es paralela al eje Y

τ_{xy} = Esfuerzo cortante; primer subíndice es la dirección normal donde actúa el esfuerzo, el segundo subíndice es la dirección del esfuerzo en dicho plano.

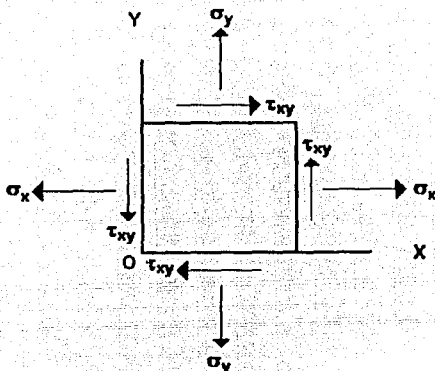


Figura 1.11 Equilibrio de esfuerzos en un elemento ortogonal.

Para que se mantenga el equilibrio en el sistema de fuerzas que actúan sobre el elemento, se tiene que $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ dado que se tomaron momentos con respecto al origen del sistema teniendo de esta manera una combinación de tres esfuerzos: σ_y , σ_x y $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ en el elemento.

Si tuviéramos un eje de coordenadas $x'-y'$ (fig. 1.12) girado un ángulo θ con respecto a los ejes $x-y$, el tratamiento al equilibrio de fuerzas sobre el elemento trapezoidal sería diferente, lo que nos lleva a las siguientes relaciones de esfuerzo:

$$\sigma_{x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots (a)$$

$$\sigma_{y'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots (b)$$

$$\tau_{x'y'} = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta \quad \dots\dots\dots (c)$$

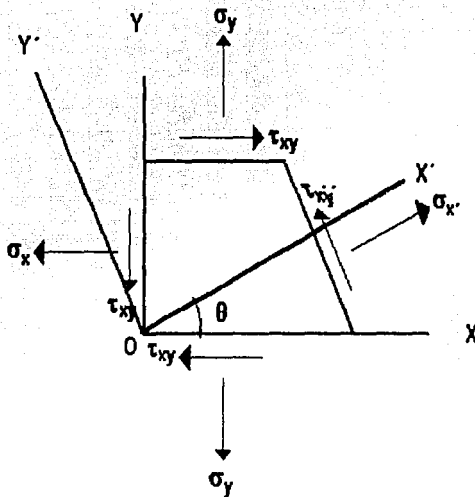


Figura 1.12 Equilibrio de esfuerzos en un elemento oblicuo

Las ecuaciones anteriores demuestran que para cualquier orientación de ejes X'-Y' hay un sistema de fuerzas que hace nulo el esfuerzo cortante $\tau_{x'y'}$, y que en esos planos los esfuerzos normales sean un máximo y un mínimo en el punto estudiado, esto solo ocurre cuando el ángulo θ entre el eje X y el X' vale:

$$\text{Tg } 2\theta = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

Siendo X' y Y' orientados convenientemente de acuerdo a las necesidades del estudio, los ejes principales, por lo tanto los esfuerzos normales σ_{\min} y σ_{\max} de dichos ejes son los esfuerzos principales (σ_x , σ_y) de ese punto.

- CIRCULO DE MOHR EN LA DETERMINACION DE ESFUERZOS

En el análisis de esfuerzos principales otra herramienta usada es el Círculo de Mohr, la cual constituye una ayuda poderosa para visualizar las relaciones entre esfuerzos en un punto. Para ello se utiliza un plano cartesiano en el cual las abscisas son esfuerzos normales y las ordenadas son esfuerzos cortantes. Las ecuaciones siguientes:

$$\sigma_x' = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta$$

$$\tau_{xy}' = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta$$

darán las coordenadas de un punto. Estas ecuaciones son la combinación de esfuerzos sobre el plano x' y y' el cual pasa por la posición en la que el estado de esfuerzos es conocido; variando el ángulo θ desde 0 hasta 360 grados y calculando las abscisas y ordenadas correspondientes se obtendrá un círculo que representa el lugar geométrico de dichos puntos, cuyo centro en el eje horizontal es el punto:

$$A\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

y cuyo radio es:

$$B_o = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

Como las ecuaciones (a) y (c) (vease páginas 1-22 y 1-23) se expresan en función de 2θ , todas las relaciones angulares alrededor del punto de interés se duplican en el Círculo de Mohr. El ángulo 2θ se define por la relación del esfuerzo normal y esfuerzo cortante del estado de esfuerzos, que en dicho punto se presenta de la siguiente manera:

Se consideran como esfuerzos normales positivos en el eje de las abscisas a los que producen efectos de tensión, y en caso contrario serían esfuerzos normales negativos en el eje de las abscisas a los que producen efectos de compresión.

El asignar el signo positivo o negativo al esfuerzo cortante es arbitrario, esto depende de la convención del signo que se tome para el momento que crea dicho esfuerzo con respecto al punto de estudio; pudiendo ser esfuerzo cortante positivo, en el sentido de las manecillas del reloj, y esfuerzo cortante negativo en el caso contrario.

El ángulo 2θ es el que se forma en la diagonal trazada entre los puntos XY del Círculo de Mohr (fig. 1.13) y el eje horizontal del plano cartesiano. Los esfuerzos principales en el círculo de Mohr se presentan en los puntos de intersección 1 y 2 (fig. 1.13) del círculo con el eje de las abscisas del plano cartesiano, sin olvidar que cuando se presenta este caso los esfuerzos de cortante τ_{xy} son nulos y que los valores negativos y positivos de los esfuerzos normales serán de compresión o tensión respectivamente.

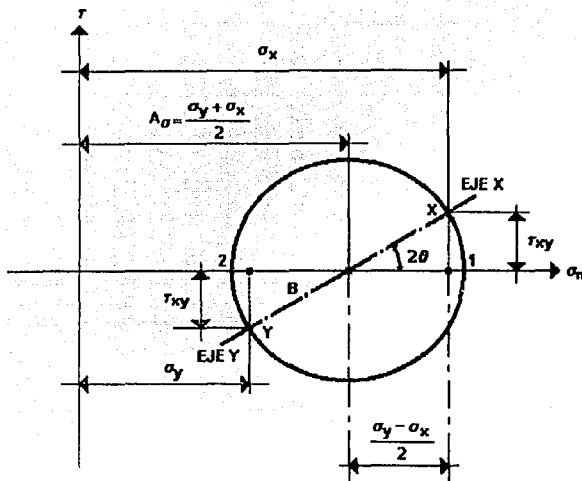


Figura 1.13 El Círculo de Mohr en la determinación de esfuerzos principales.

-DEFORMACION

Robert Hooke fue el primero en afirmar que muchos materiales se comportan de forma aproximadamente lineal siendo la deformación proporcional a la carga aplicada. Esta afirmación es la base de la mayor parte de la teoría de la elasticidad. Se puede suponer entonces, que al tener una barra de cierta longitud, aplicándole una determinada fuerza de tensión simple, se provoca en la barra un alargamiento longitudinal y si ésta tuviera dos veces su longitud se alargaría el doble. Esto nos conduce al concepto de alargamiento unitario o deformación unitaria,

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

que es el resultado de la aplicación de cierta carga a la sección transversal del elemento, en la dirección de la aplicación de la carga, en la figura 1.14 se observan dos tipos de deformaciones unitarias, una de ellas es la deformación normal (ϵ), siendo ésta el alargamiento o acortamiento, la otra es la deformación cortante (γ), siendo ésta una distorsión angular dada en radianes. Estas deformaciones resultantes son el producto de esfuerzos normales y cortantes vistos en la figura 1.14 de una manera exagerada; las deformaciones unitarias provocan un cambio de longitud en la diagonal del elemento.

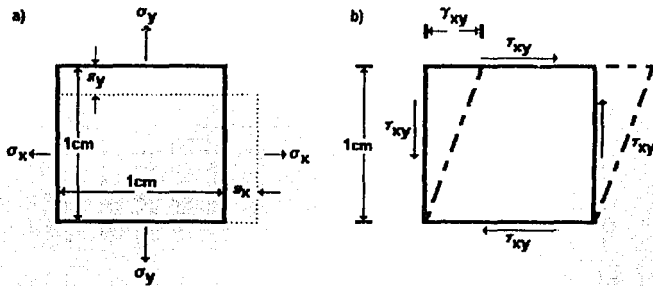


Figura 1.14 a) Deformación normal. b) Deformación por esfuerzo cortante.

Si se consideran deformaciones lo suficientemente pequeñas de tal manera que sólo necesiten tenerse en cuenta los efectos de primer orden y teniendo ejes principales x' y y' girados con respecto a los ejes x y y , el estado de deformaciones definidos en estos ejes como la combinación $\epsilon_{x'}$, $\epsilon_{y'}$ y $\gamma_{x'y'}$, quedaría de la siguiente manera:

$$\epsilon_{x'} = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} + \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta$$

$$\epsilon_y' = \frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} - \frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \cos 2\theta + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta$$

$$\gamma_{xy}' = \gamma_{xy} \cos 2\theta - (\epsilon_x - \epsilon_y) \sin 2\theta$$

Donde θ es el ángulo entre los ejes $+x$ y $+x'$ (fig. 1.12), estas ecuaciones con respecto a las ecuaciones (a), (b), y (c) para esfuerzos principales en lo único que varían es en que se sustituye ϵ por σ y $\gamma/2$ por τ lo que nos lleva a que esta similitud entre ecuaciones de tensiones y deformaciones se pueden convertir, éstas, haciendo las sustituciones pertinentes.

Puede encontrarse una pareja de ejes principales de deformación girando a partir de x - y el siguiente ángulo:

$$\tan 2\theta = \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x + \epsilon_y}$$

La deformación unitaria cortante es nula con respecto a los ejes x' y y' ; tomando en las abscisas a la deformación normal ϵ , y en las ordenadas a la mitad de la deformación cortante $\gamma/2$ se puede dibujar un círculo de Mohr para deformaciones unitarias, teniendo así que el centro del círculo de Mohr queda definido por la siguiente relación:

$$A_{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2}$$

y el radio está dado por la siguiente ecuación:

$$B_{\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + (\gamma_{xy})^2}$$

La deformación experimental de un estado de deformación unitaria en dos dimensiones que está definido por tres parámetros ε_x , ε_y , γ_{xy} en relación con unos ejes determinados, o si no, por las deformaciones principales y su giro θ con respecto a uno de sus ejes determinados, requiere de tres medidas independientes en el mismo punto, dado que las deformaciones unitarias normales son mucho más fáciles de medir que las deformaciones unitarias cortantes, por lo que optamos por medir deformaciones unitarias normales en tres direcciones y resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\varepsilon_{\theta_1} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1$$

$$\varepsilon_{\theta_2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2$$

$$\varepsilon_{\theta_3} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_3 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_3$$

determinando ε_x , ε_y , γ_{xy}

Se sugiere escoger ángulos θ de 0, 45 y 90 grados o de 0, 60 y 120 grados, esto provoca una simplificación en el cálculo y la consiguiente determinación de los esfuerzos principales.

FAGINACION

VARIA DA

CAPITULO 2

ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS

OBJETIVO:

MENCIONAR Y EXPLICAR LOS PRINCIPALES METODOS EXPERIMENTALES PARA LA DETERMINACION DE ESFUERZOS.

En este capítulo se dará una breve explicación sobre los principales métodos empleados para el análisis experimental de esfuerzos, así como las ventajas y desventajas para su aplicación.

Los análisis experimentales de esfuerzos y deformaciones son importantes para complementar los estudios teóricos, ya que en muchos casos es muy difícil analizar teóricamente a los miembros o estructuras debido a su configuración geométrica, el tipo de carga aplicada ó el acceso al lugar de análisis; provocando ésto soluciones engorrosas, antieconómicas o bien, imposibles. En tal caso, se recurre a los métodos experimentales para encontrar las soluciones más factibles a los diferentes problemas que se puedan presentar, apoyado ésto en todo un estudio de análisis experimental que en general, es igual para cualquier método que se aplique teniendo en lo particular un tratamiento diferente para obtener los datos y resultados.

Se emplean los métodos experimentales también para verificar las predicciones teóricas y en su caso ir corrigiendo las anomalías que se vayan presentando en el miembro o estructura de análisis. También es posible usar una aproximación experimental para determinar los esfuerzos, las deformaciones o las distribuciones de los mismos, para cuando se es desconocida la aplicación de la carga o la distribución de la misma.

2.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

El análisis experimental de esfuerzos o deformaciones se basa en mediciones de desplazamientos de longitud y de tiempo porque directamente el esfuerzo y la deformación no se pueden medir, ya que éstos son valores resultado de operaciones matemáticas; entre los desplazamientos, la longitud, el tiempo y valores constantes que se aplican en el análisis matemático.

Posiblemente la medición más común en la mecánica experimental, sea la deformación superficial en una pequeña longitud de medida, de manera indirecta, por lo que cualquier dispositivo empleado para medir deformaciones en la superficie se llama medidor de deformación, apoyándose en diferentes fenómenos como la refracción de la luz, la variación de resistencia eléctrica, la interferencia de líneas, por desplazamiento de un punto, etc.

2.2. METODOS DE EXTENSOMETROS MECANICOS

Las técnicas más empleadas antiguamente para la determinación de esfuerzos y deformaciones son las de tipo mecánico. Estas técnicas se basan en el cambio de las dimensiones de la probeta medidas directamente en ella.

El principio básico de operación en los extensómetros de tipo mecánico, consiste en amplificar los desplazamientos relativamente pequeños en valores apreciables a simple vista; se utilizan diferentes métodos de amplificación, los cuales se pueden clasificar de la siguiente forma:

Básicos:

- a) Palanca simple.
- b) Palanca múltiple.
- c) Palanca óptica.
- d) Relojes micrométricos.
- e) Medida directa sobre grandes distancias.

Transductores:

- a) Celda fotoeléctrica.
- b) Variación del campo magnético.
- c) Variación de acoplamiento del transformador (inductancia).
- d) Variación de la capacidad de un condensador.
- e) Presión de aire y variación de caudal debido a modificaciones de orificios.
- f) Vidrios planos.
- g) Extensómetro eléctrico de resistencia variable.
- h) Resistencia de contacto deslizando.
- i) Pila de carbón.

La combinación de dos o más métodos de amplificación, darán

como resultado una mayor precisión en el extensómetro mecánico en comparación, si sólo se usara uno de ellos. Se deben tener en cuenta muchos factores que limitan el uso de los diferentes métodos de amplificación ya que ninguno de ellos en forma aislada podrá satisfacer todos los requisitos necesarios para una buena amplificación; éstos requisitos son:

- 1) Factibilidad de lectura.
- 2) Factibilidad de montaje.
- 3) Sensibilidad.
- 4) Exactitud.
- 5) Precisión.
- 6) Personal calificado.
- 7) Vida útil.
- 8) Rango de medición.
- 9) Tamaño.
- 10) Respuesta dinámica.

En base a lo anterior los extensómetros mecánicos deben cumplir con ciertas características que son:

Condiciones de lectura

Para que un operador pueda observar las lecturas con precisión en extensómetros construidos con una sola aguja y escala, se deben observar ciertas limitaciones en la anchura de la división, la cual no deberá ser menor de 0.1 mm; el espacio mínimo entre dichas divisiones debe ser de unos 0.6 mm y una punta afilada en la aguja de medición, la cual deberá no ser menor de 0.1 mm de la división.

Vida útil

Uno de los problemas en relación con la vida útil de un extensómetro mecánico es en el diseño correcto de sus partes por la existencia de fricciones en los diferentes puntos de giro y apoyo, su construcción debe ser lo más ligera y rígida posible ya que las fuerzas

requeridas para sostenerlas y moverlas son de lo más pequeñas.

Un segundo factor que afecta a las cargas que han de soportar a los diferentes puntos de giro y apoyo son las fuerzas necesarias para transmitir los cambios de longitud que surjan, al ensayar una probeta el extensómetro mecánico que emplee palancas mecánicas para la amplificación requiere de dos puntas afiladas, las cuales penetran mínimamente en la superficie a ensayar; éstas minimizan la posibilidad de deslizamiento entre los dos puntos de apoyo. La distancia entre estas puntas afiladas se denomina distancia base para medida de alargamientos. Se acostumbra hacer pequeñas rayas o agujeros en la superficie de la pieza a ensayar para asegurar que no se produzca ningún tipo de desplazamiento.

Pivotes

La utilización de los diferentes tipos de pivotes que sean adecuados en palancas de amplificación para extensómetros mecánicos deben estar condicionados por la magnitud requerida de movimiento angular, la fricción que puede desarrollar y la rigidez que presenten en su manejo y trabajo; pero en el caso de usar los pivotes que cumplan lo mejor posible con las condiciones antes mencionadas, se cae en el problema de limitaciones en movimiento angular, tal es el caso del pivote tipo "cuchilla" o punta cónica, el cual tiene un mínimo de fricción pero también un escaso movimiento angular, o en el caso de un buje o un eje convencional alojado en un orificio circular, da un ilimitado movimiento angular, pero también da lugar a una mayor cantidad de rozamiento y la holgura entre eje y orificio hará peligrar la precisión o exactitud de la lectura. Un último tipo de pivote es aquel que emplea placas delgadas, flexibles (fleje) en los lugares donde se requiera girar. Este tipo de pivote elimina por completo la fricción por no existir rozamiento entre dos superficies pero sacrificando la capacidad de un amplio movimiento angular y sólo se pueden emplear pequeñas fuerzas de trabajo. A continuación mencionaremos brevemente los extensómetros mecánicos más comunes en la determinación de esfuerzos y deformaciones.

TIPOS DE EXTENSOMETROS MECANICOS

- EXTENSOMETROS MECANICOS DE LECTURA DIRECTA

Los extensómetros mecánicos de lectura directa los hay de dos tipos:

- a) Extensómetro Whittemore.
- b) Extensómetro De Forest con registro rayado.

Este tipo de extensómetros se pueden encontrar de diferente variedad según la marca y modelo en que lo presente el distribuidor; pero el principio básico de operación siempre será el mismo.

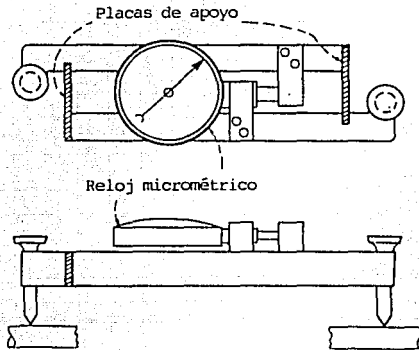
Extensómetro de Whittemore

En este tipo de extensómetros no se utiliza la sensibilidad del micrómetro empleado para medir los desplazamientos. (figura 2.1) El mecanismo empleado en este instrumento se basa en dos barras conectadas por medio de placas flexibles, cada una de estas barras usa puntas cónicas como pivote, limitando la base de medida; en una de las barras es fijado un micrómetro y en la otra barra se apoya el palpador.

