

7291



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**"INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE
MATERIALES"**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A :

JORGE MARMOLEJO FUENTES

ASESOR DE TESIS: ING. HECTOR J. GUZMAN OLGUIN.



MEXICO, D. F.

1997.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
-60-1-108/96

Señor
JORGE MARMOLEJO FUENTES
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor ING. HECTOR J. GUZMAN OLGUIN, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE MATERIALES"

- I. INTRODUCCION
- II. INSTRUMENTACION (DEFINICIONES)
- III. TECNICAS DE INSTRUMENTACION
- III. JUICIOS PARA LA REALIZACION DE INSTRUMENTACIONES
- IV. TECNICAS DE INTERPRETACION DE RESULTADOS
- V. CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFIA

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitario, a 03 de septiembre de 1996.
EL DIRECTOR


ING. JOSÉ MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/GMP*jbr

A mis padres:

José Dolores y María

A mis hermanos:

Ignacio

Máximo

José Dolores

Esperanza

Teresa

José

Salvador

Javier

Guadalupe

Joel

Que me brindaron su atención y apoyo incondicional todo este tiempo.

A mis sobrinos:

Juan Carlos

Alejandro

Xochitl

Sandino

Itzcoatl

Ignacio

Naiohullin

Citlalli

Angélica

Inti

etc.

Que los estimo.

A mi esposa Olivia

Que significa todo para mí.

A mi asesor de tesis el Ing. Hector J. Guzman Olguin por toda la paciencia que tuvo a lo largo de este trabajo, además de la amistad que me ha brindado.

A EFE ASESORES

En especial al Ing. Francisco Echavarría A. que me apoyo en todo lo necesario para poder terminar este trabajo.

Al Ing. Tomas Cristian Peña por su colaboración en este trabajo.

A mis amigos:

**Salomón Valdéz
Gabriel Rojas
Raúl Salazar
Javier Echavarría
Jorge Reyes
Marcelo Morales
David Muñoz
Oscar Espejel.
Etc.**

A todos mis profesores.

TEMA: INGENIERIA Y TECNOLOGIA DE MATERIALES.

INDICE

INTRODUCCION.

1

Capítulo I INSTRUMENTACION (DEFINICIONES)

1.1 Instrumentación.	3
1.2 Exactitud y Precisión.	3
1.3 Ensaye de Materiales.	4
1.3.1 Significación de Ensayes.	5
1.3.2 Diseño de Ensayes.	5
1.3.3 Especificación de Materiales.	6
1.4 Conceptos generales de las propiedades mecánicas.	7
1.4.1 Propiedades mecánicas.	7
1.4.2 Tipos de ensayes mecánicos.	7
1.4.3 Condiciones de ensaye.	8
1.4.4 Esfuerzo y Deformación.	9
1.4.4.1 Relaciones de esfuerzo-deformación.	10
1.4.5 Elasticidad.	11
1.4.6 Medidas de resistencia elástica.	11
1.4.7 Punto de Cedencia en materiales dúctiles.	12
1.4.8 Medidas de resistencia última.	12
1.4.9 Plasticidad.	13
1.4.10 Relaciones de esfuerzo verdadero y deformación natural.	13
1.4.10.1 Diagrama de esfuerzo-deformación Ramberg-Osgood.	14
1.4.11 Rigidez.	16
1.4.12 Capacidad Energética.	17
1.4.13 Selección de probetas.	18
1.4.14 Preparación de probetas.	18
1.4.15 Selección de aparatos de ensaye.	18
1.4.16 Falla.	19

Capítulo II TÉCNICAS DE INSTRUMENTACION.

2.1 Mediciones.	21
2.2 Pivotes.	21
2.3 Determinación de carga.	22
2.4 Máquinas de ensaye.	24
2.4.1 Máquinas de engrane y tornillo.	25
2.4.2 Máquinas hidráulicas.	26
2.4.3 Ajuste de velocidad.	27
2.4.4 Calibración de máquinas de ensaye.	27
2.5 Medición de longitud.	28
2.5.1 Micrómetros.	28
2.5.2 Deformímetros mecánicos.	30
2.5.3 Registradoras de esfuerzo deformación.	32
2.5.4 Montaje de calibradores.	32
2.5.4.1 Impermeabilización.	32
2.5.5 Medidores fotoelásticos de deformación.	32
2.5.6 Uso de calibradores.	33
2.5.6.1 Calibradores simples.	33

2.5.6.2	calibradores de contorno	34
2.5.6.3	Calibradores indicadores y comparadores.	34
Capítulo III JUICIOS PARA LA REALIZACIÓN DE INSTRUMENTACIONES.		
3.1	El ensayo de tensión.	35
3.1.1	Requerimientos para probetas de tensión.	35
3.1.2	Dispositivos de montaje.	36
3.1.3	Realización de ensayos.	37
3.1.4	Observaciones de ensayo.	39
3.1.5	Efectos de las variables importantes.	39
3.2	Ensayo de compresión.	39
3.2.1	Observaciones generales.	39
3.2.2	Requerimientos para probetas de compresión.	40
3.2.3	Probetas estándar.	40
3.2.4	Camas y bloques de apoyo.	41
3.2.5	Realización de los ensayos.	42
3.2.6	Observaciones de ensayo.	42
3.3	Ensayo de corte.	45
3.3.1	Comportamiento de los materiales bajo el esfuerzo cortante.	45
3.3.2	La falla bajo el esfuerzo de corte.	48
3.3.3	Objeto y aplicabilidad de los ensayos de corte.	49
3.3.4	El ensayo de corte directo.	50
3.4	Ensayo de torsión.	50
3.4.1	Observaciones de ensayo.	51
3.4.2	Determinaciones especiales e indirectas de las propiedades del corte.	52
3.5	Ensayo de flexión.	53
3.5.1	Comportamiento de los materiales sometidos a flexión.	53
3.5.2	Fallas por flexión.	55
3.5.3	Objeto y aplicabilidad de los ensayos de flexión.	56
3.5.4	Probetas para los ensayos de flexión.	57
3.5.5	Aparatos para ensayos de flexión.	38
3.5.6	Observaciones de ensayo.	59
3.5.7	Efecto de las variables importantes en los ensayos de flexión.	60
Capítulo IV. TÉCNICAS DE INTERPRETACION DE RESULTADOS.		
4.1	Análisis y presentación de datos.	61
4.1.1	Variancias de datos.	61
4.1.2	Agrupamiento de datos.	62
4.2	Tendencia central.	63
4.3	Dispersión.	63
4.4	Asimetría.	64
4.5	Resúmenes estadísticos.	64
4.6	Gráficos de control.	64
4.7	Correlación.	65
4.8	Errores.	66
4.9	Informes.	67
4.10	Tablas.	67
4.11	Figuras.	67
Capítulo V CONCLUSIONES.		
BIBLIOGRAFIA.		
		69

INTRODUCCION

En la Ingeniería todos los análisis, cálculos y diseños se realizan en base a coeficientes los cuales de alguna manera se aceptan; pero que existe detrás de esta aceptación, se encuentran una serie de estudios y ensayos que les dan soporte y validación, el presente trabajo expone juicios y analiza los tipos de instrumentos que se utilizan para las diferentes pruebas o ensayos de laboratorio, relacionados con Ingeniería, en este trabajo se analizan para los elementos para los elementos que se utilizan en la Ingeniería Estructural, así como los diferentes estados de esfuerzo que actúan sobre estos elementos, de igual manera las variables que intervienen en los ensayos y los parámetros o lineamientos que se deben tener en cuenta para obtener resultados confiables.

Los materiales usados en la construcción, como son los metales, madera, concreto, productos de barro, materiales de mampostería, etc. La función principal de los materiales en la construcción es proporcionar resistencia, rigidez y durabilidad con las que fueron diseñados, lo que requiere de ensayos para validar estas características. En general todos los materiales en Ingeniería, se deben conocer sus propiedades lo que se le conoce como ensaye de materiales.

Para determinar un material, es de gran importancia el ensaye de éste, sin embargo, en los materiales de construcción, el diseñador dispone de dos fuentes de las cuales puede tener información, el conocimiento del desempeño del material en servicio real y los resultados de los ensayos para tener datos del comportamiento de los materiales de acuerdo a la especificación.

Para el diseño de las construcciones se tiene que tener en cuenta los materiales posibles que se puede utilizar para el proyecto, los ensayos permiten normatizar los materiales de acuerdo con lo diseñado y de esta manera identificarlo.

En la selección de materiales hay que tomar en cuenta lo siguiente: clases de materiales disponibles, propiedades de varios materiales, requerimientos de servicio de los materiales, la economía que puede determinar a uno u otro material, métodos de fabricación de varios tipos de materiales, métodos de especificación y métodos de ensaye o inspección.

Los materiales que participan en las estructuras es de importancia la carga que tienen que soportar, por lo que el material debe tener una resistencia adecuada. El término *resistencia* se refiere a la resistencia de falla de una pieza completa de material, una parte o la superficie, el criterio de falla puede ser la ruptura o una deformación excesiva.

Para el análisis de los materiales, se debe tener conocimiento completo de todas las propiedades bajo varias condiciones, por lo que se trata de conocer las características que puedan influir en el valor económico y utilidad del material, para un propósito dado. La eficiencia del material está de acuerdo al uso específico y las propiedades pertinentes para un uso determinado.

La inspección cubre la observación de los procesos y productos de fabricación o construcción con el propósito de garantizar la presencia de las cualidades deseadas. En muchos casos la inspección puede ser enteramente cualitativa e involucra solamente la observación visual de la corrección de las operaciones o dimensiones, la detección de defectos superficiales, o posiblemente la indicación de la presencia o ausencia de condiciones indeseables, tales como la humedad o la temperatura excesivas. Por otra parte, la inspección puede implicar la realización de ensayos complicados para averiguar si los requerimientos de las especificaciones han sido satisfechos. La inspección propugna el control de la calidad por medio de la aplicación de criterios establecidos e implica la idea de rechazar material subnormal. Al ensayar, la meta es determinar la calidad, es decir, averiguar los hechos respectivamente de las implicaciones de los resultados.

La experimentación y el ensayo científicos, así como las matemáticas, han llegado a ser una importante herramienta para el ingeniero. El ensayo no debe usarse como sustituto del

pensamiento, aunque podría descubrirse que un experimento apropiado pudiera coadyuvar el análisis.

Previo al ensaye este debe entenderse bien, y el carácter general de los resultados debe ser previsto. La magia de los ensayos reside no en iniciarlos y esperar lo mejor, sino en los resultados de la planeación cuidadosa e inteligente y el lento y penoso proceso de resolver dificultades.

El ingeniero debe tener la visión de lo que acontece tras las operaciones físicas de los ensayos las líneas de esfuerzo y deformación, las reacciones, los movimientos de las partes componentes, etc. Debe percatarse de las oportunidades de error y advertir rápidamente dónde podrían ocurrir los errores. Debe permanecer alerta para advertir lo inusitado, pues ahí yace el embrión del descubrimiento. Debe ser el primero en comprobar sus resultados recurriendo al criterio de lo que aparezca como razonable y estar listo para verificarlos si no lo parecen.

Un experimento o un ensayo permanece inconcluso hasta que se lo resume, comprueba e interpreta. Es la obligación, del ingeniero de presentar los resultados de sus descubrimientos de manera clara, enfática, inteligible y agradable.

Las personas no técnicas y los usuarios de materiales no informados poseen una tendencia a pensar en los ensayos, especialmente las de aceptación, como instrumentos precisos, infalibles y de aplicación general. Los ensayos siempre están sometidos a condiciones limitativas, y los resultados no se pueden informar apropiadamente hasta que se les ha asignado una interpretación práctica.

CAPITULO I INSTRUMENTACION (DEFINICIONES)

1.1 Instrumentación.

El proceso de medición requiere el uso de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas y en muchos casos nos permiten determinar el valor de una cantidad desconocida la cual no podría medirse utilizando solamente las facultades sensoriales. Por lo que un instrumento se puede definir de la siguiente manera: dispositivo para determinar el valor de la magnitud de una cantidad o variable.

En la Ingeniería la necesidad de diseño de nuevos elementos mecánicos o estructurales trae consigo el uso de procedimientos de ensaye para el control de los elementos, en la Ingeniería hay relación muy estrecha entre los materiales y las máquinas que lo producen, por lo que se debe de conocer las propiedades de los materiales producidos, lo que hace necesario la inspección y el control de calidad de los materiales, lo que implica un sistema de muestreo y ensaye.

La investigación de Ingeniería y la función del desarrollo de gran escala con base experimental, demandan ensayes bien estudiados y cuidadosamente planeados, involucrando con esto los sistemas de instrumentación utilizados.

Es importante que el Ingeniero posea una comprensión de los métodos comunes de ensaye, de sus especificaciones, limitaciones y características de los materiales utilizados.

Sin embargo, la utilización de un instrumento de medición requiere el conocimiento de algunos conceptos para poder determinar el tipo de instrumento que se debe de utilizar de acuerdo con el tipo de medición que se quiere realizar, esto es de suma importancia ya que la información que nos proporcione nos dará la pauta para poder tomar una decisión acertada, y a continuación se analizaran estos conceptos:

1.2 Exactitud y Precisión

Exactitud se refiere al grado de aproximación o conformidad al valor real de la cantidad medida, y la Precisión es el grado de la concordancia dentro de un grupo de mediciones o instrumentos, es decir, la Precisión es una medida del grado con la cual las mediciones sucesivas difieren una de la otra.

La Precisión se compone de dos características, conformidad y número de cifras significativas con las cuales se puede realizar la medición. Por ejemplo, ¿Puede el observador leer el valor real de la escala? Su estimación de la lectura en la escala marca un valor. Esto es tan cercano al valor real como él pueda estimar la lectura de la escala. Aunque no haya desviaciones del valor observado, el error creado por las limitaciones de la escala es un error de precisión. El ejemplo ilustra que la conformidad es necesaria pero no es suficiente en cuanto a la precisión por la falta de cifras significativas. De modo semejante, la precisión es una condición necesaria pero no suficiente para la exactitud.

Con frecuencia el principiante se inclina por aceptar el valor de las lecturas en la carátula del instrumento, y desconoce que la exactitud de las técnicas de medición, no sujetas a los mismos errores sistemáticos. También debe de asegurarse que los instrumentos funcionan apropiadamente, que estén conforme un patrón conocido y que las influencias externas no afecten la exactitud de las mediciones.

En todas las áreas de la Ingeniería, más aún las relacionadas con estructuras o maquinaria tienen una relación con las propiedades de los materiales, éstas propiedades se determinan por medio de pruebas o ensayos de laboratorio. Para la fabricación masiva, la garantía de calidad requiere de un proceso de inspección que garantice esta producción, mediante un sistema de especificaciones adecuadas y la aceptación del material comparado de acuerdo a las especificaciones, esto involucra un sistema de inspección o de ensayo adecuado, la Ingeniería demanda ensayos estudiados y planeados

Los Ingenieros deben poseer una comprensión general de los métodos más comunes de ensayo de las propiedades de materiales, ya que maneja especificaciones y aceptación de materiales.

En el estudio de ensayo se debe tomar en cuenta la técnica de ensayo, esto implica como funcionan los instrumentos comúnmente usados, las variantes de los instrumentos más usados, sus limitaciones y como obtener mejores resultados, además los principios físicos y mecánicos involucrados en el instrumento y procedimiento de ensayo, es decir dentro de los instrumentos deben de cumplir las condiciones para garantizar la precisión, que el instrumento susceptible de fallar o arrojar resultados incorrectos, que dichas condiciones pueden desestimarse de acuerdo al tipo de prueba o ensayo, que apreciaciones o modificaciones podrían realizarse para tener una mayor exactitud; la teoría de mediciones implica cual es la precisión de los resultados, qué medición involucra a los resultados finales, cómo influye el tiempo y el esfuerzo para lograr una innecesaria precisión; la variabilidad de los materiales nos dice qué cantidad de mediciones garantizan un promedio significativo, que variación de la media justifica el rechazo de valores individuales, que grado de resistencia puede esperarse en un material dado, y en qué condiciones de trabajo, y es de gran importancia la interpretación de resultados, hay que tener cuidado con cuál es el significado de los resultados, se aplican los resultados directamente al diseño o se ven afectados por otros parámetros, considerando los métodos de ensayo y la clase de material, cuáles son las limitaciones de los resultados de los ensayos o son confiables los datos de ensayo, reflejan las especificaciones las limitaciones del método.