El extensómetro mecánico de Whittemore tendrá como capacidad máxima de desplazamiento la que suministre el micrómetro empleado.

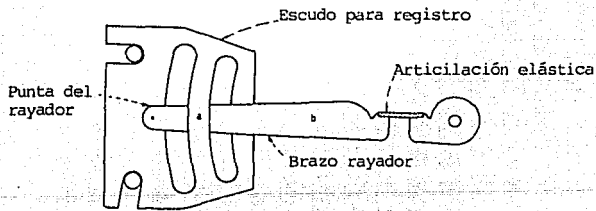
Extensómetro de Forest con registro rayado

En los extensómetros mecánicos de este tipo (figura 2.2), se tienen básicamente dos mecanismos que son: una palanca de registro y un brazo rayador los cuales se unen a la probeta por cualquier método de fijación adecuado, pueden ser pegados, soldados o atornillados. Este tipo de extensómetros tienen la ventaja de que se emplean en ensayos estáticos y dinámicos siendo económicos y sencillos de construir requiriendo un mínimo de supervisión para su operación.



Extensómetro de Whittemore

Figura 2.1



Extensómetro De Forest con registro rayado

Figura 2.2

- EXTENSOMETROS DE AMPLIFICACION MECANICA SENCILLA

Este tipo de extensómetros se pueden encontrar de dos tipos: los de cuña y los de palanca - micrómetro.

Extensómetro de cuña

Este extensómetro consiste en una placa en forma de cuña con un ángulo muy pequeño entre los dos lados (figura 2.3). Cuando se coloca entre dos puntos fijos en la probeta pueden apreciarse separaciones muy pequeñas entre estos puntos debido a la relación que presentan los catetos, si esta relación fuera de 1 : 10 el factor de amplificación será de 10. Este tipo de extensómetros pueden reducir también los grandes desplazamientos que se presenten en un ensayo, lo cual permite utilizar aparatos de reducida capacidad de medida.

Extensómetros de palanca - micrómetro

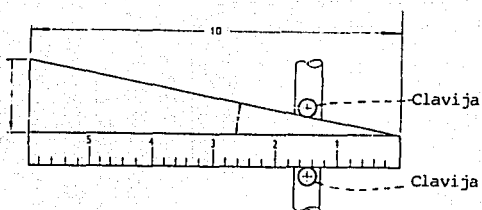
Existen dos tipos comerciales de estos extensómetros : el modelo Berri (figura 2.4) y el de Tinius Olsen (figura 2.5) que utilizan una simple palanca para la amplificación del desplazamiento que actúa sobre un micrómetro para poder tener una lectura clara.

- EXTENSOMETROS MECANICOS DE PALANCAS MULTIPLES

Los hay de dos tipos: los Porter-Lipp y los Huggenberger, estos extensómetros mecánicos se caracterizan por ser ligeros y compactos.

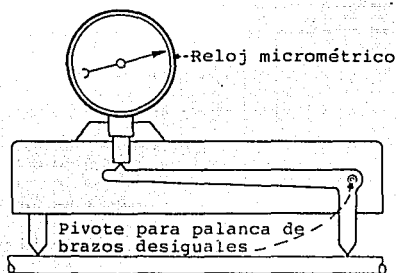
Extensómetros Porter-Lipp

Son instrumentos con un rango de medición relativamente pequeño. Su sistema de fijación se realiza a base de un muelle que rodea a la probeta y dos puntas afiladas para el apoyo de la palanca. (figura 2.6)



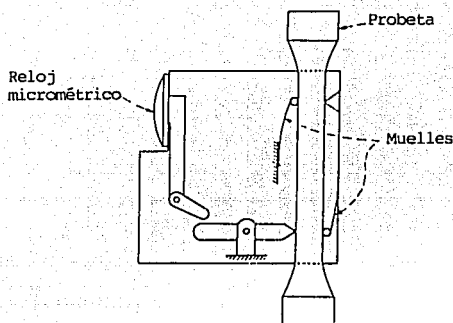
Extensómetro de cuña

Figura 2.3



Extensómetro de palanca modelo Berri

Figura 2.4



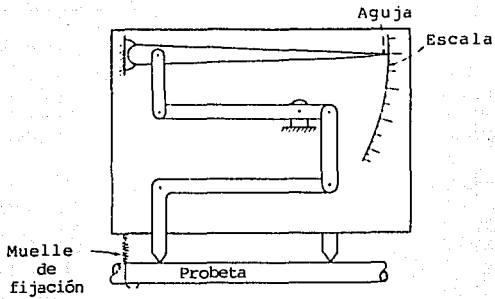
Extensómetro de palanca modelo Tinkus Olsen

Figura 2.5

Extensómetro Huggenberger

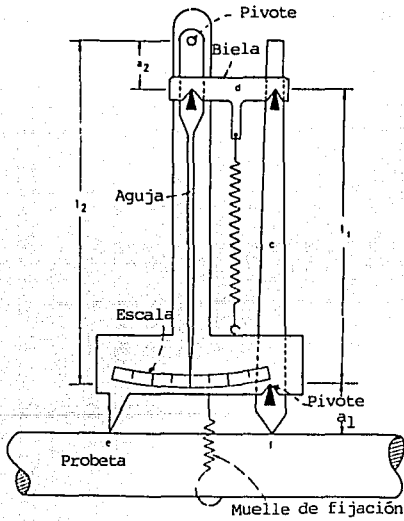
Este tipo de extensómetro tiene una construcción más sofisticada que cualquiera de los extensómetros mecánicos anteriormente mencionados, tiene éste un gran poder de amplificación de los desplazamientos (figura 2.7). Las partes básicas de las que está construido este extensómetro mecánico son:

Dos cuchillas (e) y (f), formando ésta última parte de la palanca (c) que gira alrededor del pivote inferior, empujando a la barra (d) contra la aguja indicadora. La variación de longitud en la medida base provocada por el desplazamiento que presente la probeta ensayada se multiplica por la relación $(l_1 \cdot l_2) / (a_1 \cdot a_2)$. El grado de amplificación depende de cada instrumento en particular, éste se encuentra entre 300 y 1,200, el valor está en función de la medida base que se tenga, que va de 6 a 100 mm.



Extensómetro Porter Lipp

Figura 2.6



Extensómetro Huggenberger

Figura 2.7

- EXTENSOMETROS MECANICOS CON PALANCAS OPTICAS

En estos extensómetros se eliminan los rozamientos en los puntos de giro y la inercia que se produce por la palanca mecánica ya que se emplea un rayo de luz como medio de amplificación, el más representativo es el:

Extensómetro de Espejos Marten

Este tipo de extensómetro (fig. 2.8) está instrumentado con un pequeño espejo plano unido a una cuchilla doble filo, cuando ésta gira debido al desplazamiento de probeta ensayada gira un ángulo de 2α , el factor de amplificación está en función de la distancia (A) entre el espejo y la escala; y la anchura (B) entre las puntas de la cuchilla. El factor de amplificación es $2A/B$ siempre y cuando la rotación del espejo sea aproximadamente menor que 10; por lo que respecta a la anchura B generalmente es de 5 mm y A 250 veces B, por lo que da una amplificación de 500. Este tipo de extensómetro es sumamente sensible ya que si se emplea un anteojero que lea hasta a 0.1 mm en la escala, esta medida será equivalente a 0.0002 mm de cambio de longitud de probeta.

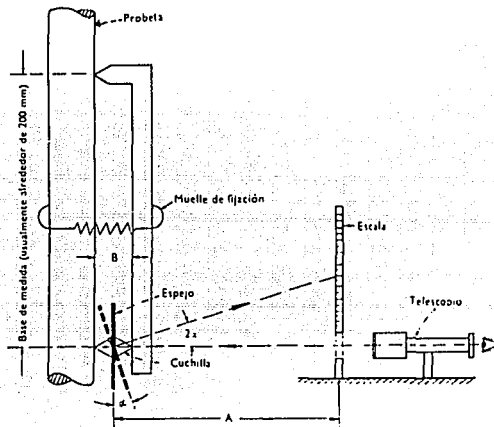
- EXTENSOMETRO MECANICO A BASE DE CELDA FOTOELECTRICA

Hay varios modelos de extensómetros mecánicos a base de celda fotoeléctrica montados sobre un sistema de palanca para hacer una pequeña amplificación; en los extremos de la palanca están colocadas rejillas de líneas, (cinco por cada milímetro), de tal forma que una se mueva frente a la otra. La posición relativa entre las rejillas condiciona la cantidad de luz que las atraviesa y llega a la celda fotoeléctrica, éste mecanismo logra una amplificación de 30,000 utilizando una base de medida de entre 2 y 6 mm esto en base a la corriente que se genera en la celda por irradiación de luz.

- EXTENSOMETROS MECANICOS A BASE DE VIDRIOS PLANOS

Este tipo de extensómetros mecánicos es de una técnica delicada, exigiendo condiciones de laboratorio por lo cual no es recomendable para uso general pues se utilizan solamente si se desea medir desplazamientos

extremadamente pequeños. La operación de este extensómetro se basa en la técnica de medida de las bandas de Interferencia producidas por vidrios ópticamente planos y se miden los cambios de dimensión del orden de la longitud de onda monocromática. Un ejemplo de este tipo de extensómetros es el de tipo Interferométrico (figura 2.9).

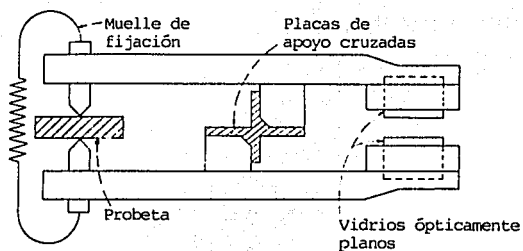


Extensómetro Marten

Figura 2.8

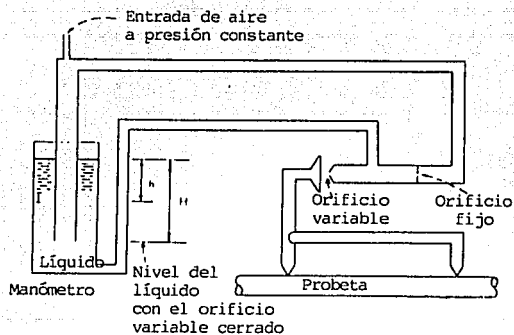
- EXTENSOMETRO MECANICO TIPO NEUMATICO

Este tipo de extensómetro se basa en el suministro de aire a presión en un orificio fijo y otro variable (fig 2.10). La presión (P) que se produce entre los dos orificios está en función de la descarga de aire relativo a cada orificio. Esta variación de presión se puede medir con un manómetro de cualquier tipo; éste estará en función de la sensibilidad de medida de variación de desplazamiento que se busque. La variación de la presión se logra en la distancia que exista entre el orificio variable y una placa plana o colocar una válvula que varíe la salida del aire al registrar desplazamiento en la probeta.



Extensómetro a base de vidrios planos

Figura 2.9

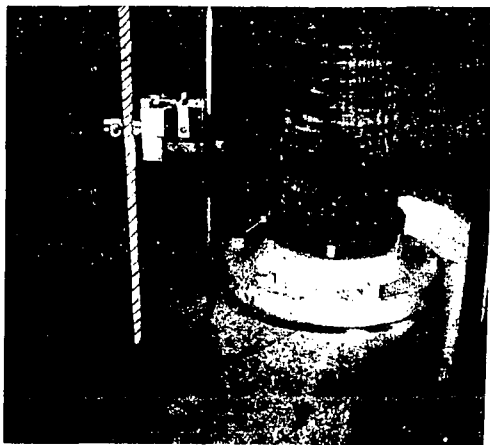


Extensómetro de tipo neumático

Figura 2.10

- EXTENSOMETRO MECANICO DE TRANSFORMADOR DE ACOPLAMIENTO

Este extensómetro se basa en la variación de voltaje que se presenta en las bobinas del conductor que están igualmente espaciadas en un soporte adecuado (figura 2.11) . En el centro de las bobinas se encuentra un núcleo magnético interior móvil en el cual se produce dicha variación de voltaje. En los aparatos que se desarrollan comercialmente se logran precisiones de 0.002 volts por céntima de milímetro de desplazamiento.



Extensómetro de transformador de acoplamiento

Figura 2.11

- EXTENSOMETROS MECANICOS CAPACITIVOS

Estos extensómetros se basan en la variación de la distancia entre placas metálicas o la superficie de las mismas, lo cual produce el cambio en capacidad de un condensador; dichos cambios se miden en circuitos eléctricos ó electrónicos convencionales; para cuando se utiliza la variación entre la distancia de placas, la separación inicial y el margen de movimiento debe ser pequeño para que el sistema sea lineal. Normalmente se utilizan separaciones del orden de 0.025 mm y desplazamientos del orden de 0.0025 mm.

Si se utiliza el método de separación de superficie de placa, la operación básica es el deslizamiento de esa placa con relación a otra conservando su separación, lo cual funciona como un condensador de aire variable. El cambio de capacidad será una función lineal del área, el cual se puede medir con diferentes instrumentos como un osciloscopio ó multímetro.

Este tipo de extensómetro presenta ventajas y desventajas. Las ventajas principales son: la libertad de diseño que puede tener y las lecturas del orden de 0 a 20 μf usando frecuencias portadoras de 1 a 2.5 megaciclos / segundo.

Los extensómetros mecánicos en general tienen desventajas sobre otros métodos, los cuales son: su tamaño, peso, mala respuesta frente a fenómenos dinámicos, rango de medición limitado, imprecisión; pero así como se puede decir que hay desventajas también tienen ventajas como son: su vida útil, economía, no es necesaria capacitación especializada del personal. Lo anterior depende de los parámetros cualitativos y cuantitativos que uno requiera en ensayo; por lo cual, se utiliza en general en pruebas donde no se requieren resultados de gran precisión, solamente valores aproximados de deformación.

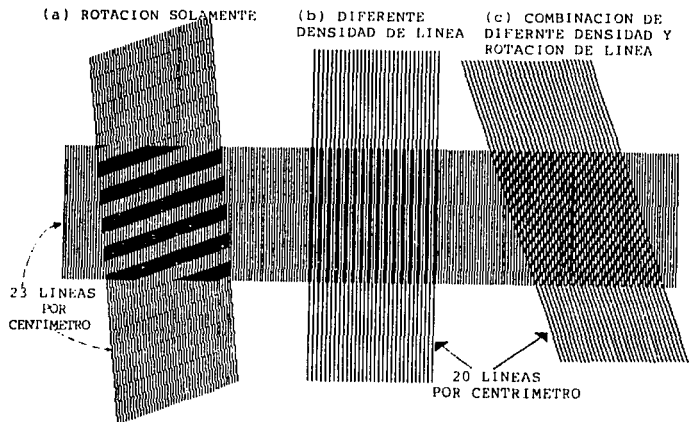
2.3. METODO DE MOIRE

Este es otro método de análisis experimental de esfuerzos, el cual consiste en dos mallas o rejillas, las cuales tienen la misma separación entre una línea y otra; una de estas mallas es adherida al elemento estructural a analizar. Al ser ensayado éste, sufre deformaciones y por ello desplazamientos, los cuales son transmitidos a la malla que fue adherida a la superficie del elemento estructural analizado, al sobreponer la malla patrón en la malla deformada por el elemento estructural solicitado, se produce interferencia de la luz que pasa por la malla apareciendo las franjas de Moire (fig 2.12). Estas franjas tienen el mismo valor de desplazamiento a lo largo de direcciones perpendiculares a las líneas de la rejilla no deformada, a la línea de Moire se le conoce como orden de franja o paso n (N) .

$$\epsilon_x = \frac{\text{orden de franja } n}{\text{densidad de malla (líneas / cm)}}$$

ϵ_x = Deformación unitaria

A continuación se dará una breve explicación de como se utiliza este método y como interpretar los pasos o franjas de orden n o de Moire. En la figura 2.13 se ve un corte de un modelo instrumentado con mallas, la superficie de una de las mallas está sobre un cuerpo, el cual permite el paso de la luz incidente a través de él, y por ende sobre la malla, el cuerpo es deformado provocando en la malla una separación de malla p' , al colocarle una malla no deformada con una separación de malla p sobre la deformada, la transmisión de la luz a través de las líneas de la malla deformada y la malla no deformada o patrón, la cual presenta zonas claras, grises y oscuras; los anchos de estas zonas dependen de la distorsión de la red de líneas del modelo deformado, por lo que solamente se tomarán las zonas de máximo contraste, así pues, se da lugar a las bandas oscuras llamadas franjas de Moire. Se cuenta la cantidad de franjas que aparecen y luego haciendo la relación entre la densidad de la malla, es decir, cuantas líneas tiene por unidad de longitud



Franjas de Moire
Figura 2.12

patrón; se determina las veces que se ha desplazado un punto con respecto a otro, por ejemplo, se aprecian 5 franjas de Moire o de orden de paso y la densidad de la malla patrón es de 300 líneas / cm entonces: el desplazamiento será igual a:

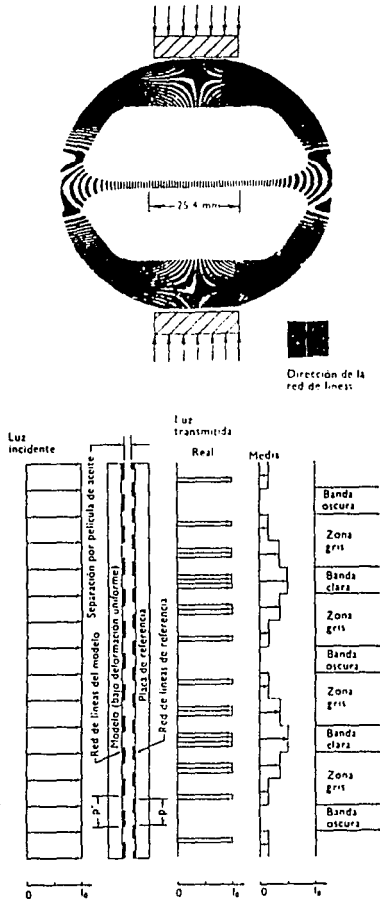
$$v = \frac{N}{P}$$

Donde:

v = Desplazamiento

$$v = \frac{5 \text{ líneas}}{300 \text{ líneas / cm}} = 0.0166 \text{ cm}$$

de desplazamiento con respecto al punto sin deformar.



Corte de un modelo instrumentado con mallas

Figura 2.13

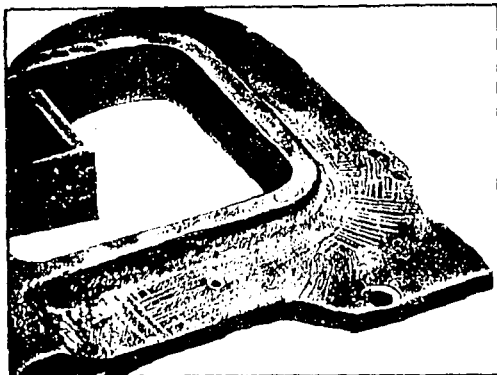
Existen también orden de franja o paso negativo; esto significa que son desplazamientos provocados por la compresión que se presenta en ese punto del modelo por el tipo de carga aplicada.

El método de Moire para análisis de esfuerzos y deformaciones tiene una aplicación ilimitada, con los nuevos avances tecnológicos logrados en la fotografía y videos, se logran obtener los datos necesarios de deformación para la determinación de esfuerzos de una superficie del modelo a ensayar casi en cualquier condición de posición y temperatura. Una de las limitantes que tiene este método, es la posibilidad de la obtención de conjuntos de líneas de separación suficientemente pequeñas. Las mallas con una densidad relativa de línea están en el orden de 400 a 800 líneas por centímetro lo que provoca que se tengan deformaciones unitarias de 500×10^{-6} para producir bandas de Moire separadas al rededor de 2.5 cm, por lo que este método queda limitado a ser utilizado en problemas donde existan grandes deformaciones y se requiera una mayor precisión en la deformación y por ende, en el esfuerzo.

Se puede mejorar este método en base a las nuevas técnicas desarrolladas en el campo de lectores ópticos e impresiones laser ya que se puede imprimir una densidad de línea de más calidad del orden de 400 a 800 líneas por centímetro y celdas fotoeléctricas para lectura de intensidad de luz que pase por la malla patrón y la deformada por el modelo.

2.4. METODO DE BARNICES FRAGILES

En el análisis experimental de esfuerzos y deformaciones, otro método es el de barnices frágiles ó revestimiento frágil ó quebradizo. Este método utiliza una capa de barniz ó revestimiento cristalino aplicado sobre la superficie del espécimen a ensayar, la cual está diseñada para que se agriete a un determinado nivel de deformación comprendido en el rango elástico del espécimen analizado. Al ir aplicando cargas sobre el espécimen (fig. 2.14), el recubrimiento de barniz frágil sufre las primeras grietas, estas grietas indican los puntos de máxima deformación en ese instante del ensayo; conforme se cargue el espécimen surgirán más y más grietas, todo esto debe ser dentro del rango elástico del material del que está hecho el espécimen.



Especimen con la aparición de las primeras grietas

Figura 2.14

La calibración del barniz frágil se realiza por lo general con barras de aluminio y se colocan como vigas en cantiliver (empotradas ó ménsulas) ya que este tipo de material tiene un módulo de elasticidad que permite deformaciones considerables dentro de su rango elástico, además en el tipo de empotramiento es ampliamente conocido su comportamiento al ser solicitado; produciéndose tensiones en las fibras superiores y compresiones en la fibras inferiores del espécimen. Con un comportamiento lineal a partir del empotramiento, las fuerzas de tensión ó compresión son máximas desde el apoyo y en el extremo al empotramiento, donde se aplica la carga, no se producen fuerzas de tensión ó compresión según sea el caso.

Después de recubrir la superficie y dar el tratamiento de curado del barniz ó recubrimiento frágil, las barras se someten a variaciones de

deformación conocida y se analizan los patrones de agrietamiento, de modo que el tamaño y el aspecto de las grietas se pueden relacionar con las correspondientes deformaciones ó determinadas por la calibración; se realiza un número determinado de veces esta prueba para varias barras con las mismas características de forma y carga aplicada. La deformación ó deformaciones en la iniciación del agrietamiento, generalmente quedan comprendidas en el intervalo de 500 a 1000 micropulgadas.

Este método experimental para la determinación de esfuerzos es al parecer bueno ya que tiene una sensibilidad aceptable, pero lo afectan los factores externos como: la temperatura, la humedad y el flujo plástico. Se requieren condiciones óptimas para aplicar el recubrimiento además de un técnico altamente capacitado para obtener resultados cuantitativos aceptables del recubrimiento frágil. Valores de ± 10 a 15% para magnitudes de deformaciones es apreciablemente la mejor exactitud que se pueda esperar.

Este método es de mucha utilidad cuando se requieren conocer resultados cualitativos en el ensayo de un espécimen ya que da una consideración rápida y poco costosa del comportamiento y distribución de las deformaciones, además permite conocer los lugares donde se deben de aplicar ó colocar otros tipos de medidores de deformación (fotoelásticos, eléctricos, etc.) para obtener resultados cuantitativos en el ensayo.

En México se viene experimentando con recubrimientos frágiles a base de derivados del azúcar, los cuales son aún más baratos que los barnices frágiles que existen en el mercado ya que éstos son de importación.

Este tipo de recubrimiento a base de azúcares ha sido estudiado y desarrollado en el Instituto de Ingeniería por el Dr. Luis Ferrer Argote.

Un ejemplo de estos recubrimientos es uno que tiene como materia prima azúcar (refinada ó morena) miel de maíz y agua como solvente. Se realiza esta mezcla y luego se coloca en la superficie del espécimen previamente desengrasado y con un fondo reflejante por medio de una cimbra para lograr un espesor de recubrimiento de 1 a 3 mm de espesor, según se requiera se introduce bien nivelada la superficie del espécimen a un horno; durante 3 horas a unos 135 grados centígrados, luego se deja enfriar

lentamente por una hora quedando así preparada la superficie recubierta para aplicarte luego la carga y observar las grietas que surjan en el momento de ensayo.

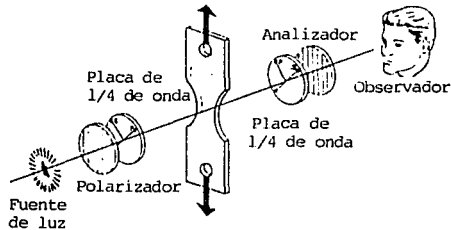
2.5 METODO FOTOELASTICO

El método fotoelástico es utilizado principalmente para obtener información sobre esfuerzos y deformaciones en una zona extensa de una estructura. Proporciona una visión cuantitativa de áreas sometidas a grandes esfuerzos y puntas de deformaciones, tanto en el interior como en el exterior de la estructura, además de proporcionar información sobre regiones de bajas deformaciones, lo cual es muy importante, ya que nos ayuda a distribuir y aprovechar mejor el material, logrando con ello el mejor diseño de cualquier estructura sin temor a tener un escaso o sobre dimensionamiento de los elementos de refuerzo.

El método fotoelástico de análisis experimental de esfuerzos es muy útil y preciso. Básicamente, la técnica consiste en la observación de un modelo transparente de un miembro estructural en un campo de luz polarizada, y la interpretación de los patrones ópticos resultantes para determinar los esfuerzos en el modelo. Muchos materiales transparentes poseen la propiedad de la birrefringencia temporal. Esto significa que exhiben patrones de bandas coloreadas cuando son sometidos a esfuerzos mientras son observados por un polariscopio. Dado que las bandas coloreadas (franjas o líneas isocromáticas) pueden ser relacionadas linealmente con la magnitud del esfuerzo en cada punto del modelo usando el equipo apropiado.

En la figura 2.15 se muestra el esquema de los componentes principales de un polariscopio para la observación de modelos fotoelásticos. La luz pasa primero a través de un polarizador plano y luego por una placa de retraso de $1/4$ de onda, para posteriormente pasar por el modelo fotoelástico y finalmente la luz pasa por otra placa de $1/4$ de onda y un segundo polarizador plano llamado analizador, hasta llegar la luz al observador.

Con los elementos ópticos del polariscopio orientados como en la figura 2.15, el modelo será uniformemente transparente cuando se halle libre de esfuerzos. Con la aplicación de una carga al modelo, aparecerá un primer patrón de franjas, conforme se incremente la carga se generarán nuevas franjas en los puntos que soporten los mayores esfuerzos (generalmente en los bordes o apoyos), desplazando a las primeras franjas hacia el interior del modelo. El número de franjas se incrementa proporcionalmente a la carga, pero la configuración permanece esencialmente igual.



Polariscopio circular

Figura 2.15

En cada franja existe una diferencia constante entre los esfuerzos principales ($\sigma_x - \sigma_y$), como se indica en la figura 2.16. Dado que la diferencia algebraica entre los dos esfuerzos principales en cada punto del modelo es igual al doble del esfuerzo cortante máximo, cada franja representa también el conjunto de puntos de esfuerzo de cortante máximo.

Significativamente, el incremento en la magnitud de $\sigma_x - \sigma_y$ o $2\tau_{\text{máx}}$ es constante de una franja a la siguiente. Esta propiedad se generaliza en la ley de esfuerzos como sigue:

$$\sigma_x - \sigma_y = 2\tau_{\text{máx}} = (f/t) N \quad 1$$

donde:

f = coeficiente de esfuerzo óptico del material fotoelástico.

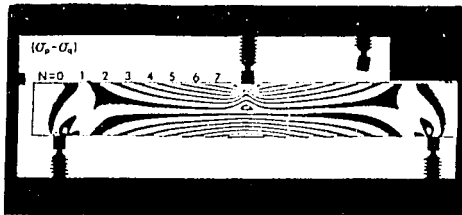
t = espesor del modelo

N = número de orden de la franja

σ_x = esfuerzo en x

σ_y = esfuerzo en y

$\tau_{\text{máx}}$ = esfuerzo cortante máximo



Franjas formadas en un modelo debido a la carga aplicada

Figura 2.16

La relación anterior proporciona el medio para la medición cuantitativa del esfuerzo usando la fotoelasticidad, una vez que se conoce el coeficiente de esfuerzo óptico del material del modelo. Su valor nominal es proporcionado comúnmente por el fabricante. También puede ser medido contando las franjas que pasan por un punto en un campo de esfuerzos conocido (usualmente uniaxiales) mientras se incrementa la carga.

Como se habrá notado, la ley del esfuerzo óptico no proporciona las magnitudes de los esfuerzos principales individuales σ_x y σ_y sino la diferencia entre ellos, es decir, el doble del esfuerzo cortante máximo en cada punto del modelo. Las siguientes consideraciones demuestran, sin embargo, que esto es suficiente para un gran número de casos: para casi todas las condiciones de carga en una parte mecánica o un miembro estructural (excepto para cargas transmitidas directamente), el esfuerzo producido es máximo en la superficie. Esto es particularmente válido para la torsión y la flexión (fig 2.17), pero también es cierto para cargas axiales, dado que siempre hay cierta excentricidad entre el eje de carga y el centro de resistencia de la sección transversal.

Además, los concentradores de esfuerzos, si los hay, están regularmente asociados con irregularidades geométricas en la configuración de la superficie. Como resultado de estas consideraciones, podemos restringir nuestra atención a las condiciones en los límites de modelos bidimensionales, mientras conservamos la capacidad de evaluar los aspectos significativos de la distribución de esfuerzos para una amplia variedad de modelos y arreglos de carga.

Excepto para el área inmediata bajo una carga aplicada externamente, es evidente que cada elemento del material a lo largo de la superficie libre del modelo fotoelástico estará libre de esfuerzos en la dirección perpendicular a dicha superficie (fig 2.18). La normal a las superficies es, de hecho, uno de los ejes principales, y el otro es paralelo a ella. Así en cada punto de carga nula de los bordes del modelo, uno de los esfuerzos principales es cero, y la franja que intercepta a la superficie en ese punto corresponde al esfuerzo principal no nulo.

Expresado de otra manera:

$$\sigma_x - \sigma_y = (f/t)N \text{ y como } \sigma_y = 0; \sigma_x = (f/t)N \quad 2$$

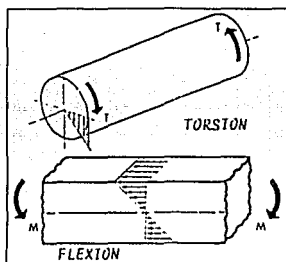
donde

σ_x, σ_y = esfuerzos principales en el eje referido

f = coeficiente de esfuerzo óptico del material fotoelástico

t = espesor del modelo

N = número de orden de franja

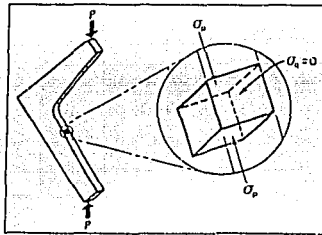


Esfuerzo máximos de torsión y flexión

Figura 2.17

Sólo resta entonces identificar la franja que intersecta la superficie en cualquier punto de interés y sustituir el número de franja en la ecuación 2, junto con el coeficiente de esfuerzo óptico y el espesor del modelo, para obtener la magnitud del esfuerzo principal en ese punto. En algunos casos de distribución de esfuerzos simple se puede examinar el patrón de franjas desarrollado bajo carga máxima y contar las franjas a partir de un punto de

esfuerzo conocido (una esquina externa por ejemplo, donde el esfuerzo siempre será cero), hasta la franja que intercepta la superficie del punto de interés. Hacer esto sin riesgo de error requiere normalmente de un modelo y un modo de carga tales que permitan que se sepa de antemano que el esfuerzo cambiará uniformemente (aumentando o disminuyendo en forma continua) a lo largo de la superficie libre, desde el punto cuyo esfuerzo se conoce, al punto en cuestión.



Partícula libre de esfuerzos perpendiculares a la superficie

Figura 2.18

Para identificar inequívocamente el número de orden de las franjas, sin importar la complejidad del patrón, generalmente es necesario observar el modelo mientras se aplica la carga y contar el número de franjas que pasan por el punto de interés conforme se incrementa la carga. Bajo la aplicación de una pequeña carga al modelo, se verá que las franjas se generan primero en los puntos de la superficie sometidos a los mayores esfuerzos. Conforme se incrementa la carga, se generan nuevas franjas en dichos puntos desplazando a las iniciales hacia el interior del modelo; al mismo

tiempo, empiezan a aparecer franjas en otros puntos sometidos a esfuerzos menores. Este proceso continúa mientras se siga incrementando la carga, hasta que se desarrolle el patrón completo. Si se observa el punto en el que apareció la primera franja durante todo el proceso, y se cuentan las franjas conforme se vayan generando, puede sustituirse en la ecuación 2 el número de franjas generadas y calcularse el esfuerzo asociado a la carga aplicada sobre el modelo. Puede seguirse el mismo procedimiento en otros puntos de la superficie libre para obtener la distribución de los esfuerzos. El signo de los esfuerzos puede ser inferido a partir del conocimiento del sistema de cargas y de la índole general de la distribución, considerando en todo momento la necesidad de mantener el equilibrio de fuerzas y momentos.

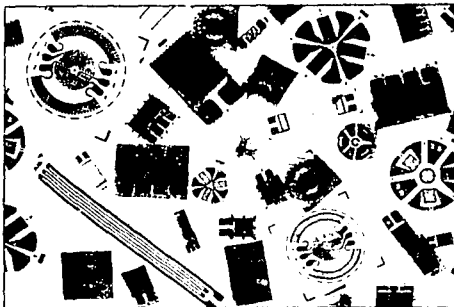
2.6 METODO DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE

El método de extensómetros eléctricos de resistencia variable nos permite conocer valores de deformación en una superficie por medio de dispositivos de medición, los cuales son adheridos a la superficie del elemento a ensayar dando a conocer resultados cuantitativos de la deformación del elemento, utilizando transformaciones matemáticas para conocer los esfuerzos en base a los valores de deformación obtenidos.

Este método principalmente se usa para medir deformaciones puntuales o en una región muy pequeña del elemento, aunque se tienen extensómetros eléctricos de resistencia variable con características y formas inimaginables (fig. 2.19), esto permite tener información casi en cualquier punto de la estructura por muy difícil que sea su acceso o medio ambiente.

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable están constituidos de dos partes fundamentales, que son: por un lado la base de soporte, siendo la parte que está adherida a la superficie del cuerpo a ensayar con pegamentos especiales, esta base funciona como elemento de transmisión de los esfuerzos del cuerpo ensayado con la resistencia que está

montada sobre la base de soporte; siendo la resistencia eléctrica, la cual es la segunda parte fundamental del extensómetro eléctrico de resistencia variable.



Modelos diferentes de extensómetros eléctricos de resistencia variable

Figura 2.19

La base y la resistencia se construyen con diferentes materiales y aleaciones. La base se hace a base de polímeros, dependiendo de la superficie será el tipo de polímero que se utilizará como material fundamental de la base, En tanto la resistencia eléctrica o rejilla se elabora en diferentes aleaciones y formas, ésto es gracias al proceso de fotograbado, obteniendo como resultado resistencias eléctricas de lámina impresa (film metálico o trama pelicular), también los hay de conductor de sección circular.

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable de sección circular son muy poco usados y diremos que son muy difíciles de conseguir en el mercado, porque gracias a las técnicas de fotograbado que se desarrollan día con día se consiguen resistencias eléctricas de formas y tamaños imposibles de obtener por otros métodos. Así se logra tener extensómetros eléctricos de resistencia variable casi para cualquier tipo de superficie que se

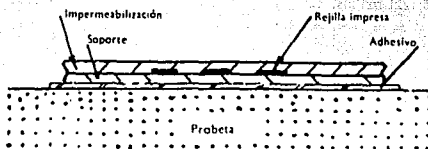
presente. Dependiendo del fabricante y el tipo de extensómetro eléctrico de resistencia variable, los espesores de lámina oscilan en 0.0025 y 0.0125 mm. Antes de su uso la lámina impresa pasa por los más estrictos controles de calidad, así como la mayor asepsia posible para evitar la contaminación de éste, y que provoque información errónea.

En la figura 2.20 podemos observar un tipo de extensómetro eléctrico de resistencia variable. Para cierta sección transversal la lámina impresa presenta una gran superficie por consiguiente el esfuerzo cortante desarrollado en el cuerpo aislante (parte de soporte y adhesivo) debido a la transmisión de la deformación entre la superficie del extensómetro y la resistencia eléctrica o rejilla, resulta generalmente muy pequeño. La gran superficie disponible en las configuraciones de la rejilla dan lugar a muy buenas condiciones de transmisión de calor entre la rejilla y el cuerpo a ensayar, por consiguiente, son posibles mayores intensidades de corrientes sin desarrollar fuertes gradientes de temperatura entre la rejilla y probetas o entre la rejilla y el soporte aislante.