1.3 Ensayo de materiales.

Existe cierta relación entre ensayo y experimento, pero no significan lo mismo ya que la experimentación involucra la idea de que el desarrollo puede ser incorrecto, que resultados hasta entonces pueden surgir. El ensayo involucra la idea de un procedimiento más o menos establecido y de que los límites de los resultados generalmente se definen. La experimentación, ordinariamente implica muchos ensayos rutinarios. Muchos de los grandes laboratorios de ensayo de materiales sirven el doble propósito de fungir como cuerpos de investigación experimental y agencias de ensayo de control rutinario. Aunque el propósito, el punto de vista, y el método de ataque puede diferir grandemente entre la investigación y el ensayo rutinario, muchos de los procedimientos detallados pueden ser exactamente iguales en las clases de ensayo.

Los ensayos se dividen en campo y laboratorio. Los de campo, debido a las condiciones de trabajo difíciles o azarosas, la interferencia, las limitaciones de tiempo, y las condiciones climáticas variables, los ensayos realizados en el campo usualmente carecen de la precisión de ensayos similares efectuados en el laboratorio; sin embargo, el desempeño del trabajo laboratorial no garantiza necesariamente la precisión. Ciertos tipos de ensayos, como, por ejemplo, el análisis de cmba de la grava, pueden ser realizados con la misma exactitud por un inspector en la obra que por un técnico en el laboratorio. Por su parte, algunos ensayos no pueden realizarse en el laboratorio, de modo que la cuestión del campo contra el laboratorio es pertinente.

Los ensayos de materiales se clasifican en destructivos y no destructivos. los ensayos para determinar la resistencia última implican la destrucción de la muestra. Como no pueden ensayarse así un lote completo, surgen los problemas para obtener una indicación confiable de la resistencia del lote mediante el uso de un número de muestras suficiente, así como de mantener dentro de límites razonables el costo del material para muestras. Para productos terminados resulta deseable utilizar ensayos no destructivos si es posible. Algunos ensayos de dureza son de este tipo. Los ensayos de comprobación aplicados a partes fabricadas o elementos estructurales, con el tipo no destructivo por ejemplo, un ensayo de comprobación del gancho de un pluma involucra la aplicación de una carga un poco mayor que la carga de trabajo pero menor que una carga perjudicial, para garantizar que ningún defecto nocivo, el cual pudiera causar el colapso durante el servicio, estén presentes. Los ensayos no destructivos son de particular interés para el inspector de obra.

1.3.1 Significación de los ensayos.

Las medidas que se obtienen dependen de las condiciones de ensayo, las cuales incluyen la manera en que la muestra se prepara, así como de los procedimientos involucrados al realizar el ensayo. Por lo tanto, una implicación del "significado de los ensayos" tiene que ver con la confiabilidad de los ensayos para obtener medidas de las propiedades que deban determinar.

El significado real de cualquier ensayo reside en el grado al cual nos capacita para predecir el desempeño de un material en servicio. Un ensayo puede tener significado en una de dos maneras: puede medir adecuadamente una propiedad que sea suficientemente básica y representativa para que los resultados de los ensayos puedan utilizarse directamente en el diseño, o el ensayo, aun cuando sea muy arbitrario, sirve para identificar los materiales que la experiencia ha comprobado que arrojan un desempeño satisfactorio.

En los ensayos se debe de ver la variación de las medidas cuantitativas de las propiedades dadas. Esto puede deberse parcialmente a la carencia de precisión absoluta de las operaciones de ensayo, pero también a la variación real de una propiedad dada entre las muestras. Nuestros materiales no son homogéneos; dentro de ciertos límites, su composición puede estar gobernada enteramente por el azar, de modo que una descripción de su comportamiento puede descansar en gran medida sobre una base estadística.

1.3.2 Diseño de ensayos.

Para el diseño de ensayos se debe tener en cuenta cual es la naturaleza del resultado esperado, que ensayo de debe efectuar, que relación existe entre el ensayo y los resultados, que limitaciones tiene el ensayo, como debe ajustarse la precisión del instrumento utilizado para

tener resultados confiables, qué probeta o muestra se debe utilizar y cuántas muestras son significativas para validar dicho ensaye.

El ensaye ideal debe ser significativo, confiable, reproducible, de precisión conocida y económico. La elección de un procedimiento debe estar controlada por el significado del ensaye, guiada por la economía de esfuerzo, por un sentido de la proporción

Una medida adecuada resulta posible cuando la propiedad puede ser definida con suficiente exactitud, el material es de composición o pureza conocidas, las condiciones existentes son normales o conocidas, los métodos experimentales son teóricamente correctos, las observaciones y sus reducciones se hacen con el cuidado debido, y el orden de exactitud de los resultados se conoce. Este ideal raramente se alcanza, pero cuando se propugna los resultados pasan de la etapa cualitativa a la cuantitativa y se les denomina constantes porque las redeterminaciones no darán resultados sensiblemente diferentes. Los resultados aproximados se mejoran sostenidamente a medida que se inventan instrumentos y métodos más precisos.

1.3.3 Especificación de materiales.

La habilidad y exactitud con que algo puede especificarse depende del grado de conocimiento relacionado con ello y la precisión con sus cualidades pueden determinarse. A medida que el arte y la ciencia del ensaye avanzan, del mismo modo la base para la preparación de especificaciones adecuadas se mejora.

Con el avance tecnológico las especificaciones más adecuadas son necesarias y, con el avance de nuestro conocimiento científico de los materiales, ellas se han tomado posibles.

La especificación ideal definiría de manera única las cualidades de un material necesario para servir con la mayor eficiencia para un uso dado, y es posible acercarse a ella si pueden realizarse ensayos realmente significativos para determinar la presencia de las cualidades requeridas.

Es también importante advertir que una especificación puede resultar admisible y necesariamente imperfecta porque sería impráctico producir el material ideal.

Prácticamente, las especificaciones no se elaboran solamente para un material ideal, sino para uno que resulte posible obtener a un costo razonable según las condiciones de fabricación existentes.

El máximo y el mínimo a establecer se basan en el experimento, pero deben reconocer las limitaciones del proceso de fabricación, se permite una variación tal, del tamaño que cada parte que se traduzca en la economía de la fabricación de las partes. Al fijar esos límites de tolerancia, debe tenerse mucho cuidado de evitar rangos demasiado estrechos por una parte y variaciones demasiado amplias o baja calidad por otra. Con frecuencia estos límites involucran la seguridad y, por lo general, la durabilidad y eficiencia.

1.4 Conceptos generales de las propiedades mecánicas.

1.4.1 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas se definen como aquellas que tienen que ver con el comportamiento (ya sea elástico o inelástico) de un material bajo fuerzas aplicadas. Las propiedades mecánicas se expresan en términos de cantidades, que son funciones del esfuerzo o de la deformación o ambas.

El ensaye mecánico se ocupa de la determinación de las medidas de las propiedades mecánicas. Las mediciones primarias involucradas son la determinación de la carga y el cambio de longitud.

Las propiedades mecánicas fundamentales son la resistencia, la rigidez, la elasticidad, la plasticidad y la capacidad energética. La resistencia de un material se mide por el esfuerzo según el cual se desarrolla alguna condición limitativa específica. Las principales condiciones limitativas o criterios de la falla son la terminación de la acción elástica y la ruptura. La dureza, usualmente indicada por la resistencia a la penetración o la abrasión en la superficie de un material, puede considerarse como un tipo o una medida particular de resistencia. La rigidez tiene que ver con la magnitud de la deformación que ocurre bajo la carga; dentro del rango del comportamiento elástico, la rigidez se mide por el "módulo de elasticidad". La elasticidad se refiere a la capacidad de un material para deformarse no permanentemente al retirar el esfuerzo.