Un extensómetro eléctrico de resistencia variable también puede ser mezclado en el interior de un material colado como el concreto. El peso que se agrega al elemento estructural es despreciable y es utilizado para medir deformaciones estáticas y dinámicas en el interior de elemento, además ofrece la ventaja de no tener que obtener las lecturas en el sitio del experimento, esto es, puede utilizarse un dispositivo adecuado en el lugar para poder registrar la información de salida del extensómetro eléctrico de resistencia variable, y con las nuevas tecnologías en comunicaciones ésta puede ser enviada a muchos kilómetros de distancia, casi al momento que esté sucediendo, gracias a los sistemas de cómputo con los que se cuenta en el mercado.

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable son sensibles a las deformaciones hasta de 5 millonésimos de un centímetro sobre centímetro o sobre una pulgada sobre pulgada, y usualmente tienen una gama de deformaciones hasta de 1 a 2% (10,000 a 20,000 micras por metro o micro pulgada por pulgada), ciertos medidores que se consideran como especiales

alcanzan a medir deformaciones dentro de intervalos hasta del 10% si se protegen apropiadamente. Los extensómetros eléctricos de resistencia variable



Sección transversal de un extensómetro eléctrico de resistencia variable

Figura 2.20

usuales pueden trabajar en rangos de temperatura de 150 a 200 °C y los muy especiales hasta 1095 °C. Se logran determinar las deformaciones por este método debido a que el cambio de la resistencia eléctrica por la variación de la sección del conductor provocada por una cierta deformación es proporcional a ésta; esto se logra porque cada extensómetro eléctrico de resistencia variable tiene un factor de sensibilidad longitudinal o factor de proporcionalidad K (gage factor), y se define como la relación del cambio de de resistencia por unidad al cambio de longitud también por unidad, esto es:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{s}$$

donde:

K = Factor de sensibilidad longitudinal (adimensional).

ΔR = Incremento de resistencia eléctrica (ohms).

R = Resistencia eléctrica (ohms).

ΔL = Incremento de longitud (m).

L = Longitud del conductor o rejilla (m).

s = Deformación unitaria (adimensional).

Siendo este factor de sensibilidad longitudinal a la deformación, constante para el pequeño intervalo de variaciones de resistencia eléctrica. Cuando mayor sea el factor de sensibilidad longitudinal será mayor la sensibilidad del extensómetro eléctrico de resistencia variable. Este factor está en función de la aleación de que esté hecho el conductor o lámina impresa, generalmente este valor de K fluctúa entre dos ($k = 2$).

Otra parte importante y que es básica para el buen funcionamiento del extensómetro eléctrico de resistencia variable y por consiguiente en la obtención de valores confiables de deformación, es la parte de pegado del extensómetro eléctrico de resistencia variable a la superficie del elemento a ensayar., ya que se requiere de una gran limpieza en la superficie de pegado y el equipo a utilizar, ya que una pequeña impureza crearía una interferencia en la transmisión de deformación entre la superficie del elemento a ensayar y la base del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

CAPITULO 3

EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE

OBJETIVO:

**MENCIONAR Y EXPLICAR LAS CARACTERISTICAS Y EL FUNCIONAMIENTO DE LOS
EXTENSOMETOS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE.**

En este capítulo hablaremos sobre lo que es un extensómetro eléctrico de resistencia variable, sus principios de operación, características físicas, y formas de medición. Con este método experimental no sólo se obtienen esfuerzos mediante las ecuaciones matemáticas vistas en el primer capítulo sino también fuerzas, presiones, temperaturas, pares torsionantes entre otras, todo esto mediante transductores (dispositivos de medición) especialmente diseñados para cada fin; en base al principio de la variación de resistencia mediante una deformación dada en dos direcciones.

3.1. PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Como vimos en el primer capítulo existen una serie de ecuaciones que nos permiten obtener el estado de esfuerzos de un elemento estructural cualquiera solicitado en uno, dos o tres ejes, (este último no se analizará ya que no es tema del presente trabajo) así mismo se cuenta con ecuaciones que nos permiten determinar el estado de esfuerzo a partir de valores de deformación en los ejes de estudio (estado de deformación). Por tal motivo si se cuenta con una lectura confiable del estado de deformación, los valores de esfuerzo se puede determinar fácilmente para cualquier punto e instante dado de trabajo del elemento; este valor es un dato importante en el área experimental, ya que permite comparar y en su caso comprobar si los valores de nuestro cálculo estructural corresponden a los obtenidos experimentalmente, dándonos el grado de aproximación de nuestros cálculos, y a su vez nos permite evitar riesgos de subdimensionamiento ó sobre dimensionamiento de los elementos estructurales, corrigiendo adecuadamente en su caso los errores que se hayan tenido en su diseño.

La extensometría eléctrica es una técnica aplicada al análisis experimental de esfuerzos, que nos permite determinar el estado de deformación de un elemento estructural con un alto grado de exactitud; esta técnica es una herramienta indispensable en la Ingeniería moderna por su bajo costo en la facilidad de obtención de resultados e instalación.

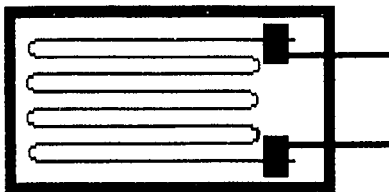
Con los extensómetro eléctrico no sólo se obtienen esfuerzos ya que al ser estos unos transductores que transforman los cambios de

resistencia eléctrica a deformación unitaria, es posible mediante las ecuaciones y conversiones adecuadas tener parámetros tales como fuerza, presión, desplazamiento, temperatura, aceleración, por torsor dilatación térmica entre otras con una relativa facilidad y economía, por tal motivo la ingeniería moderna se apoya en esta técnica para su desarrollo.

3.2. CONSTRUCCION

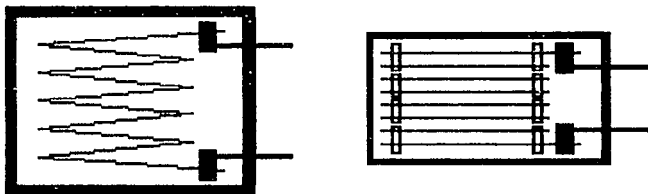
Debe quedar bien claro que todo medidor de deformación ya sea mecánico, eléctrico, óptico o de algun otro tipo, no mide la deformación, sino son sensibles a la deformación, es decir, son capaces de detectar y responder a cualquier cambio de una longitud finita; por lo consiguiente la cantidad "medida" obtenida de un medidor de deformación es proporcional a la deformación media o promedio de la longitud de medición del dispositivo. Una lectura media del medidor de deformación en una región de alto gradiente de deformación, puede ser apreciablemente menor que la máxima que se produce en algún otro punto específico dentro de la longitud de medición, esta dificultad se evita en un método experimental de extensometría eléctrica, colocando un extensómetro eléctrico de resistencia variable de longitud de medición muy pequeña.

Los medidores de deformación por variación de resistencia eléctrica más comunes y usados universalmente son los de tipo de adhesión. Es decir el medidor se adhiere o une íntimamente a la superficie sobre la cual se desea conocer la deformación y por consiguiente se deforma también junto con aquélla. Un extensómetro eléctrico de resistencia variable está formado por dos elementos fundamentales que son el soporte y el conductor eléctrico sensible a las deformaciones. En un principio se emplearon con gran éxito soportes de papel y conductores de sección circular (fig 3.1) pero presentaban grandes inconvenientes de la higroscopidad del papel, que nacía perder el aislamiento del extensómetro eléctrico de resistencia variable e incrementando considerablemente el factor de sensibilidad transversal en la partes curvas del conductor. Se intentó evitar este problema dando forma al conductor de zig-zag u otros diseños (fig 3.2).



Extensómetros eléctricos de sección circular

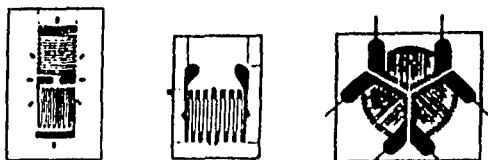
Fig. 3.1



Extensómetros eléctricos en zig-zag o rectos

Fig. 3.2

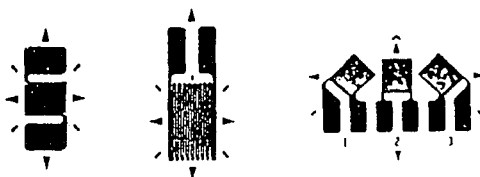
En la actualidad se considera a un extensómetro eléctrico de resistencia variable de calidad, a aquél que está construido en su base de materiales polímeros y el conductor en base al sistema de fotograbado conocido como film metálico, lámina impresa o banda de trama pelicular, consiguiéndose formas y dimensiones por este método de elaboración imposibles de conseguir por métodos clásicos (fig. 3.3) ya que los modelos pueden hacerse a escalas muy aumentadas (fig. 3.4) .



BALDWIN-LIMA-HAMILTON CORP.



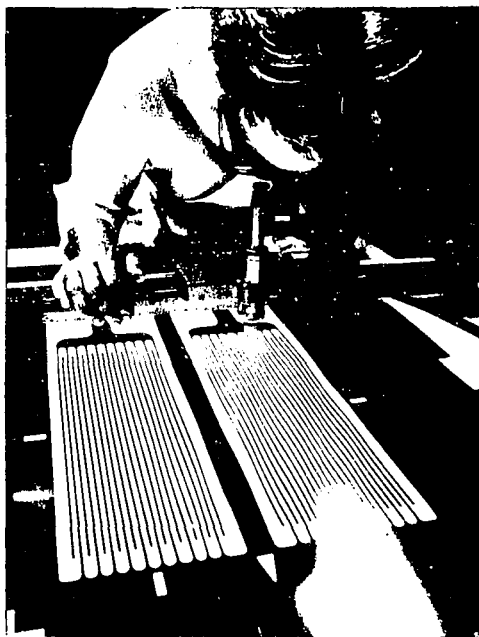
BUDD COMPANY (INSTRUMENT DIVISION)



MICRO MEASUREMENTS, INC

Diferentes modelos de extensómetros eléctricos

Fig. 3.3

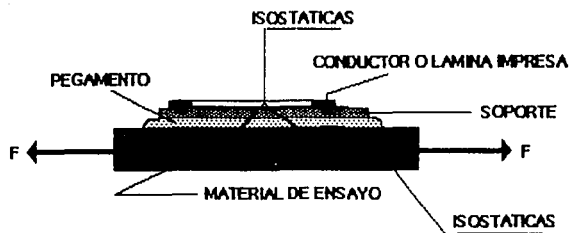


Modelo de extensómetro eléctrico amplificado

Fig. 3.4

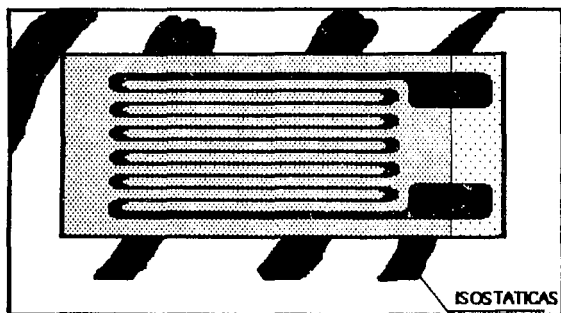
Los principios en que se basa la extensometría eléctrica, supone que las trayectorias de esfuerzos principales o isostáticas de igual magnitud, de la estructura bajo ensayo, pasan a través de la parte activa del extensómetro eléctrico de resistencia variable y se ha podido comprobar en modelos fotoelásticos que un extensómetro eléctrico de resistencia variable pegado a una estructura, sólo presenta en su contorno distorsión de las isostáticas o líneas de esfuerzos principales de igual magnitud que son transmitidas por la superficie ensayada, no siendo así, en la zona central del extensómetro eléctrico; por tal motivo dando a la lámina impresa la forma indicada en la fig. 3.5a y b conseguiremos establecer en los extensómetro eléctrico de resistencia variable los conductores activos en la zona de anclaje en la que se inciden las isostáticas y por su mayor sección con respecto a la parte activa, la variación unitaria de resistencia es menor y despreciables los coeficientes de sensibilidad transversal y longitudinal.

Las posibilidades de disponer de superficies adecuadas para la soldadura de los cables y la transparencia de los soportes, que permiten una colocación óptima del extensómetro eléctrico de resistencia variable añaden ventajas a éste; por otra parte, las aleaciones de la lámina impresa (conductor) responden a las características específicas de cada tipo, siendo a veces riguroso secreto el proceso de fabricación de las láminas impresas, en el que se incluyen técnicas sofisticadas para conseguir mejoras en la utilización de los extensómetros eléctricos de resistencia variable.



corte de un extensómetro eléctrico y trayectorias isostáticas

Fig. 3.5a



Planta de un extensómetro eléctrico

Fig. 3.5b

3.3. CARACTERISTICAS TECNICAS DE OPERACION

- VALOR OHMICO

El valor de la resistencia óhmica de un extensómetro eléctrico de resistencia variable viene condicionado por excitaciones de tipo eléctrico y se tienen que establecer ciertas determinaciones para que este valor sea elevado o pequeño, por lo que se deben observar las siguientes situaciones:

Condiciones que sugieren un valor óhmico elevado.

- 1.- Señales eléctricas elevadas.
- 2.- Mayor sensibilidad a las deformaciones.
- 3.- Evitar errores de lectura por resistencia de contactos y conmutadores.

Condiciones que sugieren un valor óhmico pequeño.

- 1.- Evitar caídas de tensión internas.
- 2.- Conseguir mayor aislamiento eléctrico entre el extensómetro eléctrico de resistencia variable y la estructura.
- 3.- Menos delicado en el manejo y operación por ser más robusto.

Los expertos en el manejo de los extensómetros eléctricos de resistencia variable han establecido como valor normal de operación y uso más común el de 120 ohms, siendo también empleados los de 350 (principalmente en transductores), 600 y 1000 ohms; estos son empleados cuando se requieren valores de voltaje elevados para evitar la caída de corriente por longitudes de cable considerables, como por ejemplo mediciones de deformaciones en túneles a gran profundidad.

La tolerancia de fabricación del valor nominal del extensómetro eléctrico de resistencia variable es muy pequeña no más del 0.3%, dado que un valor mayor a esta tolerancia puede confundirse como una variación en la deformación. La instalación incorrecta puede producir un exceso en esta tolerancia, por lo que hay que cuidar sobremanera el proceso de pegado del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

Existen en el mercado extensómetros eléctricos de resistencia variable de valores fraccionarios del valor nominal de 120 ohms, éstos se utilizan cuando se requiere instalar circuitos con dos, tres ó cuatro extensómetro eléctrico de resistencia variable (los hay de 30 y 60 ohms u otros valores que no suelen ser estándares)

- FACTORES DE SENSIBILIDAD

Los factores de sensibilidad en los extensómetros eléctricos de resistencia variable son causados por la geometría y su conductividad por aleación de éste; estos factores son determinados a base de pruebas que realiza el fabricante o por nomogramas (pág.4-31).

En el estudio teórico de los extensómetros eléctricos de resistencia variable hay dos factores que comparan la relación unitaria de resistencia del conductor ó lámina impresa con la deformación que sufre en sentido longitudinal o transversal respectivamente, por efecto de las sollicitaciones a que esté sometido el elemento donde se instala el extensómetro eléctrico de resistencia variable.

La variación de la resistividad del extensómetro eléctrico de resistencia variable es motivada por el cambio de la geometría del conductor y su conductividad, pero si bien el primer factor afecta prácticamente igual a todos los metales, el segundo está en función de la aleación empleada en la fabricación de los conductores ó láminas impresas según sea el caso, y por esta razón la forma y dimensiones del conductor del extensómetro eléctrico de resistencia variable no influyen sobre este factor de sensibilidad. Lo que hace que este factor se modifique es el resultado de la anchura finita de las líneas del conductor (rejilla) del extensómetro eléctrico de resistencia variable y la presencia de las líneas de unión que conectan a las líneas del conductor (fig. 3.6).

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable son sensibles generalmente no sólo a las deformaciones paralelas a la dirección de la rejilla sino también a las deformaciones perpendiculares en dicha dirección. Esta



Micro-Measurements
Division
Made in USA

MEASUREMENTS GROUP, INC.
RALPHSBORO, NORTH CAROLINA

**PRECISION
STRAIN GAGES**

FORM

032116-606
CODE

2.04 ±1.0%
SENSITIVITY FACTOR
MINIMUM RESISTANCE AT 25°C
(+0.8 ±0.2)%

120.0 ±0.15%
RESISTANCE VALUE
LOT NUMBER

R-A48A-F150
PART NUMBER

5
QUANTITY

EA-13050AH-120
TYPE

EA-13050AH-120

GENERAL INFORMATION: EA-SERIES STRAIN GAGES

GENERAL DESCRIPTION: EA-Series gages are a general purpose family of constantan strain gages widely used in experimental stress analysis. These gages are of open-faced construction with a 1 mil [0.001 in. [0.03 mm]] length, flexible polyimide film backing.

TEMPERATURE RANGE: -100° to +350° F (-75° to +175° C) for continuous use in static measurements; -320° to +400° F (-195° to +205° C) for special or short-term exposure.

SELF-TEMPERATURE COMPENSATION: See data curve below.

STRAIN LIMITS: Approximately 5% for gage lengths 1/8 in. (3.2 mm) and larger and approximately 2% for gage lengths under 1/8 in. (3.2 mm).

FATIGUE LIFE: 10⁷ cycles at ±200µin/in (µm/m); 10⁸ cycles at ±150µin/in (µm/m); 10⁹ cycles at ±100µin/in (µm/m), 10⁷ cycles at 2800µin/in (µm/m) for unidirectional tension or compression loading. Longer gage lengths and lower resistances result in greater endurance and less scatter in fatigue life.

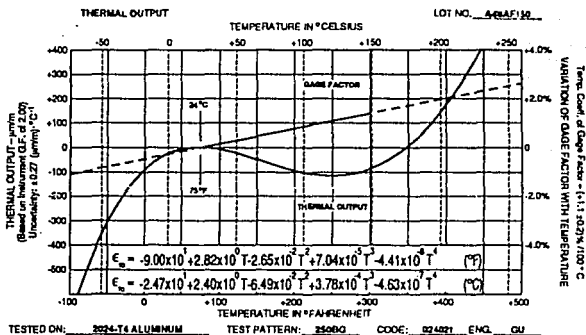
CEMENTS: Compatible with M-M Certified M-Bond 200 but it will normally not provide the greatest fatigue life. Micro-Measurements M-Bond AE-10/15, M-Bond GA-2, M-Bond 800, and M-Bond 810 are excellent. M-Bond 810 is the best choice over the entire operating range. Refer to M-M Catalog A-110 for information on bonding agents, and Ductiles B-17, B-130, and B-137 for installation procedures.

SOLDER: If operating temperature will not exceed +300° F (+150° C), M-Line 301 (83-37) tin-lead solder may be used for lead attachment. M-Line 450 (95-5) tin-antimony is satisfactory to +400° F (+205° C). When solder turns (Option 5) are supplied on these gages, they are formed with +570° F (+300° C) lead-in silver solder alloy. Refer to M-M Catalog A-110 for further information on solder, and Tech Tip TT-008 for lead attachment techniques.

PROTECTIVE COATINGS: These EA open-faced gages should always be protected with a suitable coating that is applied as soon as possible after gage installation. Refer to M-M Catalog A-110 for information on Strain Gage Protective Coatings.

NOTE: The backing of EA-Series gages has been specially treated for optimum bond formation with all appropriate strain gage adhesives. No further cleaning is necessary if contamination of the prepared surface is avoided during handling.

CODE



Datos del factor de sensibilidad y comportamiento a la temperatura de un extensómetro eléctrico proporcionado por el fabricante

Figura 3.6

propiedad se conoce como sensibilidad transversal y la llamaremos factor de sensibilidad transversal (K_t).

Se ha dicho que la variación de la resistencia eléctrica de un extensómetro eléctrico de resistencia variable es proporcional a la deformación, esto se explica porque el extensómetro eléctrico de resistencia variable tiene un factor de sensibilidad longitudinal (gage factor ó factor de proporcionalidad a la deformación) y es definido como la relación de la resistencia eléctrica unitaria con respecto a la longitud unitaria de la rejilla; esto es:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta L / L} = \frac{\Delta R / R}{\epsilon}$$

donde:

K = factor de sensibilidad

ΔR = Incremento de resistencia eléctrica (ohms).

R = resistencia eléctrica (ohms).

ΔL = incremento o decremento de longitud (m).

L = longitud del conductor o rejilla (m).

ϵ = deformación unitaria (adimensional).

Es importante mencionar que si se emplean varios extensómetros eléctricos de resistencia variable se debe procurar que el factor de sensibilidad transversal sea lo más uniforme posible. Por motivos de la instrumentación y características de fabricación se ha dado como valor nominal del factor de sensibilidad longitudinal el de 2.00 con una tolerancia admitida de $\pm 0.5\%$. El factor de sensibilidad transversal está en función del factor de sensibilidad longitudinal y se expresa en %, no siendo superior al 1%.

El fabricante indica el valor del factor de sensibilidad longitudinal K (gage factor) obtenido en unas condiciones de temperatura controlada y sobre mediciones en probetas de módulo de elasticidad y de relación de Poisson conocidos, el fabricante entrega la información técnica de la variación del factor de sensibilidad longitudinal K_t con respecto a las variaciones de temperatura (fig 3.6).

-RESPUESTA A LA TEMPERATURA

A los extensómetros eléctricos de resistencia variable les afecta considerablemente la variación de temperatura, si se exceden los rangos de temperatura de operación del extensómetro eléctrico, se provoca un error de medición por esta situación. Este error es corregible dentro de ciertos límites, como por ejemplo fabricar el conductor o lámina impresa del extensómetro eléctrico de resistencia variable con aleaciones que provean coeficientes térmicos de variación de la resistividad de igual valor y signo contrario al del coeficiente de dilatación lineal del cuerpo sobre el que se monta.

Un extensómetro eléctrico de resistencia variable solo puede ser compensado para materiales que contengan idéntico coeficiente de dilatación. Normalmente se compensan para acero ($11.10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) y aluminio ($25 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) también se puede apoyar sobre los dispositivos de montaje adecuados, los cuales ayudarán a disminuir los errores por variación de temperatura.

3.4. TIPOS DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE

En los extensómetros eléctricos de resistencia variable no es posible elegir un material de soporte o base y una aleación para el conductor o lámina impresa en forma independiente, ya que éstos aparecen como un sistema y son clasificados en series, estas series además de dar la información del material de que está hecha la base, y la aleación del material que se utilizó en la hechura del extensómetro, da la forma y geometría del extensómetro, valor óhmico, longitud de medición y para el material de que está hecha la superficie de estudio del modelo a ensayar. Se analizará la clasificación que utiliza la empresa Vishay-Measurement Group para la identificación de sus extensómetros por ser el tipo de extensómetros que se emplearán en los experimentos que se realizarán en esta tesis.

En el catálogo 500 partes A y B de esta empresa se menciona la gama de series de extensómetros eléctricos de resistencia variable que existen en el mercado habiendo sin exagerar al menos 10000 tipos de extensómetros

eléctricos de resistencia variable. Entre la extensa variedad de extensómetros eléctricos de resistencia variable la serie CEA es la más utilizada y será la serie que se usará en el presente trabajo debido a sus excelentes características como por ejemplo, las grandes terminales para el soldado de cables, que evitan la necesidad de usar terminales adicionales y el puenteo.

Es importante no perder de vista las indicaciones de las tablas que se proporcionan en ese catálogo, ya que sirven únicamente de guía para las condiciones generales de ensayo, y se requiere consultar las recomendaciones anexas para una elección precisa y adecuada del extensómetro eléctrico de resistencia variable a usar.

Para extensómetros eléctricos de resistencia variable de una sola rejilla su configuración depende principalmente de:

- 1.- Terminales para soldar. Estas deberán ser compatibles en tamaño y orientación con el espacio disponible para su instalación, el arreglo y las terminales no deberá afectar la facilidad de soldado para el instalador.
- 2.- Ancho de la rejilla. En el caso de que existan severos gradientes de deformación perpendiculares al eje del extensómetro eléctrico de resistencia variable, un elemento tan angosto como sea posible minimizará el error por esa causa; no obstante, una rejilla ancha mejorará la disipación debida a la excitación eléctrica y la estabilidad de las lecturas, sobre todo cuando el extensómetro eléctrico de resistencia variable ha de ser instalado en material con baja transmisibilidad térmica.
- 3.- Resistencia eléctrica del extensómetro. En ciertos casos, la única diferencia entre dos extensómetros es su resistencia eléctrica que comunmente puede ser de 120 o 350 ohms. Para la elección se debe tomar en cuenta que un extensómetro eléctrico de resistencia variable de 350 ohms genera un tercio del calor que produce uno de 120 ohms bajo las mismas condiciones eléctricas, además reduce los efectos nocivos del

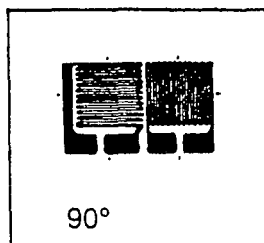
cableado, como la pérdida de sensibilidad ó cambios de resistencia por la temperatura; lo que es importante, cuando la longitud del cable es grande. Así mismo, cuando se emplean interruptores, anillos rosantes u otra fuente de cambio de resistencia se mejora la calidad de la señal.

En el análisis experimental de esfuerzos, el uso de extensómetros eléctricos de resistencia variable de un sólo elemento (fig. 3.5b) se recomienda cuando se conoce la dirección de los esfuerzos principales dentro de un rango de $\pm 5^\circ$; esta limitación reduce considerablemente su uso sobre todo cuando se sospeche de la existencia de un estado biaxial de esfuerzos, debido a que en este caso se inducirán serios errores de lectura.

Para casos de estado biaxial de esfuerzos y cuando no se conoce la dirección de esfuerzos principales, se usan extensómetros eléctricos de resistencia variable de tipo roseta en T de dos elementos es decir, que se emplean dos extensómetros eléctricos de resistencia variable en la misma base de soporte (fig. 3.7) para determinar la dirección de los esfuerzos principales por tener dos elementos ortogonales entre sí; es muy importante que la dirección de esfuerzos principales se conozca con una precisión como la antes mencionada ya que de no ser así, resulta más conveniente usar un extensómetro eléctrico de resistencia variable de roseta de tres elementos.

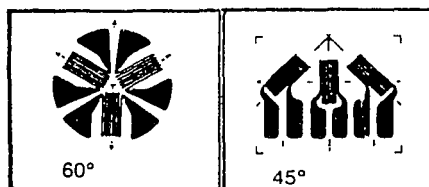
Para el caso general de estado biaxial de esfuerzos y cuando no se conoce la dirección de los esfuerzos principales, el uso de extensómetros eléctricos de resistencia variable del tipo roseta de tres elementos (fig 3.8) es lo más indicado. Estos elementos se instalan en cualquier dirección, no obstante, por lo general uno de ellos se orienta en la dirección de uno de los dos ejes de simetría de la pieza a instrumentar, ya que ésto facilita la identificación de la dirección de los ejes principales; teniendo solución teórica para su análisis (capítulo 1). Las rosetas de tres elementos, existen de 45° y 60° de ángulo de separación entre cada elemento; como se mencionó en

capítulos anteriores, las rosetas de tres elementos con 45° de separación entre sus elementos es la de más fácil análisis, por ello la más usada.



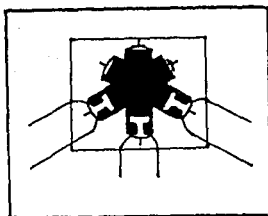
Extensómetro tipo roseta modelo en T

Figura 3.7



extensómetros de tres elementos o tipo roseta en un mismo plano

Figura 3.8



extensómetros de tres elementos o roseta tipo apilada

Figura 3.8

Existe la posibilidad de utilizar rosetas en las que sus elementos se encuentran en un mismo plano (fig. 3.8) o apiladas (fig.3.9) Resulta obvio que la primera característica sobresaliente de esta configuración es el espacio que ocupan una y otra, aunque la reducción de espacio provoca una mala disipación de calor y resulta menos estable que las de un sólo plano para ensayos estáticos; las rosetas apiladas tienen las ventajas que para gradientes severos de deformación sus lecturas son más precisas que las de un sólo plano aunque resultan menos confiables en zonas de radio reducidos; no obstante, estas desventajas tendrán que ser aceptadas cuando la reducción del espacio lo exija.

Como ya se dijo hay una variedad inmensa de extensómetros eléctricos de resistencia variable, esta variedad se divide en configuraciones y series las que se diferencian por las variantes constructivas para facilitar su instalación o instrumentación pero esto se refleja en el costo por lo que hay que hacer un análisis costo - beneficio para poder decidir si es la mejor opción.

Algunas ventajas que presentan los extensómetros con características especiales son:

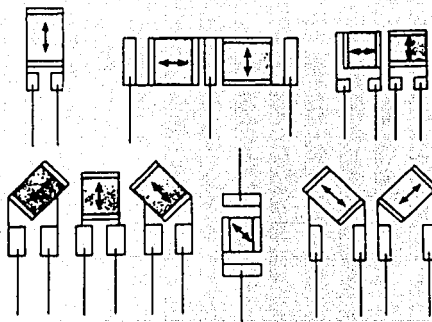
- 1.- Reducción significativa del tiempo y costo de instalación.
- 2.- Exigen menor habilidad para su instalación.
- 3.- Incrementan la confiabilidad en el soldado de los cables.
- 4.- Facilitan la instalación en condiciones difíciles.
- 5.- Mayor vida útil.

A continuación veremos una tabla con las principales características de cada una de las opciones disponibles:

OPCION	DISPONIBLE EN SERIES	CARACTERISTICAS PRINCIPALES
W	EA, EP, WD, WA, ED, EK, WK	TERMINALES INTEGRADAS Y ENCAPSULADO
E	EA, ED, EK, EP	ENCAPSULADO TERMINALES EXPUESTAS
SE	EA, ED, EK, EP	PUNTOS DE SOLDADURA Y ENCAPSULADO
L	EA, ED, EK, EP	CON CABLES DE COBRE SUAVE SOLDADOS
LE	EA, ED, EK, EP	CON CABLES DE COBRE SUAVE SOLDADOS Y ENCAPSULADO

En todos los casos, el encapsulado sirve para proteger al extensómetro eléctrico de resistencia variable del medio ambiente en el que se encuentre ya que es una pequeña capa que cubre a la rejilla y parte de la base dejando al descubierto las terminales para soldar los cables; esta capa está hecha de polimida un material a base de polímeros, por otra parte el cableado se hace con suaves cables de cobre que facilitan su instalación. En el catálogo 500 de Vishay - Measurement Group parte A se enlistan las opciones disponibles en las distintas series que se pueden adquirir y, en la parte B se describen más a detalle las características tanto de las opciones como de las series.

Un ejemplo de ello, es para el caso de las series L y LE se dispone de distintas orientaciones para los cables de acuerdo con las características geométricas que presente el extensómetro eléctrico de resistencia variable (fig. 3.10). También esas orientaciones se aplican a las series WA, WK y WD cuando se hayan disponibles en el mercado.



Distintas orientaciones para los cables de conexión

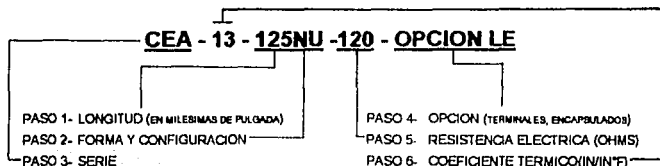
Figura 3.10

- SISTEMA DE CLASIFICACION

El sistema de clasificación de los extensómetros eléctricos de resistencia variable que se usa, se aplica a aquéllos de uso general ya que para extensómetros eléctricos de resistencia variable especiales se tiene que remitir al fabricante. A continuación describiremos la clasificación que emplea la empresa antes mencionada:

En base a la clasificación alfanumérica anterior se dice que la utilización de los extensómetros eléctricos de resistencia variable más comunes se reduce a unos ciertos por tanto, ésta clasificación nos permite identificar con precisión cualquiera de los extensómetros eléctricos de resistencia variable y es precisamente esa clasificación una guía práctica para seleccionar el más adecuado al trabajo que se pretenda realizar. A pesar de este gran número de variables que se involucran en el proceso de selección de un extensómetro eléctrico de resistencia variable se puede resumir en seis pasos básicos (fig 3.11) que son:

**CONSEJOS PARA UNA RAPIDA SELECCION DE EXTENSOMETROS
ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE**



Interpretación de la clasificación de los extensómetros eléctricos

Figura 3.11

- 1.- Seleccionar su longitud de acuerdo con los requerimientos del experimento y está dado en milésimas de pulgada.
- 2.- La forma y configuración del extensómetro eléctrico de resistencia variable depende de las condiciones geométricas y de las sollicitaciones del elemento a analizar.
- 3.- Consiste en determinar la serie o material de la rejilla así como su base.
- 4.- Aquí se marca la opción del tipo de terminales que se usarán además de saber si es encapsulado o no así como si tiene cables de cobre soldados.
- 5.- Valor de la resistencia eléctrica del extensómetro eléctrico de resistencia variable y está dado en ohms.
- 6.- Se debe seleccionar el coeficiente de dilatación térmica adecuado y está dado en el sistema inglés (in / in °F).

Es aconsejable iniciar con un extensómetro eléctrico de resistencia variable de unos tres milímetros (0.125 pulg) de longitud a partir del paño interior de los hilos de conexión entre las rejillas, ya que éste se encuentra en

una gran variedad de formas, presenta buenas condiciones para su instalación y permite lecturas más confiables bajo cualquier gradiente de deformación; de tal modo que las siguientes opciones que se busquen se hagan a partir de esta configuración, un extensómetro eléctrico de resistencia variable de mayor longitud normalmente se elige cuando se requiere mayor área para facilitar la dispersión de calor, mejora la lectura promedio en el caso de materiales aglomerados o no homogéneos además de facilitar su instalación y, en caso contrario, cuando se requiere un extensómetro eléctrico de resistencia variable de menor longitud es porque se esperan contracciones de esfuerzos, tomar lecturas picos o máximas o el espacio así lo requiere.

En cuanto a la forma y configuración vimos ya que esta decisión depende de que si se sospecha de un estado biaxial de esfuerzos o se sabe que el esfuerzo que se presenta es biaxial, o si se requiere conocer la dirección de los esfuerzos principales, si éste fuese el caso será necesario decidir si se emplea una roseta aplada o de un sólo plano.

Para decidir que tipo de base se requiere, se necesita saber las características del material en que está hecho el elemento a ensayar y buscar en el catálogo antes mencionado la base que mejor se adapte, las bases más usuales son las de resinas epóxicas.

La resistencia eléctrica depende de las características de la prueba a efectuar y de los materiales que se utilicen.

La elección del coeficiente de dilatación térmica es importante ya que si se manejan variaciones de temperatura éste no afectará a las lecturas del incremento de resistencia por ser similar al material del elemento de ensayo.

3.5. INSTRUMENTACION

Para instrumentar un elemento de ensayo se requiere de tres pasos importantes que son: la preparación de la superficie, pegado del extensómetro eléctrico de resistencia variable, y soldado correcto de los cables.

Para la preparación de la superficie se requiere desengrasar el área donde se va a colocar el extensómetro eléctrico de resistencia variable de mínimo dos veces su superficie con una gasa y un solvente que es cloroetileno de alta calidad para metales y para plásticos se utiliza el ferón.

A continuación se lija la superficie de aplicación acompañado de un ácido fosfórico al 5% , una vez hecho esto se trazan los ejes con un lápiz 2 o 3 H para aluminio o bolígrafo de punta de bronce para el acero; luego se vuelva aplicar ácido fosfórico por unos minutos para provocar una reacción química con el material de trazado y éste quede grabado.

Se le aplica a la superficie agua amoniacada al 6.5% para neutralizar los efectos del ácido y evitar que el extensómetro eléctrico de resistencia variable se dañe.

El proceso de pegado del extensómetro eléctrico de resistencia variable requiere de sumo cuidado para evitar que éste se dañe; se utilizan libres de grasa todos los instrumentos de apoyo como son: pinzas de cirujía y base de apoyo. Con las pinzas se retira el extensómetro eléctrico de resistencia variable de su empaque original con mucho cuidado y se coloca sobre la base de apoyo con la rejilla hacia arriba, luego cortamos una cantidad de cinta adhesiva transparente ó mágica suficiente para poder cubrir al menos cinco veces la longitud del extensómetro eléctrico de resistencia variable, ésta se fija en la base de apoyo procurando que su centro esté al centro del extensómetro eléctrico de resistencia variable y procedemos a deslizar con el dedo a la cinta adhesiva, quedando ésta completamente pegada a la base.

Una vez efectuado lo anterior se despegla la cinta adhesiva de la base de apoyo procurando no exceder un ángulo mayor de 30° quedando pegada a ésta el extensómetro eléctrico de resistencia variable. Procedemos a pegar un extremo de cinta a la superficie de ensayo procurando que el trazo de los ejes coincidan con las marcas de orientación que traen los extensómetros eléctricos de resistencia variable, la otra punta se coloca sobre la ya pegada, quedando el extensómetro eléctrico de resistencia variable como si estuviera suspendido en el aire.