El término plasticidad se usa para indicar la capacidad para deformarse en el rango elástico o plástico sin que ocurra ruptura; la plasticidad puede expresarse de varias maneras; por ejemplo, en conexión con los ensayos de tensión de los metales dúctiles, nos referimos a ella como "ductilidad".

La capacidad de un material para absorber energía elástica depende de la resistencia y la rigidez; la capacidad energética en el rango de acción elástica se denomina resiliencia; la energía requerida para romper un material se toma como la medida de su tenacidad.

1.4.2 Tipos de ensayos mecánicos.

El método de aplicación de la carga es la base más común para designar o clasificar los ensayos mecánicos. Hay tres factores involucrados en la definición de la manera en que la carga es aplicada: la clase de esfuerzo inducido, la velocidad a la cual se aplica la carga y el número de veces que la carga es aplicada.

En el ensaye mecánico de probetas preparadas hay cinco tipos primarios de cargas: tensión, compresión, corte directo, torsión y flexión. En los ensayos de tensión y compresión, se intenta aplicar una carga axial a una probeta a modo de obtener una distribución uniforme del esfuerzo sobre la sección transversal crítica. En los ensayos de corte directo, se intenta obtener una distribución uniforme del esfuerzo, pero esta condición ideal nunca es satisfecha en la práctica debido a la manera en que los esfuerzos cortantes se desarrollan dentro del cuerpo bajo cargas de corte directo, y debido a los esfuerzos incidentales establecidos por los dispositivos de sujeción. El corte puro puede desarrollarse en barras cilíndricas sometidas a torsión aunque la intensidad del esfuerzo cortante varía desde cero en el centro, hasta un máximo en la periferia de la sección transversal. Los ensayos de torsión poseen una ventaja sobre las de corte directo

en cuanto a que las deformaciones pueden determinarse por la medición del ángulo de torsión. En los ensayos de flexión, tanto la tensión como la compresión quedan involucradas y los efectos compuestos se estudian; por ejemplo, las deflexiones se miden directamente, y el módulo de ruptura se determina.

Con respecto al ritmo según el cual, la carga se aplica, los ensayos pueden clasificarse en tres grupos. Si la carga es aplicada durante un periodo de tiempo relativamente corto, pero con lentitud suficiente para que pueda considerarse que la rapidez del ensaye tenga un efecto prácticamente despreciable sobre los resultados, el ensaye es llamado *estático*. Esos ensayos pueden realizarse durante períodos que varían desde varios minutos hasta algunas horas. Con mucho la mayoría de los ensayos encajan en esta categoría. Si la carga es aplicada muy rápidamente de modo que el efecto de la inercia y el elemento tiempo queden involucrados, los ensayos son denominados *dinámicos*; en el caso especial en que la carga se aplica súbitamente como al interior un golpe, el ensaye es llamado de *impacto*. Si la carga es sostenida durante un largo período, digamos meses y aún años, el ensaye es llamado de *larga duración* y los ensayos de *creep* constituyen una caso especial.

Con respecto al número de veces que la carga es aplicada, los ensayos pueden clasificarse en dos grupos. En el primer grupo, el cual incluye el mayor número de ensayos realizado, una sola aplicación de la carga constituye el ensaye. En el segundo grupo, la carga de ensaye se repite muchas veces; la categoría de ensayos más importante de este grupo es la de *resistencia o deformación*, cuyo propósito es determinar el límite de resistencia o deformación de un material.

1.4.3 Condiciones de ensaye.

Además de las condiciones de cargas, es necesario tomar en cuenta la condición del material en el momento del ensaye y las condiciones ambientes si ellas afectan los resultados del ensaye.

Dependiendo de la temperatura a la cual los ensayos se realizan, se pueden reconocer tres clases generales de ensayos. En la primera clase, aquellos realizados a temperaturas atmosféricas o locales normales. La segunda clase, son los ensayos efectuados para determinar las propiedades de los materiales, tal como la fracturabilidad del acero a temperaturas muy bajas. En la tercera clase están los ensayos realizados a temperaturas elevadas, como en el desarrollo de los cohetes, los motores de retroimpulso, las turbinas a gas, etc.

Las propiedades mecánicas de algunos materiales resultan afectadas por las condiciones de humedad. Por ejemplo, la resistencia de materiales como el concreto, el ladrillo, la piedra y la madera resulta marcadamente influida por la humedad del material. Los ensayos normales sobre concreto se realizan en el material mientras que las de ladrillo se efectúan en probetas homeadas. Los ensayos de madera pueden hacerse en probetas en condición verde o atmosféricamente seca, pero el contenido de humedad en el momento del ensaye siempre se determina. Los ensayos de larga duración de estos materiales pueden requerir el uso de condiciones de humedad controlada. Estas arbitrarias condiciones de humedad se requieren para un ensaye normal para que los resultados de los ensayos obtenidos por operadores diferentes sean comparables.

Para propósitos especiales pueden realizarse ensayos que involucren el uso de atmósfera corrosivas, rocíos de sal o baños que contengan sustancias designadas para garantizar reacciones neutrales o corrosivas.

1.4.4 Esfuerzo y deformación.

El *esfuerzo* se define aquí como la intensidad de las fuerzas o componentes internas distribuidas que resisten un cambio en la forma de un cuerpo. El esfuerzo se mide en términos de fuerza por área unitaria. Existen tres clases básicas de esfuerzos: tensivo, compresivo y corte.

En los ensayos de tensión y compresión simples, en las cuales la probeta es sometida a un esfuerzo uniformemente distribuido, el esfuerzo se calcula dividiendo la carga por la mínima área seccional original. En los ensayos de flexión y torsión, dentro de los límites de la acción elástica, los esfuerzos pueden calcularse por medio de relaciones teóricas. Dentro del rango elástico, los esfuerzos pueden evaluarse de las deformaciones medidas, mediante el uso del módulo de elasticidad.

El término deformación se usa aquí en su acepción general para indicar el cambio en la forma de un cuerpo; puede deberse al esfuerzo, al cambio térmico, al cambio de humedad o a otras causas. En conjunción con el esfuerzo directo, la deformación usualmente se supone como un cambio lineal y se mide en unidades de longitud. En los ensayos de torsión se acostumbra medir la deformación como un ángulo de torsión.

En los ensayos de flexión, la deformación puede expresarse en términos de la deflexión de algún punto especificado de una viga de su posición original.

La *deformación* se define como el cambio por unidad de longitud en una dimensión lineal de un cuerpo, el cual va acompañado por un cambio de esfuerzo. (Ver fig. 1)

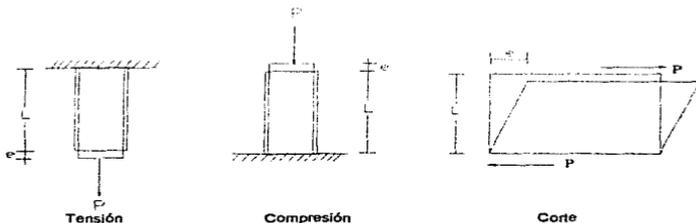


Figura No. 1

La deformación por corte se mide paralelamente a la dirección de la fuerza cortante, pero la deformación por corte se calcula con respecto a la dimensión perpendicular a la dirección de la fuerza; la deformación por corte es, por lo tanto, un ángulo expresado en radianes.

Deformación permanente es la deformación o deformación unitaria restante en un cuerpo previamente esforzado después del retiro de la carga.

Las deformidades se miden por medio de un deformímetro, un término utilizado para denotar cualquier instrumento medidor de deformación tales como un extensómetro; un compresómetro, un deflexómetro, o un indicador de detrusión.

Dentro del rango de acción elástica la comprensión entre las deformidades lateral y axial en condiciones de carga monoaxial es denominada *relación de Poisson*. La extensión axial causa contracción lateral, y viceversa.