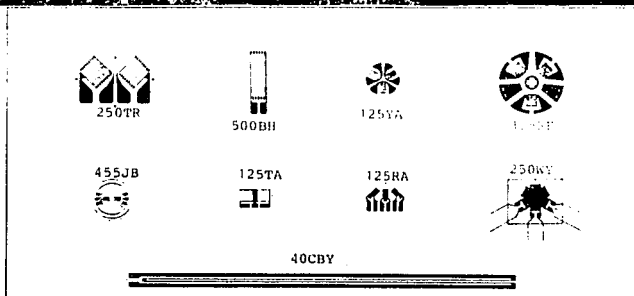
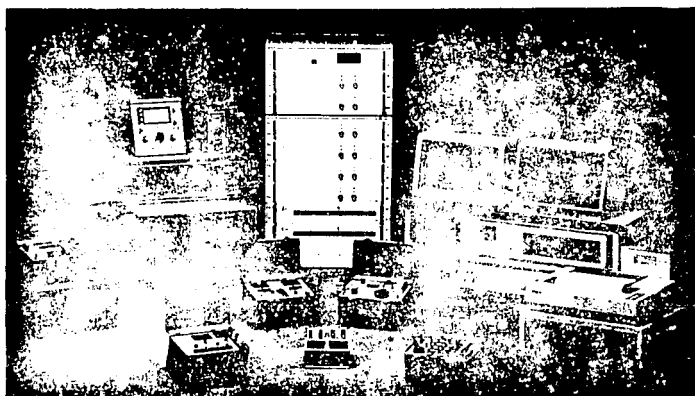
Se procede a continuación a colocar el catalizador del pegamento a la superficie del extensómetro eléctrico de resistencia variable que está expuesta procurando no tocar la superficie del elemento de ensayo. Posteriormente se le aplica a la superficie del elemento de ensayo una o dos gotas del pegamento recomendado por el fabricante e inmediatamente después se despegla la punta de la cinta y se desliza ésta con una gasa y presionándola con el dedo contra la superficie del elemento a ensayar durante unos minutos.

La soldadura que se utiliza normalmente tiene una temperatura de fusión de 220 °C. De cualquier forma, es muy importante que la temperatura del caudín sea la adecuada al tipo de soldadura ya que si la temperatura no está cercana a la de fundición, se tendrá dificultad en soldar y se podrían tener problemas con la formación de puntos de soldadura con picos en lugar de un punto semiesférico de superficie suave, vaporización de la pasta para soldar o fundente y aún pérdida de la misma soldadura; es recomendable, que se utilice soldadura con fundente (corazón de pasta) de aproximadamente un milímetro de diámetro y un caudín con regulador de temperatura; o en su defecto se puede emplear un caudín de 25 watts en el cual es más fácil no tener temperaturas excesivas.

No se deberá dejar que se caliente el extensómetro eléctrico de resistencia variable en el proceso de soldadura ya que éste sufriría daños en sus características físicas y de medición.

3.6 EQUIPO DE MEDICION

El equipo depende de las condiciones en que se encuentre el elemento a ensayar pues pueden ser tan sencillos o sofisticados como se requiera para lecturas aisladas o simultáneas, estas últimas se pueden hacer con puentes eléctricos de Weastone o circuito eléctrico de medición de cuatro canales con conmutadores de hasta 10 canales cada uno; pero si se requiriese conectar más de dos de estos equipos se recomienda procesar la información por computadora mediante una tarjeta codificadora, siendo capaz de medir más de 64 extensómetros eléctricos de resistencia variable al mismo tiempo, estos equipos y accesorios para medición e instrumentación los hay en el mercado de una gran variedad y modelos a elegir (fig. 3.12).



Diferentes modelos de equipos y extensómetros eléctricos de resistencia variable
 Figura 3.12

CAPITULO 4

UTILIZACION DEL METODO EXPERIMENTAL DE EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE PARA LA DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS EN UN MODELO DE VIGA EN CANTILIVER

OBJETIVO:

**DETERMINAR LAS PROPIEDADES MECANICAS BASICAS A PARTIR DE LOS DATOS
OBTENIDOS POR MEDIO DE LOS EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA
VARIABLE**

En este capítulo se realizarán los experimentos relativos a la determinación de las propiedades mecánicas básicas de los materiales (Módulo de Elasticidad o de Young y la Relación de Poisson) en un modelo de viga de aluminio instrumentada con medidores de deformación (Extensómetros Eléctricos de Resistencia Variable); así mismo, se propone una metodología a seguir para efectuar los experimentos y obtener los resultados deseados.

4.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

A pesar de que pueden usarse vigas de cualquier material, las de aluminio son más convenientes. Debido a que el aluminio es un material barato, fácilmente maquinable y no sujeto a la corrosión. Además, por el bajo valor de su módulo elástico produce deformaciones relativamente grandes con cargas pequeñas. Las vigas estándares de aluminio que se usan como modelo de ensayo son de 31.75 cm de largo, de 2.54 cm de ancho y de 0.64 cm de sección transversal (1/4 x 1 x 12 1/2 pulg) de aleación 6061-T6.

Las vigas de sección transversal más delgadas son para aquellos experimentos que usen pesas para deformarlas, dado que con cargas pequeñas como de 500 gr se pueden obtener deformaciones del orden de 440 μ m (micro-deformaciones) o hasta más.

El principio de la viga en cantiliver (empotrada o ménsula) es particularmente apropiado para medir las propiedades mecánicas básicas de los materiales, y para realizar una amplia variedad de mediciones de deformación, así como otros experimentos de análisis de fuerzas. Los modelos o especímenes de prueba son baratos y fáciles de fabricar, y sólo se requieren fuerzas pequeñas para producir grandes deformaciones y esfuerzos altos. Además la teoría de la viga en cantiliver está ampliamente desarrollada y los resultados experimentales se ajustan a los teóricos. La teoría de las vigas antes mencionadas se aplica en realidad y rigurosamente sólo a vigas angostas sometidas a pequeñas desviaciones es decir, vigas en las que el ancho comparado con el espesor, y la desviación horizontal es pequeña comparada con la longitud. Sin embargo, las diferencias con los resultados teóricos son insignificantes en el caso de vigas cuyo ancho sea varias veces

mayor que el espesor y para desviaciones superiores al 10% de la longitud. Estas consideraciones permiten el empleo de vigas lo suficientemente anchas a las que se les pueden montar extensómetros eléctricos de resistencia variable de tamaño considerable, y que sufran desviaciones amplias que permitan observaciones reveladoras sobre los modos de deformación.

4.2 EQUIPO UTILIZADO

- EXTENSOMETROS ELECTRICOS DE RESISTENCIA VARIABLE

Se utilizarán extensómetros eléctricos de resistencia variable del tipo CEA-13-125UN-120 con compensación térmica para aluminio de 25 x 15⁶ cm / cm por °C; dado que la deformación varía linealmente con la longitud de la viga en cantiliver. Dentro de la amplia variedad que existe de extensómetros eléctricos de resistencia variable, se pueden usar de otro tipo, pero éste es el que mejor se adapta a las necesidades del experimento. Este tipo de extensómetros son los de menor costo, instalación normal, y cuentan con la sensibilidad adecuada.

-MARCO DE CARGA

Es un marco de flexión, el cual está construido especialmente para ensayos de modelos de viga en cantiliver de diferente material (fig.4.1); está hecho de una aleación de aluminio anodizado de alta resistencia provisto con un sistema de fijación de los modelos, el cual garantiza el empotramiento en alguno de los extremos de la viga a ensayar asegurándose de que el extremo libre esté centrado entre las laterales del marco; tiene un tornillo calibrador de carga de acero de 1/4 de pulgada de diámetro con un barril calibrado el cual puede deformar a la viga de ensayo tanto como el tornillo lo permita; éste se encuentra en el lado opuesto del sistema de empotramiento y le aplica carga a la viga a través de un pivote de nylon para evitar que maltrate la superficie de aplicación de la carga. También se pueden hacer las pruebas con pesas, las cuales se fijan mediante un soporte enganchado en la muesca de la parte superior de la viga del lado opuesto del empotramiento.



Marco de carga

figura 4.1

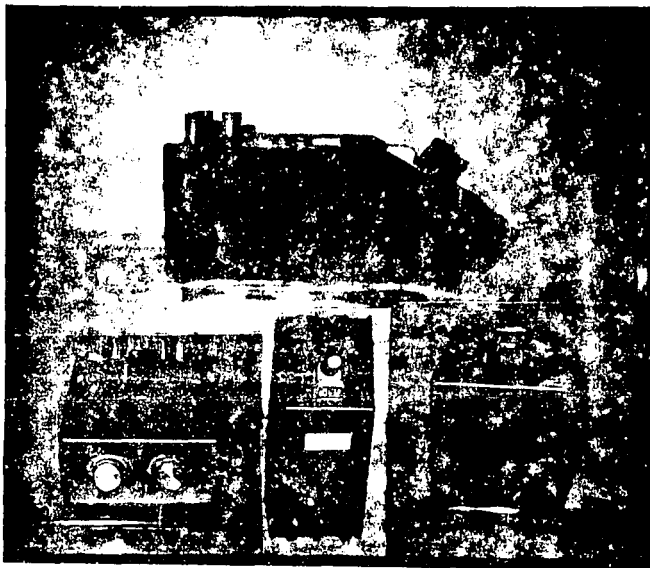
El tornillo calibrador de carga posee un barril móvil calibrado en incrementos de 5.08×10^{-3} cm ó 2×10^{-3} pulg por paso de rosca; un cilindro fijo con marcas de 0.250 cm (0.1 pulg) ; tiene también una línea índice para leer la indicación del barril. El cilindro se puede ajustar aflojando el tornillo de fijación para girarlo hasta colocar la línea índice coincidiendo el cero con la escala del barril, y de esta manera se determinará el punto de flexión cero, entonces, se asegura el cilindro apretando el tornillo de fijación.

- PUENTE ELECTRICICO

Se usará el puente eléctrico o circuito electrónico de medición VISHAY / ELLIS-10 (fig 4.2), el cual funcionará como puente eléctrico de Wheastone completo y amplificador de señal, viene provisto de 5 postes de conexión los cuales se describen a continuación:

- 1.- P+: este poste sirve para conectar el hilo conductor considerado como positivo en nuestro extensómetro eléctrico de resistencia variable y es usado para pruebas a tensión.
- 2.- P-: este poste sirve para conectar el hilo conductor considerado como positivo en el extensómetro eléctrico de resistencia variable y es usado para pruebas a compresión.
- 3.- S: a este poste se conecta uno de los hilos conductores considerados como negativos en el extensómetro eléctrico de resistencia variable sirviendo como compensador por temperatura y resistividad del hilo conductor, que va conectado al vómetro (medidor de la variación de resistencia eléctrica).
- 4.- D1: a este poste va conectado el otro hilo conductor del polo negativo del extensómetro eléctrico de resistencia variable que a su vez se conecta al elemento pasivo (resistencia interna del aparato) para cerrar el circuito del puente eléctrico completo de Wheastone
- 5.- D2: Igual que al anterior, a este poste va conectado el otro hilo conductor del polo negativo del extensómetro eléctrico de resistencia variable que a su vez se conecta al elemento pasivo (resistencia interna del aparato) para cerrar el circuito del puente eléctrico completo de Wheastone, dependiendo si se va a determinar deformaciones por tensión o compresión.

Se utiliza una placa para unir a D1 con P- ó D2 con P+; para poder realizar pruebas a compresión o tensión, dado que este equipo no realiza mediciones simultáneas.



Puente eléctrico
figura 4.2

Cuenta con un vùmetro como carátula lectora para determinar la variación de la resistencia del extensómetro eléctrico de resistencia variable y comprobar el balance del equipo, contiene un reóstato en la parte inferior frontal derecha para dar el balance al equipo, ya sea con carga o sin ella; otro en el mismo lugar pero del lado izquierdo para poder seleccionar el factor de sensibilidad longitudinal K (gage factor) que marque el fabricante. Posee otro reóstato en la parte frontal superior con una carátula digital de medición, para poder tomar lecturas de deformación ($\mu\text{s} \times 10$) en función de la variación en la resistencia eléctrica por medio del reóstato en puente eléctrico.

En la parte posterior del dispositivo de medición se cuenta con una entrada para osciloscopio, la cual se utiliza para pruebas dinámicas o para determinar esfuerzos mediante frecuencias eléctricas.

En la parte inferior del dispositivo de medición se halla un compartimiento para tres baterías de 1.5 Volts, que son las encargadas de suministrar la energía necesaria para la operación del dispositivo.

4.3 DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD

- INTRODUCCION

El propósito de este experimento es medir el Módulo de Elasticidad o Módulo de Young de un modelo de aluminio en cantiléver al que se le aplica una carga de flexión. El Módulo de Elasticidad es una constante fundamental de los materiales y es un indicador de la rigidez de los mismos.

Para muchos materiales de estructuras; como por ejemplo los aceros y las aleaciones de aluminio, la deformación es función esencialmente lineal del esfuerzo por encima del rango normalmente usado en elementos de transmisión de carga. En la figura 4.3 se muestra una curva típica de esfuerzo - deformación para tales metales bajo esfuerzos uniaxiales (tensión, compresión o flexión). Por definición, la pendiente de la porción lineal del diagrama es el Módulo de Elasticidad. Por lo tanto,

$$E = \tan \theta = \Delta\sigma / \Delta s \quad (1)$$

Donde:

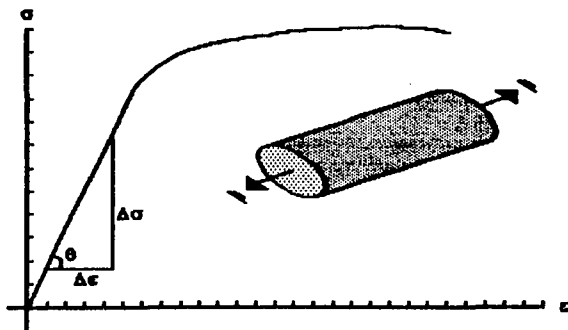
E = módulo de elasticidad, kg/cm²

θ = ángulo de inclinación de la recta.

$\Delta\sigma$ = incremento de esfuerzo, kg/cm²

Δs = incremento de deformación, cm/cm.

Existen otras definiciones del módulo de elasticidad para materiales que no tienen región lineal en la curva de esfuerzo - deformación.



Curva Esfuerzo-Deformación

Figura 4.3

El esfuerzo es un concepto definido, y no puede ser medido directamente. Por ello, la determinación experimental de los esfuerzos en un miembro estructural complejo o una pieza mecánica, requiere ordinariamente de efectuar la medición de las deformaciones y el cálculo posterior de los esfuerzos a partir de la Ley de Hooke. Para esfuerzos uniaxiales, la Ley de Hooke es simplemente una variante de la ecuación (1):

$$\sigma = E \epsilon \quad (2)$$

Para el caso más general de esfuerzos biaxiales, la Ley de Hooke es como sigue:

$$\sigma_x = [E / (1 - \nu^2)] (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (3)$$

$$\sigma_y = [E / (1 - \nu^2)] (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (4)$$

Donde:

ν = relación de Poisson, adimensional.

E = módulo de elasticidad, kg/cm^2 .

σ_x = esfuerzo en el eje x , kg/cm^2 .

σ_y = esfuerzo en el eje y, kg/cm².

ϵ_x = deformación en el eje x, cm/cm.

ϵ_y = deformación en el eje y, cm/cm.

Para determinar ambos esfuerzos, se requiere medir las dos deformaciones producidas, y dos constantes elásticas (E, el módulo de elasticidad y ν , la relación de Poisson) deben ser conocidas. Es obvio que para las ecuaciones (2), (3) y (4) el porcentaje de error en σ será el mismo que en E. Por lo tanto, la obtención de valores exactos del módulo de elasticidad de los materiales estructurales son de vital importancia en ingeniería.

- EQUIPO Y MATERIALES

- Marco de carga en cantiliver
- Viga de aleación de aluminio 6061-T6 de 6 x 25 x 320 mm
- Extensómetros eléctricos de resistencia variable con compensación térmica (1 ó 2).
- Indicador de deformaciones portátil
- Juego de aplicación de extensómetros eléctricos de resistencia variable
- Pesas de laboratorio.
- Micrómetro de 0 a 2.54 cm.
- Regla de 30 cm.

PROCEDIMIENTO

A. Generalidades

En este experimento se obtendrá el diagrama de esfuerzo deformación a flexión para la aleación de aluminio 6061-T6, cargando una viga en cantiliver como se muestra en la figura 4.4.

Conociendo las dimensiones de la viga, pueden calcularse los esfuerzos en función de la carga aplicada a partir de la fórmula de flexión:

$$\sigma = Mc / I = 6PL / bt^2 \quad (5)$$

Donde:

σ = esfuerzo

M = momento de flexión en la línea central (kg - cm)

c = semiespesor de la viga (cm)

I = momento de inercia de la sección transversal de la viga (cm⁴)

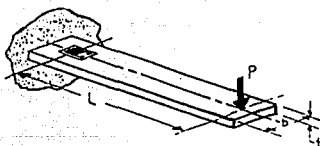
P = carga (kg)

L = Longitud efectiva de la viga (cm)

b = Ancho de la viga (cm).

t = Espesor de la viga (cm).

La deformación superficial en la sección de interés será medida por un extensómetro eléctrico de resistencia variable pegado en este punto. La carga será aplicada gradualmente, y las deformaciones correspondientes registradas. Los esfuerzos (calculados con la ecuación 5) y las deformaciones serán tabulados a fin de obtener la gráfica de la cual se determinará el módulo de elasticidad.



Aplicación de la carga P

figura 4.4

B. Selección e instalación del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable para micromediciones que se suministran en el mercado poseen compensación por cambios de temperatura, por lo que pueden ser usados sobre un material con un coeficiente de expansión térmica particular. Por ello, el extensómetro eléctrico de resistencia variable empleado en este experimento puede usarse con un arreglo de puente eléctrico del tipo de un cuarto de puente empleando como resistencia o elemento activo eléctrico un extensómetro eléctrico de resistencia variable de 120 Ohms. Puede usarse un circuito de tres alambres para la operación del puente eléctrico antes mencionado, para así lograr la compensación colocando alambres de igual longitud en las terminales adyacentes del circuito puente (véase el diagrama de conexiones pág. 4-13).

Un extensómetro eléctrico de resistencia variable indica la deformación promedio en el área cuando se halla colocado en un campo no uniforme de deformaciones. En este caso, dado que la deformación varía linealmente a través de la longitud de la viga, el extensómetro eléctrico de resistencia variable indica la deformación ocurrida en la línea central. Si esto es cierto, el tamaño del extensómetro eléctrico de resistencia variable no es importante, y puede usarse ya sea el 250BG/A o el 125AD/A de la marca Vishay (ambos de 120 Ohms con compensación térmica para aluminio).

C. Obtención de resultados.

Se eleva el tornillo calibrado de carga, y se inserta la viga en el marco, con el extremo instrumentado en la prensa y con el extensómetro eléctrico de resistencia variable en la cara superior.

Se centra el extremo libre de la viga entre los laterales del marco, sujetándola firmemente con el tornillo de sujeción.

Se conectan las terminales del extensómetro eléctrico de resistencia variable a los postes de conexión como se muestra en el diagrama de conexiones (vease pág. 4 - 13). Luego se conectan las terminales apropiadas del cable del marco a los postes S- , P+ y D2 del indicador.

Se coloca la pieza puente entre los postes P- y D1 para completar el circuito puente con la resistencia de 120 Ohms integrada.

Se mide la distancia del centro del extensómetro eléctrico de resistencia variable al punto de aplicación de la carga en el extremo libre de la viga, usando una regla exacta. Se mide el ancho y el espesor de la viga con un micrómetro. Se calcula, usando la fórmula de flexión (ecuación 5), la carga $P=6.5$ kg que será aplicada al extremo libre de la viga, producirá un esfuerzo de aproximadamente 950.00 kg/cm².

Con la viga descargada (excepto por su propio peso y el peso del gancho para pesas), se coloca la perilla de factor de sensibilidad en el puente eléctrico en el valor correspondiente al indicado por el fabricante del extensómetro eléctrico y se enciende el instrumento. Se coloca la escala de medición en ceros y la aguja medidora del puente eléctrico en la posición nula (cero), usando el control de balance, cuidándose de evitar errores de paralaje (no ajustar por ningún motivo el balance mientras se desarrolla el experimento). Se aplica la carga calculada en 10 etapas, crecientemente; a cada incremento de carga, se pone la aguja en cero con el control de medición y se registra la deformación indicada en la carátula lectora y la carga correspondiente en la hoja de trabajo. Se descarga la viga en 10 etapas, anotando de nuevo la carga y la deformación en cada una de ellas.

- ANALISIS Y PRESENTACION DE RESULTADOS

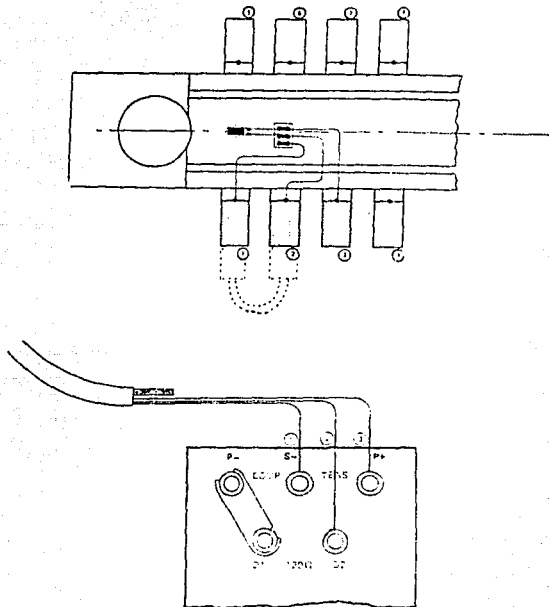
Se calcula el esfuerzo con la ecuación (5) para cada incremento y decremento de carga, usando pesas exactas. Se anota la carga, el esfuerzo y la deformación en cada etapa en la tabla de la hoja de trabajo. Se ajustan las escalas de esfuerzos en los ejes coordenados de papel milimétrico de tal manera que se distribuyan los rangos de las variables adecuadamente. Se grafican los datos de la tabla.

Los puntos de los datos deben describir aproximadamente una línea recta y no debe haber diferencia (o si la hay, debe ser mínima) entre los puntos de incremento y los de disminución de carga. Si los datos no se comportan como se ha descrito, el extensómetro eléctrico de resistencia variable puede

haberse instalado incorrectamente. Esto puede ser comprobado aplicando la carga total a la viga y dejándola cargada por varios minutos. Si no hay cambio en la indicación de deformación durante este período, y la lectura es nuevamente cero o casi cero cuando se retire la carga, el extensómetro eléctrico de resistencia variable estará funcionando normalmente.

Con la regla, se dibuja una línea recta de tal manera que los puntos se distribuyan proporcionalmente a ambos lados de la línea, pasando por los puntos en los que coincide la trayectoria. No es estrictamente necesario que la línea pase por el origen de la gráfica. Se miden los incrementos $\Delta\sigma$ y $\Delta\epsilon$ sobre la longitud de la línea de la mayor amplitud posible, y se calcula E de la ecuación (2).

- DIAGRAMA DE CONEXIONES



Nota: Se muestra un circuito de tres cables, empezando en la terminal del extensómetro eléctrico de resistencia variable de la viga donde el negativo se divide para conectarse a los postes 1 y 2. Si el negativo no se divide en la terminal del extensómetro eléctrico de resistencia variable, se puede implementar un circuito de tres cables conectando el negativo al poste 1 y puenteadando éste con el poste 2 como se indica en las líneas punteadas.

HOJA DE TRABAJO

DETERMINACION DEL MODULO DE ELASTICIDAD

DATOS :

Longitud efectiva de la viga	L = 25.00 cm.
Espesor de la viga	t = 0.64 cm.
Ancho de la viga	b = 2.54 cm.

La deformación se obtendrá por medio de la variación de la resistencia eléctrica registrada por el puente eléctrico y el esfuerzo a carga y descarga se obtendrá por la relación dada en la ecuación (5) (pág. 4-9).

$$\text{esfuerzo} = \sigma = Mc / I = 6PL / bt^2$$

No.	CARGA	DEFORMACION	ESFUERZO	DEFORMACION	ESFUERZO
	EN	A CARGA	A CARGA	A DESCARGA	A DESCARGA
	KG	1 X 10 ⁴ CM/CM	KG/CM ²	1 X 10 ⁴ CM/CM	KG/CM ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.50	105.00	73.23	105.00	73.23
3	1.00	211.00	146.46	211.00	146.46
4	1.50	317.00	219.69	317.00	219.69
5	2.00	423.00	292.91	423.00	292.91
6	2.50	528.00	366.14	527.00	366.14
7	3.00	632.00	439.37	633.00	439.37
8	3.50	735.00	512.60	736.00	512.60
9	4.00	839.00	583.83	840.00	585.83
10	4.50	942.00	659.06	942.00	659.06
11	5.00	1,043.00	732.28	1,045.00	732.28
12	5.50	1,146.00	805.51	1,148.00	805.51
13	6.00	1,253.00	878.74	1,252.00	878.74
14	6.50	1,357.00	951.97	1,357.00	951.97

HOJA DE TRABAJO

Los incrementos de deformación estarán dados por la diferencia de la deformación que se esté midiendo y la obtenida en la medición anterior, en microdeformaciones (1×10^{-6} cm/cm).

Los incrementos de esfuerzo estarán dados por la diferencia del esfuerzo que se esté midiendo y el obtenido en la medición anterior, en unidades de esfuerzo (kg/cm^2).

No.	CARGA EN KG	INCREMENTO DE	INCREMENTO DE	INCREMENTO DE	INCREMENTO DE
		DEFORMACION A CARGA 1×10^{-6} CM/CM	ESFUERZO A CARGA KG/CM ²	DEFORMACION A DESCARGA 1×10^{-6} CM/CM	ESFUERZO A DESCARGA KG/CM ²
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.50	105.00	73.23	105.00	73.23
3	1.00	106.00	73.23	106.00	73.23
4	1.50	106.00	73.23	106.00	73.23
5	2.00	106.00	73.23	106.00	73.23
6	2.50	105.00	73.23	104.00	73.23
7	3.00	104.00	73.23	106.00	73.23
8	3.50	103.00	73.23	103.00	73.23
9	4.00	104.00	73.23	104.00	73.23
10	4.50	103.00	73.23	102.00	73.23
11	5.00	101.00	73.23	103.00	73.23
12	5.50	103.00	73.23	103.00	73.23
13	6.00	107.00	73.23	104.00	73.23
14	6.50	104.00	73.23	105.00	73.23

Módulo de elasticidad (E) a carga

$$E = \frac{\text{Incremento promedio de esfuerzo}}{\text{Incremento promedio de deformación}} = \frac{73.23 \text{ kg/cm}^2}{104.38 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}} = 0.7016 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$$

-Módulo de elasticidad (E) a descarga

$$E = \frac{\text{Incremento promedio de esfuerzo}}{\text{Incremento promedio de deformación}} = \frac{73.23 \text{ kg/cm}^2}{104.38 \times 10^{-6} \text{ cm/cm}} = 0.7016 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

RESULTADOS :

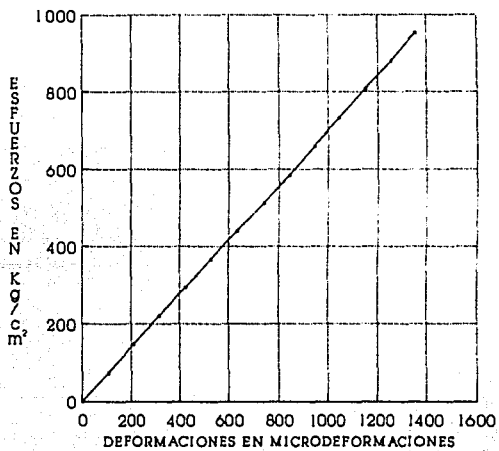
-Módulo de elasticidad (E) teórico = $0.7020 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

-Módulo de elasticidad (E) experimental = $0.7016 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

% DE ERROR :

Se obtuvo un 0.06% de error, lo cual se considera como aceptable en el análisis experimental de esfuerzos por medio de la extensometría eléctrica, ya que la diferencia en las medidas de deformación no exceden las 10 microdeformaciones que especifica el fabricante y no es mayor del 1% de error.

GRAFICA

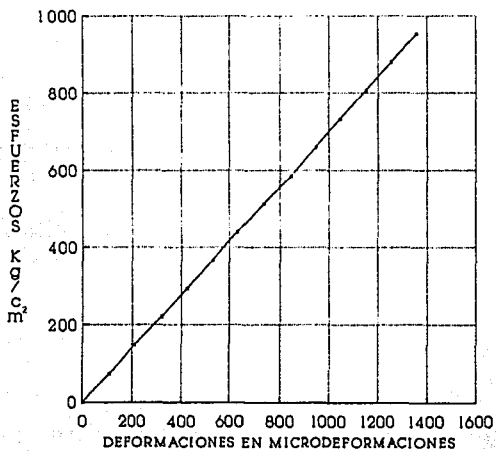
MODULO DE ELASTICIDAD
CURVA ESFUERZO-DEFORMACION

TIPO DE PRUEBA

— A CARGA

PRUEBA DENTRO DEL RANGO ELASTICO

GRAFICA

MODULO DE ELASTICIDAD
CURVA ESFUERZO-DEFORMACION

TIPO DE PRUEBA

— A DESCARGA

PRUEBA DENTRO DEL RANGO ELASTICO

4.4 DETERMINACION DE LA RELACION DE POISSON

- INTRODUCCION

El objetivo de este experimento es determinar la relación de Poisson para una viga de aluminio sujeta a flexión en cantiléver. La relación de Poisson es una de las dos constantes elásticas básicas (junto con el Módulo de Elasticidad E) que relacionan el esfuerzo y ala deformación en un campo de esfuerzos biaxiales, por ende se considera en el área experimental como una propiedad mecánica básica de los materiales. Por ejemplo, la Ley de Hooke para esfuerzos biaxiales puede escribirse como:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= [E / (1 - \nu^2)] (\epsilon_x + \nu\epsilon_y) \\ \sigma_y &= [E / (1 - \nu^2)] (\epsilon_y + \nu\epsilon_x)\end{aligned}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad.

σ_x = esfuerzo en el eje x.

σ_y = esfuerzo en el eje y.

ϵ_x = deformación en el eje x.

ϵ_y = deformación en el eje y.

ν = relación de Poisson.

Se necesitan ambos módulos elásticos (E) y la relación de Poisson (ν) para obtener los esfuerzos de las deformaciones medidas.

Es un hecho experimental observable que cuando un espécimen de prueba de un material isotrópicamente elástico es sometido a un esfuerzo uniaxial, se deforma no sólo en la dirección del esfuerzo, sino que también sufre deformaciones de signo opuesto en la dirección perpendicular. Por definición, la relación de Poisson es el valor absoluto de la razón de la deformación transversal a la deformación longitudinal, en un miembro sujeto a un esfuerzo uniaxial:

$$\nu = |\epsilon_y / \epsilon_x|$$

Así, la relación de Poisson es siempre un número positivo.

Para obtener la deformación transversal en un campo de esfuerzo uniaxial, dada la deformación axial y dicho coeficiente ν , hacemos:

$$\epsilon_y = \nu \epsilon_x$$

El coeficiente puede ser medido fácilmente con dos extensómetros eléctricos de resistencia variable en miembro sujeto a un esfuerzo uniaxial: uno alineado en la dirección del esfuerzo aplicado y otro perpendicular.^{*1*} Con este propósito, se usa un espécimen de prueba en un campo de esfuerzo uniforme, y se montan los sensores uno junto al otro en forma de T.

La relación de Poisson puede ser medida también con exactitud razonable en una viga en cantiléver, aún cuando la deformación varíe linealmente a lo largo de la viga. En este caso, el sensor axial se monta en la cara superior y el sensor transversal en la cara inferior de la misma sección. La relación entre las dos deformaciones (después de corregir la lectura del sensor perpendicular para la sensibilidad transversal) es la relación de Poisson.

* 1 * Dado que la mayoría de los extensómetros eléctricos de resistencia variable muestran cierta sensibilidad a las deformaciones perpendiculares al eje de sensibilidad primaria, usualmente es necesario corregir la indicación del extensómetro eléctrico de resistencia variable perpendicular para la sensibilidad transversal (ν_s) para obtener un valor preciso de la relación de Poisson por este método

- EQUIPO Y MATERIALES

- Marco de carga en cantiliver
- Viga de aleación de aluminio de 6 x 25 x 317.5 mm .
- Extensómetros eléctricos de resistencia variable (2).
- Indicador de deformaciones .
- Juego de aplicación para extensómetro eléctrico de resistencia variable.
- Micrómetro de 0 a 2.54 cm.

PROCEDIMIENTO

A. Generalidades.

En este experimento se usará una viga de aluminio con dos sensores de deformación para determinar la relación de Poisson en flexión. Se asume que bajo carga flexionante las deformaciones longitudinales en los puntos correspondientes de las superficies superior e inferior son numéricamente iguales, pero de diferente signo; y que ocurre lo mismo con las deformaciones laterales.

Con base en estas suposiciones, se instala un extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinalmente en la cara superior de la viga, y otro lateralmente en el punto correspondiente de la cara inferior.

La viga se sujetará en el marco de carga y se cargará a flexión hasta un nivel arbitrario de deformación. Dado que el esfuerzo es uniaxial, las deformaciones lateral y longitudinal se medirán para calcular la relación de Poisson.

Para evitar ambigüedades en la aplicación del término "deformación transversal" (es decir, para distinguir entre la deformación que es perpendicular al eje longitudinal de la viga, y la que es transversal al eje de sensibilidad primaria del extensómetro eléctrico de resistencia variable), se aplicarán las siguientes definiciones en esta y las restantes partes de este experimento:

- Deformación longitudinal.- es la deformación a lo largo del eje longitudinal de la viga.
- Deformación lateral.- es la deformación en dirección perpendicular al eje longitudinal.
- Deformación axial.- es la deformación a lo largo del eje de sensibilidad primaria del extensómetro eléctrico de resistencia variable.
- Deformación transversal.- es la deformación en dirección perpendicular al eje de sensibilidad primaria del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

B. Selección e instalación del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable de deformación para micromediciones que existen en el mercado poseen compensación por cambios de temperatura, por lo que pueden ser usados sobre un material con un coeficiente de expansión térmica particular. Por ello, los dos extensómetros eléctricos de resistencia variable empleados en este experimento pueden ser usados en un arreglo de "cuarto de puente" completando el circuito puente cada vez con la resistencia de precisión de 120 Ohms del indicador de deformaciones. Para la operación en cuarto de puente, se usa un circuito de tres cables en cada extensómetro eléctrico de resistencia variable; para obtener la compensación de los cambios de resistencia inducidos por cambios en la temperatura de los cables, se colocan cables de igual longitud en las terminales adyacentes del circuito puente.

Cuando se usa un circuito de tres cables, un par de cables son comunes a cada extensómetro eléctrico de resistencia variable en el sistema.

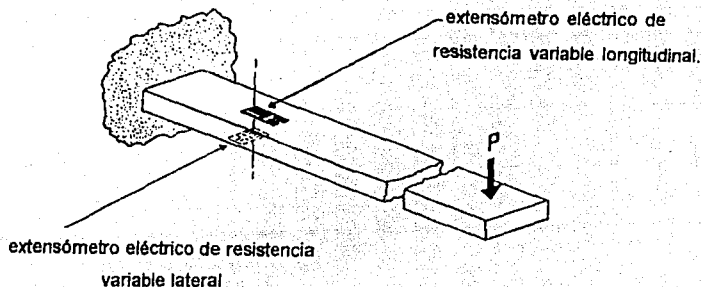
Para la viga de aluminio usada en este experimento, el tipo de extensómetro eléctrico de resistencia variable apropiado es el 250 BG/A (120

Ohms), con compensación por temperatura para materiales con coeficiente de expansión térmica de 23×10^{-6} cm / cm por °C. Dado que la deformación varía linealmente con la longitud de la viga en cantiliver, la deformación promedio (Indicada por el extensómetro eléctrico de resistencia variable de deformación longitudinal) es igual a la deformación axial en la sección correspondiente al punto medio del extensómetro eléctrico de resistencia variable. La deformación lateral es virtualmente uniforme sobre la mitad central del ancho de la viga.

Siguiendo las instrucciones de instalación del extensómetro eléctrico de resistencia variable, se marca la localización y orientación deseadas de los extensómetros eléctricos de resistencia variable en ambas caras de la viga. Estos deberán localizarse cerca del extremo de la viga que se sujetará en el marco (pero retirado de la prensa); debe tenerse cuidado de que los centros de la base de los extensómetros eléctricos de resistencia variable queden exactamente en posición opuesta uno respecto al otro. El extensómetro eléctrico de resistencia variable superior se alineará con la línea central longitudinal, con las lengüetas hacia el extremo opuesto de la viga y el extensómetro eléctrico de resistencia variable inferior se alineará con la línea central de la base sobre la línea central longitudinal de la viga como se muestra en la figura 4.5. Los extensómetros eléctricos de resistencia variable se pegan a la viga siguiendo las instrucciones. Se deja que el adhesivo seque por el tiempo recomendado, y entonces se sueldan los alambres de 6 pulgadas a los extensómetro eléctrico de resistencia variable, se retira el exceso de soldadura, y se aplica una cubierta protectora sobre ambos extensómetros eléctricos de resistencia variable (opcional).