La relación de Poisson difícilmente se determina en el ensaye comercial rutinario.

Las deformaciones volumétricas se determinan ocasionalmente. Para los cuerpos sólidos, la deformación volumétrica usualmente se calcula de medidas de deformaciones lineales. En el caso de los cuerpos porosos o sumamente deformables, por ejemplo, los suelos, el cambio volumétrico en forma ocasional se determina mediante el desplazamiento de un fluido.

1.4.4.1 Relaciones de Esfuerzo-Deformación.

La relación entre el esfuerzo y la deformación comúnmente se muestra por medio de un *diagrama de esfuerzo y deformación*, el cual es un diagrama trazado con valores de esfuerzo como ordenadas y valores de deformación como abscisas.

El procedimiento usual para obtener un diagrama de esfuerzo y deformación consiste en tomar los datos de una serie de lecturas de un deformímetro. En algunos casos, los diagramas de esfuerzo y deformación se obtienen directamente por medio de un aditamento autográfico de la máquina de ensaye.

Al planear un ensaye que requiera datos de esfuerzo y deformación, es necesario elegir el incremento de carga o el de la lectura del deformímetro a usar entre lecturas sucesivas. El uso de incrementos de carga en lugar de incrementos de deformación ha sido práctica común porque, en términos generales, es más simple tabular los incrementos de carga que los de las lecturas del deformímetro. La determinación de un incremento adecuado de la lectura del deformímetro es un tanto más complicada pero no difícil. Se sigue el siguiente procedimiento. Se estima la carga correspondiente a la rodilla del diagrama de esfuerzo y deformación, y un décimo de esta carga se aplica a la probeta.

1.4.5 Elasticidad.

La *elasticidad* es aquella propiedad de un material por virtud de la cual las deformaciones causadas por el esfuerzo desaparecen al removersele.

Un cuerpo perfectamente elástico se concibe como uno que recobra completamente su forma y sus dimensiones originales al retirarse el esfuerzo. No se conocen materiales que sean perfectamente elásticos; aunque algunos materiales, como el acero, parecen ser elásticos en un considerable rango de esfuerzos. Algunos materiales, como el hierro fundido, el concreto, y ciertos metales no ferrosos, son imperfectamente elásticos aún bajo esfuerzos relativamente reducidos, pero la magnitud de la deformación permanente bajo carga de corta duración es pequeña, de modo que para propósitos prácticos el material puede ser considerado elástico hasta magnitudes de esfuerzo razonables.

1.4.6 Medidas de resistencia elástica.

Los criterios de la resistencia o la falla elástica que son utilizados son: el *límite elástico*, el *límite proporcional* y la *resistencia a la cedencia*.

El *límite elástico* se define como el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin que ocurra la deformación permanente al retirar el esfuerzo. Para determinar el límite requiere el retiro sucesivos de cargas más y más grandes hasta encontrar una carga a la cual se produzca la deformación permanente.

El *límite proporcional* se define como el mayor esfuerzo que un material es capaz de desarrollar sin desviarse de la proporcionalidad rectilínea entre el esfuerzo y la deformación. Mediante los métodos ordinarios de ensaye, los valores del límite elástico para los metales encontrados por medio de las observaciones de la deformación permanente no difieren notablemente de los valores del límite proporcional. El límite proporcional es, ocasionalmente, llamado el "límite proporcional elástico".

El límite proporcional se determina mediante el uso de un diagrama de esfuerzo y deformación. Los valores del límite proporcional así obtenidos están sometidos a alguna variación, dependiendo parcialmente de la sensibilidad del deformómetro y parcialmente del método de registro; la determinación del límite proporcional es de valor sobre todo en la investigación.

La acción plástica (la deformación) en casi todos los miembros, aún en probetas de ensayos de laboratorio cuidadosamente controladas, empieza en forma de acciones localizadas y se toma mesurable solamente después de que han ocurrido muchos ajustes internos locales y una porción considerable de la pieza es afectada por la deformación; este límite puede, en términos generales, denominarse *resistencia a la deformación*, la cual es la medida de resistencia elástica.

Los diversos criterios para la determinación de la resistencia a la deformación pueden clasificarse como sigue: método que involucra la medición de la deformación permanente, el "método de desviación"; métodos que involucran la deformación total o su medición, hasta la resistencia a la deformación; métodos que involucran un aumento o aceleración notorios en la velocidad de deformación.

1.4.7 Punto de cedencia de los metales dúctiles.

Los materiales dúctiles como el acero suave exhiben un *punto de cedencia* definido, el cual se define como el esfuerzo al cual ocurre un marcado aumento de deformación sin aumento de esfuerzo. Sólo los materiales que exhiben este fenómeno poseen un punto de cedencia dentro de ésta acepción del término, y el término *punto de cedencia* no debe usarse en conexión con un material cuyo diagrama de esfuerzo y deformación sobre el límite proporcional es una línea de curvatura gradual con esfuerzo continuamente creciente. El método de desviación puede usarse para determinar el punto de cedencia para materiales que posean diagramas de esfuerzo y deformación de "rodilla pronunciada".

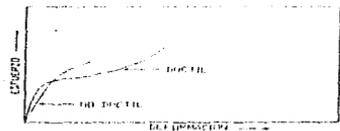
1.4.8 Medidas de resistencia última.

El término *resistencia última* está relacionado con el esfuerzo máximo que un material puede desarrollar. Las resistencias últimas se calculan con base en la máxima carga soportada por una pieza de ensayo y las dimensiones seccionales *originales*.

La *resistencia a la tensión* es el máximo esfuerzo de tensión que un material es capaz de desarrollar y, en la práctica, es el máximo esfuerzo desarrollado por una probeta del material durante el curso de carga hasta la ruptura. (Ver fig. 2)



RELACION ENTRE ESFUERZO Y DEFORMACION EN TENSION



RELACION ENTRE ESFUERZO Y DEFORMACION EN COMPRESION

Figura 2.

La *resistencia a la comprensión* es el máximo esfuerzo de comprensión que un material es capaz de desarrollar. Con un material que falla en comprensión por ruptura, la resistencia a la comprensión poseen un valor definido. En el caso de los materiales que no fallan en comprensión por una fractura desmoronante, el valor obtenido para la resistencia a la comprensión es un valor arbitrario que depende del grado de distorsión considerado como falla efectiva del material (Ver fig. 2)

La *dureza*, la cual es una medida de la resistencia a indentación superficial o a la abrasión, pueden, en términos generales, considerarse como una función del esfuerzo requerido para producir algún tipo especificado de "deformación" superficial.

1.4.9 Plasticidad.

La *plasticidad* es aquella propiedad que permite al material sobrellevar deformación permanente sin que sobrevenga la ruptura. Una expresión general de la acción plástica involucraría la velocidad de deformación, ya que en el estado plástico los materiales pueden deformarse bajo el esfuerzo constante y sostenido; así mismo involucraría el concepto del límite de deformación antes de la ruptura. Las evidencias de la acción plástica en los materiales estructurales se llaman *deformación*, *flujo plástico* y *creep*.

Las deformaciones plásticas son causadas por deslizamientos inducidos por esfuerzos cortantes. Tales deformaciones pueden ocurrir en todos los materiales sometidos a grandes esfuerzos.

Muchos metales muestran un efecto de *endurecimiento por deformación* al sobrellevar deformaciones plásticas, ya que después de que han ocurrido deslizamientos menores por corto no acusan deformaciones plásticas adicionales hasta que se aplican esfuerzos mayores.

La plasticidad es de importancia en las operaciones de formación, conformación y extrusión. Algunos metales se conforman en frío, por ejemplo, la laminación profunda de láminas delgadas. Muchos metales no conformados en caliente, por ejemplo, la laminación de perfiles de acero estructural y el forjado de ciertas partes para máquinas. Los metales como el hierro fundido se moldean en estado de fusión. Los materiales maleables son aquellos que pueden martillarse para formar láminas delgadas sin fractura; la maleabilidad depende tanto de la suavidad como de la plasticidad del metal.

La ductilidad es aquella cualidad de un material que le permite ser estirado a un grado considerable antes de romperse y simultáneamente sostener una carga apreciable. El acero suave es un material dúctil. Se dice que un material no dúctil es quebradizo.

Las medidas de ductibilidad usuales son el porcentaje de elongación y la reducción del área en el ensayo de tensión.

1.4.10 Relaciones de esfuerzo verdadero y deformación natural.

El "esfuerzo verdadero" se obtiene dividiendo la carga axial P por el área seccional instantánea real A .

La "deformación natural", también llamada "deformación verdadera", es el cambio en el tramo calibrado con respecto al tramo calibrado instantáneo a lo largo del cual el cambio ocurre:

$$\epsilon_{nat} = \int_{L_0}^L \frac{dl}{L} = \log_e \frac{L}{L_0} = \log_e (1 + \epsilon_c)$$

cuando L = largo de un pequeño elemento bajo una carga dada
 L_0 = largo original del elemento antes de aplicar una carga
 ϵ_c = deformación convencional

De la hipótesis de que durante la deformación plástica el volúmen del material permanece constante, puede demostrarse que:

$$\epsilon_{nat} = \log_e \frac{L}{L_0} = \log_e \frac{A_0}{A}$$

Donde A_0 = área seccional original antes de aplicar cualquier carga
 A = área seccional instantánea bajo una carga dada

Esta relación es particularmente útil para obtener la deformación natural en el área crítica de la sección atenuada.

Las observaciones indican que el esfuerzo verdadero está relacionado linealmente con la deformación natural desde el punto de carga máxima hasta el punto de carga fracturante. Este tipo de diagrama es mucho más significativo que el diagrama de esfuerzo y deformación convencional en los estudios relacionados con las operaciones de conformación de metales.

1.4.10.1 Diagrama de esfuerzo-deformación Ramberg-Osgood.

En el diagrama de esfuerzo y deformación ordinario, la deformación carece de dimensión pero el esfuerzo está en unidades de libras y pulgadas. Sin embargo, resulta posible que tanto el esfuerzo como la deformación carezcan de dimensión, según el desarrollo de Ramberg y Osgood.

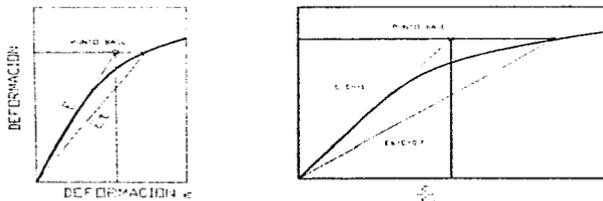


Figura 3.

La figura 3 muestra un diagrama de esfuerzo y deformación ordinario. Si todos los valores del esfuerzo se dividen por un esfuerzo básico σ_0 y todos los de la deformación por una deformación básica ϵ_0 , el diagrama resultante se muestra en la figura 3. El punto que representa los dos valores básicos en el diagrama de esfuerzo y deformación original quedará localizado en el punto base (1,1) en el nuevo diagrama Ramberg-Osgood o *diagrama uno a uno*.

Para determinar el valor básico σ_0 , trácese sobre la fig. 3 una línea recta correspondiente al módulo secante E_0 igual a algún valor elegido como 0.7E. La resistencia a la deformación secante está en la intersección de la línea secante y la curva de esfuerzo y deformación, y determina σ_0 . La deformación básica es la deformación elástica correspondiente al esfuerzo básico σ_0 , o $\epsilon_0 = \sigma_0/E$. Puedo determinarse como se muestra en la fig. 3.

El valor del módulo elástico (E_0) es E. Por lo tanto, E/E_0 siempre será 1.0 para un diagrama uno, uno. También es evidente que la resistencia a la deformación secante corresponda a un valor de $\epsilon/\epsilon_0 = 1/0.7 = 1.43$. Habiéndose determinado la ubicación de los dos puntos comunes (1.1) y (1.1.43) todos los diagramas uno-uno son similares excepte en cuanto a forma.

Se ha demostrado que:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \frac{3}{7} \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n$$

Esta es la ecuación de Ramberg-Osgood que simplifica los diagramas de esfuerzo y deformación de modo que la diferencia entre una variedad de materiales se expresa únicamente por medio del exponente n , el cual es una función de la forma del diagrama. La ecuación es valiosa en estudios comparativos de materiales ya que permite que los estudios se realicen sobre una base más generalizada.

La razón entre tangente y módulo en la forma carente de dimensión es:

$$\frac{E_t}{E} = \frac{1}{1 + \frac{3}{7} n \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{n-1}}$$

Esta razón es útil en problemas que involucran pandeo inelástico. Un método para determinar el exponente n de las anteriores ecuaciones de cualquier diagrama de esfuerzo y deformación ha sido desarrollado.

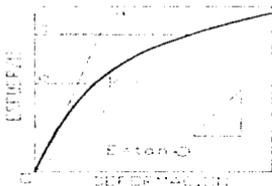
1.4.11 Rigidez.

La rigidez tiene que ver con la deformabilidad relativa de un material bajo carga. Se le mide por la velocidad del esfuerzo con respecto a la deformación. Mientras mayor sea el esfuerzo requerido para producir una deformación dada, más rígido se considera que es el material.

Bajo un esfuerzo simple dentro del rango proporcional, la razón entre el esfuerzo y la deformación correspondiente es denominada *módulo de elasticidad (E)*. Correspondiendo a los tres tipos fundamentales de esfuerzo, existen tres módulos de elasticidad, el módulo en tensión, compresión y cortante. Bajo el esfuerzo de tensión, esta medida de rigidez es, frecuentemente, llamada *módulo de Young*.

Bajo corte simple la rigidez es algunas veces llamada *módulo de rigidez*. En términos del diagrama de esfuerzo y deformación, el módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama de esfuerzo y deformación, en el rango de la proporcionalidad del esfuerzo y deformación.

La pendiente de una línea (OA) trazada tangente a la curva en el origen es el *módulo tangente inicial*. La pendiente de la curva en, digamos el punto B, es el *módulo tangente* con un esfuerzo de $b \text{ lb/plg}^2$. La razón entre cualquier esfuerzo dado y la deformación correspondiente, la cual equivale a la pendiente de la línea OC, es el *módulo secante* de elasticidad en el esfuerzo $c \text{ lb/plg}^2$.



El módulo de elasticidad de los materiales ordinariamente es determinado en forma directa por ensayos que involucran la medición del esfuerzo y de la deformación de probetas sometidas a esfuerzos simples.

El término *flexibilidad* frecuentemente se usa como antónimo de rigidez. Sin embargo, la flexibilidad por lo común tiene que ver con la flexión o el pandeo; así mismo, puede connotar facilidad para flexionarse en el rango plástico. La rigidez o flexibilidad efectiva o total de un cuerpo o miembro estructural es obviamente una función de las dimensiones y la forma de un cuerpo así como de las características del material.

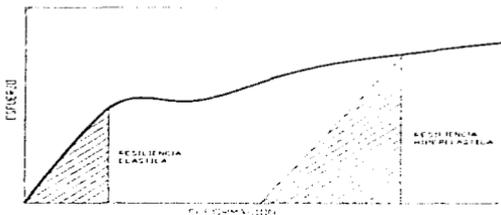
La medida de la resistencia al cambio volumétrico es llamada el *coeficiente de compresibilidad o módulo volumétrico* y se toma como la razón del esfuerzo y el cambio unitario volumétrico correspondiente.

1.4.12 Capacidad energética.

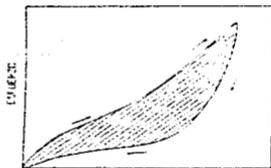
La capacidad de un material para absorber o almacenar energía es de importancia en conexión con los problemas de la resistencia al choque, carga por impacto, etc. El principio básico involucrado es que el trabajo o la energía es igual a la fuerza por la distancia.