C. Obtención de resultados.

Se retira el tornillo de carga calibrado, y se inserta la viga en el marco con el extremo instrumentado en la prensa, y el extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal en la cara superior. Se centra el extremo libre de la viga entre los laterales del marco y se aprieta la viga con el tornillo de sujeción.



Alineación de los extensómetros y aplicación de la carga

figura 4.5

Los extensómetros eléctricos de resistencia variable se conectarán (por medio del cable del marco de carga) al indicador de deformaciones (puente eléctrico) consecutivamente; primero con la viga en reposo, y de nuevo con la viga flexionada. Se obtendrá una lectura inicial de referencia en el indicador para cada extensómetro eléctrico de resistencia variable con la viga en reposo, y una lectura final con la viga flexionada.

La diferencia entre los dos conjuntos de lecturas proporcionará la deformación indicada por los extensómetros eléctricos de resistencia variable longitudinal y lateral. Se realiza este procedimiento al menos 5 veces con diferentes cargas.

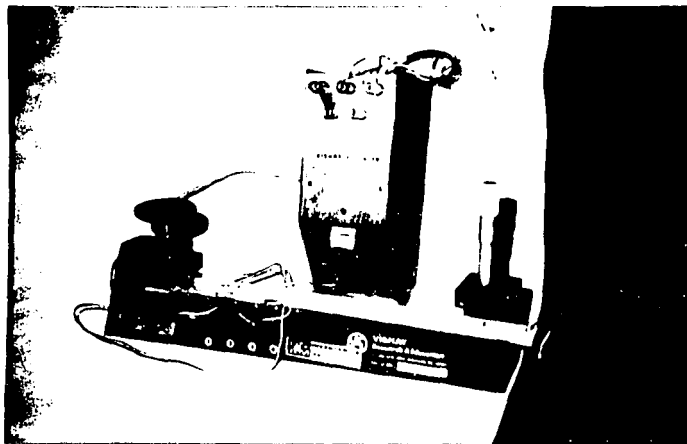
Se conectan las terminales de los extensómetros eléctricos de resistencia variable a los postes de conexión del marco de carga como se muestra en el diagrama de conexiones (Véase página 4 - 30). Con el tornillo de carga retirado de la viga, se conecta uno de los cables comunes al poste S- del indicador, y el otro al poste D2

Se conecta el cable independientemente del extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal al poste P+. Se completa el circuito con la resistencia de precisión de 120 Ohms interna mediante la pieza de puente colocándola entre P- y D1. El instrumento estará entonces listo para medir la deformación del extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal.

Se coloca la perilla de ajuste del factor del indicador de sensibilidad (Gage factor) en la posición del valor que corresponda, según el valor del factor de sensibilidad del extensómetro eléctrico de resistencia variable (proporcionado por el fabricante), se enciende el instrumento. Con el tornillo de carga retirado de la viga, se pone el control de medición en 500 (que representa 5,000 microdeformaciones, μs) y se ajusta el control de balance hasta que la aguja marque cero en la carátula lectora (o sea, con la aguja sobre la marca central de la escala). Se debe tener cuidado de evitar errores de paralaje al observar al aguja. La lectura con deflexión cero de la viga, aplicable al extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal será anotada como 5,000 μs . (se recomienda tener cuidado de no ajustar nuevamente el balance durante el experimento).

Se apaga el indicador de deformaciones, y se desconecta el cable del extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal del poste P+. Se conecta el cable independiente del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral al poste P+ para prepararlo para indicar la deformación lateral. Se enciende el indicador y se conduce la aguja a la posición nula con el control de medición. La indicación de la escala de medición se anotará como la lectura del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral para la deflexión cero de la viga.

Ahora se añade 750 μs a la última lectura y se ajusta el control de medición hasta que aparezca en la escala de medición - la aguja estará ahora fuera de balance -. Se flexiona la viga, girando el tornillo de carga en el sentido de las manecillas del reloj hasta que la aguja regrese al centro de la escala (Fig. 4.5). La deformación lateral "indicada" (incorrecta) en la viga será de 750 μs , y sólo resta encontrar la deformación longitudinal correspondiente.



Marco de carga con la viga flexionada

figura 4.6

Se apaga el indicador, se desconecta el cable independiente del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral del poste P+ y se conecta de nuevo el extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal. Se enciende el indicador y se restablece la posición cero de la aguja con el control de medición. La indicación resultante de la escala de medición es la segunda lectura para el extensómetro eléctrico de resistencia variable longitudinal. Se resta 5,000 (la lectura inicial de referencia) a aquel número para obtener la deformación longitudinal. La relación de Poisson es entonces $750 C / (X - 5,000)$, donde C es el factor de corrección para la sensibilidad del

extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral y X es la segunda lectura del extensómetro eléctrico de resistencia variable transversal longitudinal.

Para comprobar la estabilidad del sistema, se retira el tornillo de carga hasta liberar la viga, y se reajusta el control de medición para centrar la aguja en la posición no flexionada de la viga. La escala de medición indicará una lectura muy cercana a 5,000 si el sistema está operando normalmente. Si la lectura es diferente de 5,000 en una cantidad superior a $10 \mu s$, debe localizarse la fuente de error, y repetir el experimento.

Si la lectura para deflexión cero no puede repetirse, puede ser que se haya movido inadvertidamente el control de balance o el factor de ajuste, o que las conexiones no se hayan apretado lo suficiente para evitar resistencia de contacto entre conexión y reconexión. Las conexiones de los postes deben estar en contacto firme con los cables, pero sin llegar a aplastar las terminales.

- ANALISIS Y PRESENTACION DE DATOS

Antes de calcular la relación de Poisson partir de las deformaciones longitudinal y lateral, debe corregirse la deformación lateral mediante la sensibilidad transversal. Dado que la deformación longitudinal de la viga es varias veces mayor que la deformación lateral, el extensómetro eléctrico de resistencia variable está sujeto a una deformación mucho mayor en dirección transversal a su eje de sensibilidad principal.

Como un resultado de la anchura finita de las líneas de la rejillas del extensómetro eléctrico de resistencia variable y la presencia de líneas de unión que conectan a las líneas de las rejillas, los extensómetros eléctricos de resistencia variable son sensibles generalmente no sólo a las deformaciones paralelas la dirección de las rejillas sino también (aunque en menor grado) a las deformaciones perpendiculares a la dirección de la rejilla.

Esta propiedad de los extensómetros eléctricos de resistencia variable se conoce como sensibilidad transversal y se simboliza como K_t .

Se puede hacer fácilmente la corrección para la sensibilidad transversal (K_t) por medio del "nomograma para la corrección de la sensibilidad transversal" (véase página 4 - 33). Para usar el nomograma se requieren dos

datos: (1) la razón entre la deformación longitudinal a la deformación transversal indicada (que es la razón de la deformación transversal entre la deformación axial para el extensómetro lateral), y (2) la sensibilidad transversal K_t del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral, (éste último dato es proporcionado por el fabricante del extensómetro eléctrico de resistencia variable).

En lo referente al nomograma, las abscisas contienen el valor de K_t para los instrumentos usados en este experimento. Se proyecta una línea hacia la línea inclinada que representa la razón de los esfuerzos transversales "a" y paralelos al eje del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral (la razón es negativa en este momento). A partir de la intersección de estas líneas se proyecta otra en forma horizontal hacia la escala del factor de corrección en las ordenadas para encontrar "C".

Ejemplo: Se tiene un valor de $K_t = +2.0$, se localiza en el eje de las abscisas y se proyecta a la línea inclinada que representa la razón de los esfuerzos transversales "a" y paralelos al eje del extensómetro eléctrico de resistencia variable lateral, en este caso será igual a +5; se proyecta a partir de esta intersección una línea recta al eje de las ordenadas para encontrar el factor de corrección de sensibilidad transversal "C" que para este caso es igual a 0.9.

Se multiplica la deformación lateral indicada por "C" para obtener la deformación lateral corregida. La deformación longitudinal no necesita ser corregida para sensibilidad transversal dado que la deformación transversal experimentada por el extensómetro longitudinal es pequeña y similar en magnitud a la deformación transversal en el medio ambiente de calibración usado para medir el factor del extensómetro (el extensómetro alineado con el eje de aplicación de esfuerzos está en un campo uniaxial con una relación de 0.285).

Como procedimiento alternativo, dos deformaciones de cualquier medida a ángulos rectos una con respecto a la otra pueden ser corregidas para la sensibilidad transversal de los extensómetros con las siguientes relaciones:

$$\epsilon_1 = [(1 - \nu K_T) / (1 - K_T^2)] (\epsilon_1 - K_T \epsilon_2)$$

$$\epsilon_2 = [(1 - \nu K_T) / (1 - K_T^2)] (\epsilon_2 - K_T \epsilon_1)$$

Donde:

ϵ_1, ϵ_2 = Dos deformaciones ortogonales observadas (no corregidas)

ϵ_1, ϵ_2 = Dos deformaciones corregidas

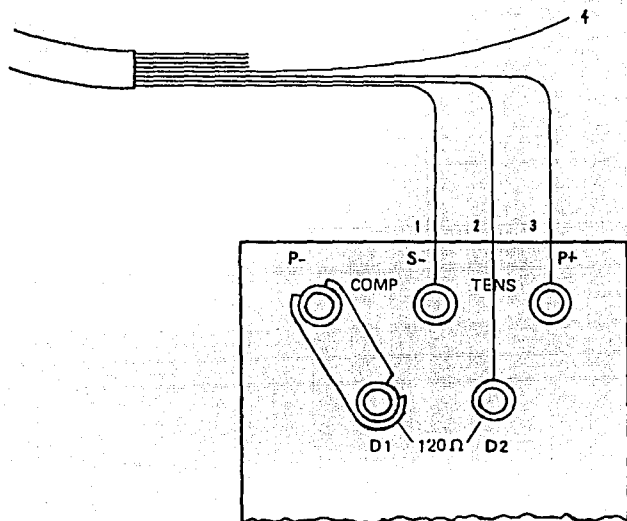
K_T = Factor de sensibilidad transversal del extensómetro eléctrico, o relación de Poisson bajo los cuales se calibraron los extensómetros para el factor del extensómetro eléctrico de resistencia variable.

ν = relación de Poisson.

Después de corregir las indicaciones de la deformación lateral para la sensibilidad transversal, se divide el resultado por la deformación longitudinal indicada para obtener la relación de Poisson de la viga

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

- DIAGRAMA DE CONEXIONES



Nota: Se muestra un circuito de tres cables, empezando en la terminal del extensómetro eléctrico de resistencia variable de la viga donde el negativo se divide para conectarse a los postes 1 y 2. Si el negativo no se divide en la terminal del extensómetro eléctrico de resistencia variable, se puede implementar un circuito de tres cables conectando el negativo al poste 1 y puentando éste con el poste 2 como se indica en las líneas punteadas.

HOJA DE TRABAJO

DETERMINACION DE LA RELACION DE POISSON

DATOS :

MEDICIONES	MICRODEFORMACIONES 10 ⁻⁶ EN CM.	
	LONGITUDINAL	LATERAL
Inicial (descargada)	5,000.00	5,269.00
Final (deformada)	7,459.00	6,019.00
Final menos inicial	2,459.00	750.00

CALCULOS :**- CORRECCION DE DEFORMACION LATERAL PARA SENSIBILIDAD TRANSVERSAL**

En el extensómetro lateral, se considera negativo el valor de la deformación transversal, por estar a compresión las fibras inferiores de la viga, y es igual, a la deformación axial (o longitudinal en este caso) del extensómetro longitudinal que se encuentra en las fibras superiores. En el extensómetro lateral, la deformación de éste, es igual a la deformación axial del extensómetro longitudinal, ya que el eje de sensibilidad transversal del extensómetro lateral está orientado en esa dirección, entonces :

$$\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} = \frac{\text{Deformación transversal cm.}}{\text{Deformación axial cm}} = \frac{-2,459.00}{750.00} = -3.28$$

Sensibilidad transversal del extensómetro eléctrico.

$$K_t = + 0.8 \% \text{ (dato del fabricante)}$$

HOJA DE TRABAJO

Factor de corrección del nomograma para sensibilidad transversal.

$$C = 1.025$$

Calculo de la relación de poisson para aluminio aleacion 6061-T6

$$\nu = \frac{750C}{X - 5000} = \frac{750.00 \times 1.025}{7459.00 - 5000.00} = \frac{768.75 \text{ cm}}{2459.00 \text{ cm}} = 0.3128$$

RESULTADOS :

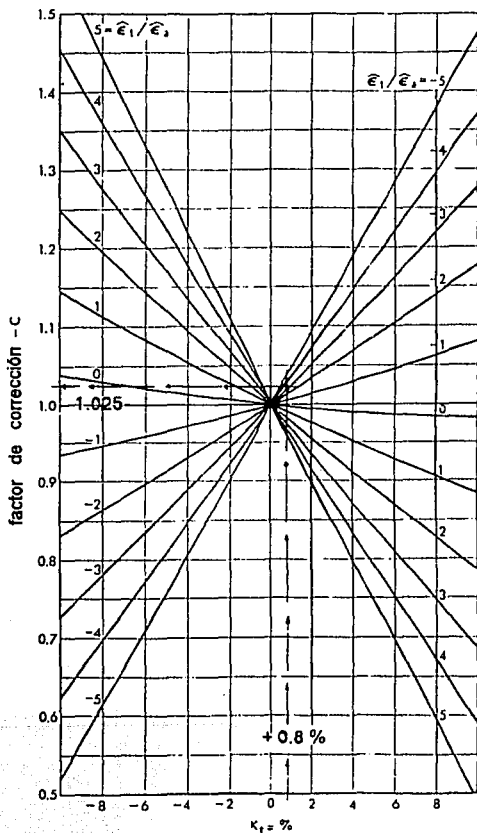
Relación de Poisson teórico = 0.310

Relación de Poisson experimental = 0.3128

% DE ERROR :

Se obtuvo un 0.839% de error lo cual se considera como aceptable en el análisis experimental de esfuerzos por medio de la extensometría eléctrica, ya que la diferencia en las medidas de deformación no exceden las 10 microdeformaciones que especifica el fabricante y no es mayor del 1% de error.

CORRECCION POR SENSIBILIDAD TRANSVERSAL (K_t)



NOMOGRAMA

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han planteado los aspectos más relevantes sobre la teoría que se utiliza en el análisis experimental de esfuerzos, así como los diferentes métodos que existen para su aplicación.

En particular se eligió el método de extensómetros eléctricos de resistencia variable, dado que es una tecnología sencilla, sin grandes complicaciones teóricas ni prácticas, relativamente económica, de gran confiabilidad y fácil dominio, no con ello se quiere decir que es el único y el mejor método, pero si podemos asegurar que es uno de los más versátiles, accesibles y confiables que existen.

Se pudo constatar por este método, que los valores teóricos del módulo de elasticidad y la relación de Poisson, que se consideran dentro del análisis experimental de esfuerzos como propiedades mecánicas básicas, son muy aproximados a los valores experimentales, con no más del uno por ciento de error comprobado.

Los datos anteriormente mencionados, así como los de esfuerzo que se obtienen en base a los valores de deformación, son datos importantes en el área experimental, ya que permiten comparar y en su caso comprobar si los valores de nuestro cálculo estructural corresponden a los obtenidos experimentalmente, determinando el grado de aproximación de nuestros cálculos, y a su vez, nos da la optimización de los elementos estructurales, evitando el subdimensionamiento o sobre dimensionamiento de éstos.

Indudablemente lo planteado en esta tesis, tiene como finalidad, dar al estudiante de Ingeniería Civil, soluciones experimentales para el análisis de esfuerzos y deformaciones de los materiales, a fin de que el estudiantado tenga otras herramientas para la verificación de elementos estructurales de diseño complicado o tradicional, lo cual permite monitorearlos permanentemente, y de esa manera corregir los errores estructurales antes de que la falla se presente.

Como ejemplos de las aplicaciones realizadas en México del método experimental de extensómetros eléctricos de resistencia variable para

análisis de esfuerzos y deformaciones, tenemos el Palacio de los Deportes, el cual fue instrumentado, tanto en un modelo a escala, como en la estructura final, a fin de tener la seguridad de que no fallarían ninguno de sus elementos estructurales. Otro ejemplo, es el de los puentes modernos de todo el país, los cuales, en su mayoría, son instrumentados en su estructura para monitorear el comportamiento que tienen, durante y después de ser contruidos; o el de la Catedral de la Ciudad de México, la cual está instrumentada en su subestructura y estructura para su monitoreo, al igual que la estructura de refuerzo que se le colocó.

Por ello, la Ingeniería Civil encuentra en éste método de análisis experimental, una gran herramienta para poder tomar decisiones en el diseño de estructuras de configuración tradicional y compleja.

BIBLIOGRAFIA

- Thornton, A Peter; Colangelo, J. Vito
CIENCIA DE LOS MATERIALES PARA INGENIERIA.
Ed. Prentice-Hall hispanoamericana S.A.
México, 1987
- Ortiz, Berrocal Luis
RESISTENCIA DE LOS MATERIALES
Ed Mc Graw Hill
España, 1991
- Tuppeny, W. H; Kobayash, A. S.
ANALISIS EXPERIMENTAL DE TENSIONES
Ed. Urmo
España, 1970
- Dally, W. James; Riley, F. William
EXPERIMENTAL STRESS ANALISIS
2a Edición
Ed. McGraw-Hill
U.S.A., 1978
- Merritt, S. Federick
MANUAL DE INGENIERIA CIVIL
Vol. I
Ed Mc Graw Hill
México, 1988

- Byars, F Edward; Snyder, D. Robert

MECANICA DE CUERPOS DEFORMABLES

Ed. representaciones y servicios de ingeniería, S.A.

México, 1978

- Ferrer A. Luis, Olivares P. Alfredo

METODOS EXPERIMENTALES DE ANALISIS DE ESFUERZOS

UNAM, Facultad de Ingeniería, División de educación continua

México, 1994

- Calder, Clarence; Ferrer A. Luis, Olivares P. Alfredo

ANALISIS EXPERIMENTAL DE ESFUERZOS APLICADO

UNAM, Facultad de Ingeniería, División de estudios de posgrado

México, 1994

- Olivares P. Alfredo

Consultor Asesor (entrevistas personales)

Metronic, S.A.

México, 1994

- Measurements Group Inc.

STUDENT MANUAL FOR STRAIN GAGE TECHNOLOGY

Boletín 309c

Education Division, Raleigh, N. C.

U.S.A., 1991