La cantidad de energía absorbida al reforzar un material hasta el límite elástico, o la cantidad de energía que puede recobrase cuando el esfuerzo es liberado del límite elástico, es llamada la *resiliencia elástica*. La energía almacenada por unidad de volúmen en el límite elástico es el *módulo de resiliencia*. Para un volúmen unitario, digamos un cubo de 1 pgl, la resiliencia es el producto del esfuerzo promedio por la deformación. En términos del diagrama de esfuerzo y deformación, la absorción de energía está representada por el área de abajo del diagrama. La cual muestra un diagrama típico para acero suave, la resiliencia elástica está representada por el área I. Si la carga es soltada desde algún punto A en el rango plástico el diagrama de recuperación es aproximadamente un línea recta (AB) y la energía liberada está representada por el área II; ésta ha sido llamada la *resiliencia hiporelástica*.

El módulo de resiliencia es una medida de lo que puede llamarse la "resistencia a la energía elástica"



Cuando un material es sometido a una carga repetida, durante cualquier ciclo de carga o descarga, o viceversa, alguna energía es absorbida o perdida. Esto es cierto aún en el rango elástico. Para metales como el acero es cierto que la energía perdida por ciclo es reducida pero hasta éste punto la idea de que el módulo de resiliencia elástica representa energía recuperable es aproximada. Este fenómeno de la energía perdida es llamado *histéresis*, y dentro del rango elástico, *histéresis elástica*. En términos del diagrama de esfuerzo y deformación, la pérdida por histéresis está representada por el área encerrada por la vuelta formada por segmentos consecutivos del diagrama.



MULE BLANDO



ACERO FRÁGIL

La *resistencia* es la energía requerida para romper un material. Puede medirse por la cantidad de trabajo por volumen unitario de un material requerida para conducir el material a la falla bajo carga estática, llamada el *módulo de resistencia*.

1.4.13 Selección de probetas.

Las probetas deben de seleccionarse y prepararse con el propósito de arrojar una indicación confiable de las propiedades de los materiales o las partes que representan. Existen dos problemas involucrados en la selección de probetas, el establecimiento de procedimientos físicos para obtener muestras y la determinación del número de probetas o la frecuencia de los ensayos necesarios.

1.4.14 Preparación de probetas.

El tamaño de la probeta terminada está, en general, gobernada por el de la pieza o del producto del cual se le tome y por la capacidad de la máquina de ensayo disponible para ensayarla.

Finalmente, debe concederse atención al marcado y a la identificación de las probetas, así como al método para relacionar las muestras de ensayo con el lote o los lotes de material que representan.

1.4.15 Selección de aparatos de ensayo.

La selección de aparatos para un ensayo particular, involucra consideraciones de propósito del ensayo, exactitud requerida, conveniencia o disponibilidad, y economía.

El requerimiento usual para las máquinas de ensayo ordinarias es que sean exactas hasta un 1% dentro del rango de carga.

Las consideraciones de conveniencia y economía generalmente son dictadas por el equipo disponible de un laboratorio particular. Sin embargo, dentro de los límites de exactitud

requeridos debe seleccionarse ciertamente el procedimiento más simple y que consuma menos tiempo.

1.4.16 Falla.

En conexión con los ensayos hasta la falla de los materiales y las partes o los miembros estructurales, es importante observar y consignar el tipo de la falla de las características de la fractura. Esa observación debe incluir no solamente los fenómenos asociados con la ruptura final sino también todas las evidencias del cambio de condición tales como la cedenca, el deslizamiento, la variación escalar, la estricción, el desarrollo de grietas localizadas, etc. Aunque las observaciones de la falla son necesariamente cualitativas, mucho puede aprenderse de un estudio de las fallas, y con la experiencia resulta posible reconocer por una fractura la clase de esfuerzo que causó la falla y algo acerca de la clase y condición del material.

Las manifestaciones de que ha ocurrido la falla a veces aparecen después de que los procesos básicos, por medio de los cuales la falla se inició han seguido su curso, de modo que el mecanismo real de la falla puede estar embozado o pasar desapercibido. Las condiciones iniciales de la microestructura del material, las condiciones particulares de carga, las macro y microdistorsiones que ocurren durante las etapas posteriores de carga, o la forma o restricción de una pieza o estructura pueden influir críticamente en el modo de falla.

Con respecto al desempeño de un material por sí mismo, una alteración del comportamiento característico de acuerdo con alguna propiedad física básica puede considerarse que constituye la falla. Por ejemplo, si un material es esforzado (o deformado) más allá del límite elástico, puede decirse que se alcanzó la falla elástica; esto no significa que la capacidad del material para exhibir alguna recuperación elástica haya sido obstruida, más bien que en relación con su condición inicial una deformación ni elástica o permanente ha sido inducida. En un sentido, entonces el concepto de falla es elusivo.

Macroescalarmente, un grado de deformación que sea excesivo en relación con el desempeño aceptable de un miembro de alguna estructura o máquina puede también definir la falla, aún cuando una reserva considerable de resistencia a la carga perdure.

Es concebible que la falla puede ocurrir de tres maneras fundamentales: por deslizamiento o flujo, por separación, o por pandeo, como en el caso de una columna.

El deslizamiento o flujo ocurre bajo la acción de esfuerzos cortantes. Esencialmente, los planos paralelos dentro de un elemento de un material se mueven en direcciones paralelas. La acción continua de esta manera, a un volumen constante y sin desintegración del material, se denomina *creep*, o *flujo de plástico*. El deslizamiento puede terminar por ruptura cuando las fuerzas moleculares son rebasadas.

Las cargas tensivas o comprensivas así como el corte directo, las cargas torsionales o flexionantes, pueden inducir estados de esfuerzos en los cuales los esfuerzos cortantes causan el deslizamiento. Así, en un ensayo de tensión simple, la falla puede ocurrir debido al deslizamiento, el cual es una acción inducida por el corte.

La separación es una acción inducida por los esfuerzos tensivos. Se verifica cuando el esfuerzo normal a un plano excede las fuerzas internas que aglutinan el material. La falla por separación es frecuentemente denominada *fractura por fisura* y es ejemplificada por la disgregación de un cristal de mica por fuerzas que actúan perpendicularmente a los planos de fisura prominentes de ese mineral.

El pandeo es un fenómeno de compresión. Si involucra un complejo sistema de esfuerzos ejemplificando por los de una columna o un larguero esbelto cargado en un extremo después de que empieza a flexionarse lateralmente, después de algún nivel crítico de carga la resistencia de la masa compuesta desciende y el sistema de fuerzas es inestable.

La deformación permanente o plástica de la mayoría de los metales es atribuida principalmente al deslizamiento de un arreglo de átomos en un plano intracristalino sobre otro arreglo igual en un plano adyacente. Tal deslizamiento ocurre con mayor facilidad a lo largo de planos que contienen el mayor número de átomos por área unitaria. Los esfuerzos requeridos para causar deslizamiento se observa que son mucho menores que los calculados de las que se conocen como fuerzas interatómicas. Esto se atribuye a la presencia de imperfecciones en la trama cristalina, llamadas *dislocaciones*. La presencia de las dislocaciones permite el deslizamiento de grupos de sólo unos cuantos átomos a la vez; por lo tanto algún movimiento puede tener lugar a un esfuerzo menor que el que se hubiera requerido para causar el deslizamiento simultáneo de todos los átomos en todos los planos de la trama.

La velocidad según a la cual el deslizamiento puede ocurrir resulta afectada por la temperatura es decir a mayor temperatura, mayor ritmo de deformación con el tiempo.

El esfuerzo crítico normal que causaría la fractura por fisura aparecería un tanto aumentado por una temperatura decreciente, pero se presume que el aumento de resistencia a la fisura al bajarse la temperatura es mucho menor que el aumento de resistencia al deslizamiento. La resistencia a la fisura no resulta grandemente afectada por la velocidad de aplicación de carga o la velocidad de deformación.

CAPITULO II TECNICAS DE INSTRUMENTACION.

2.1 Mediciones.

Las características dentro del ensayo de materiales a medir son pocas y las de mayor importancia son las longitudes tales como ángulos, volúmenes, fuerzas, intervalos de tiempo, temperaturas, voltajes, resistencias, etc.

En lo que se refiere al ensayo del tipo mecánico la mayoría de las mediciones está íntimamente ligado al diagrama esfuerzo-deformación, ya que ésta relación es de suma importancia para determinar el comportamiento y características de los materiales.

La Ingeniería se ha basado en instrumentos que multiplican o aumentan los incrementos de carga o deformación, se han utilizado instrumentos que utilizan algunos fenómenos físicos como son la reflexión de luz, la elasticidad, el magnetismo, la inductancia, resistencia eléctrica y algunos otros con las vibraciones sónicas.

En la medición es de suma importancia conocer el error o el límite de error dependiendo el ensaye que se realice, comprendiendo por error, la diferencia del error leído y el valor que se cree, el valor esperado.

El error en los instrumentos se calcula por un instrumento de calibración para determinar el valor esperado se obtiene con un método de medición más fundamental, o comparado con instrumentos de exactitud conocida. Están relacionados estrechamente con la exactitud de un instrumento. La sensibilidad aumenta o disminuye según la variación de la cantidad que se mide, por ejemplo, si el instrumento proporciona una lectura de 1 tonelada y se le aplica un Kg. más si el instrumento modifica su lectura a 1,001 toneladas, el instrumento tiene sensibilidad, cabe mencionar que la exactitud está limitada por la sensibilidad y la lectura mínima, pero un instrumento sensitivo no necesariamente es exacto.

Las mediciones son susceptibles de variaciones, éstas variaciones deben conocerse para que los resultados finales tengan precisión conocida.

Ahora se menciona algunos instrumentos comunes para determinar la deformación, carga y las longitudes.

2.2 Pivotes.

En cualquier dispositivo que emplee palancas, ya sea una máquina de ensaye, una báscula, o un deformímetro, los pivotes son importantes detalles. Es necesario que operen con un mínimo de fricción y sin movimiento perdido y que mantengan una posición constante (brazo de palanca). Aún más, deben ser diseñados de modo que sean estables y permanezcan alineados bajo carga.

En las máquinas de ensaye que utiliza un sistema de pesaje a palancas, los pivotes son usualmente "filos de cuchilla" de acero endurecido en los cuales dos superficies pulidas se encuentran a un ángulo de 90° para producir una línea recta, la cual es el borde de apoyo. En los instrumentos pequeños, el ángulo entre las superficies que se encuentran en el borde de apoyo es frecuentemente mucho menor de 90°. La placa de apoyo o asiento del filo de cuchilla, la cual

usualmente se hace de acero endurecido, también posee superficies pulidas que se encuentran en un ángulo obtuso un poco menor de 180°.



Un diseño alternativo pone el pivote en tensión usando láminas delgadas de acero con un tramo corto no empotrado. Se han usado en los pivotes de placa cargas tensivas admisibles de 50000 lb/plg lineal. El movimiento de traslación de la articulación puede impedirse usando dos placas de pivote adyacentes y perpendiculares una de la otra.

2.3 Determinación de carga.

Pesos. Cuando pesos de magnitud conocida, se usan directamente como medio de aplicación de carga, también sirven para medir la carga.

Pesos con palanca de longitud constante. Por medio de una palanca horizontal los brazos de la cual son de longitud fija, pero no necesariamente igual, una carga dada en un brazo puede equilibrarse mediante alguna combinación de pesos en el otro brazo. Este principio se usa algunas veces para poner un sistema de pesaje a palancas dentro de un *rango* de cargas deseado, pero como el proceso de equilibrar agregando continuamente pesos separadas es lento, rara vez se usa sólo en las máquinas de ensayo.

Pesa con palanca variable. Para propósitos de ensayo uno de los más útiles principios de pesaje es el de la romana, mediante la cual la carga aplicada al brazo corto es equilibrada por una pesa de magnitud constante colocada en el punto apropiado en el brazo largo. El brazo largo, o palanca graduada de la báscula, está graduada para indicar la carga correspondiente a la posición de la pesa móvil. El método de pesaje de carga de la romana requiere la operación manual para lograr el equilibrio; por otra parte, el método pendular combinado con el uso de una báscula adecuada es autoindicativo.

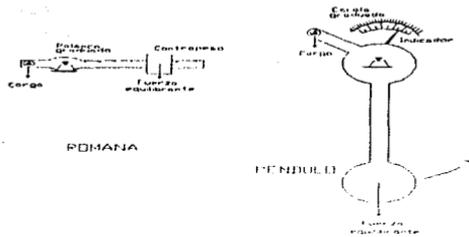


Fig. 8. Presión con patencia de líquidos.

Dispositivos hidráulicos. Las presiones de líquidos comúnmente se miden por medio de manómetros o tubos Bourdon. Un manómetro es simplemente un tubo de vidrio, por lo general, colocado en forma vertical, en el cual un líquido (mercurio) puede elevarse hasta un nivel tal que puede equilibrar la presión aplicada; el nivel del líquido se lee en una escala graduada. Es obvio que el manómetro está limitado a la medición de presiones relativamente bajas de modo que su uso para grandes cargas requeriría un dispositivo de transmisión intermedia para rebajar la carga.

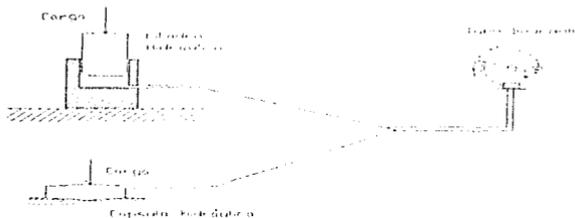


Fig. 9. Presión por medio de presión hidráulica.

En el calibrador Bourdon usual el movimiento del extremo del tubo es magnificado mecánicamente para hacer girar un indicador por un escala. La exactitud del calibrador Bourdon ordinario puede ser considerablemente afectada por los cambios de temperatura, la histéresis y la fricción de sus partes móviles.

Pueden usarse dispositivos hidráulicos interconectados con diferentes áreas de pistón en lugar de un sistema de palancas intermedio para rebajar la carga, y el pequeño pistón puede hacer que accione un dispositivo de pesaje pendular o de romana, éste es precisamente el inverso del principio del gato hidráulico usual.

El cilindro hidráulico posee dos marcadas ventajas: la fuga del líquido en pistones holgadamente ajustados y la variable "fricción" sobre el pistón cuando se usan empaques.

La cápsula hidráulica, que opera sin fricción apreciable, ha probado ser un medio muy satisfactorio para transmitir la carga y su uso se ha ampliado. La vista seccional esquemática de la cápsula Emery, la cual consiste esencialmente de un delgado y flexible diafragma metálico y un pesado bloque ahuecado, fuertemente unidos para sellar el líquido, usualmente aceite, para formar un sistema hidráulico cerrado. Como el líquido es prácticamente incomprensible, la carga sobre el bloque es transmitida al aceite de la cámara angosta con sólo un ligero movimiento del diafragma. El aceite mostrado está solamente en el sistema de medición de cargas.

Dinamómetros. Son dispositivos por medio de los cuales la generación transmisión de la potencia puede ser medida. Debido a que la medición mecánica de la potencia, por lo general, se reduce a la determinación de una fuerza, el término *dinamómetro* es a menudo aplicado a instrumentos autosuficientes de medición de cargas.

Muchos dinamómetros (en el sentido estricto de un instrumento de medición de cargas) utilizan la deformación o deflexión de un miembro elástico como base para determinar la fuerza aplicada al dispositivo, aunque la presión desarrollada en una cápsula hidráulica también ha sido utilizada como base para indicar la fuerza aplicada. En uso, se inserta un dinamómetro en el circuito de fuerzas y la fuerza a medirse (o una tracción conocida de la fuerza a medirse) es transmitida a través del dinamómetro. Por medio de la calibración bajo fuerzas conocidas, la deflexión del elemento elástico puede convertirse directamente a términos de fuerza transmitida usando una escala debidamente graduada o aplicando un factor de calibración a las deflexiones indicadas.

2.4 Máquinas de ensaye.

Dos partes esenciales de una máquina de ensaye son, un medio para aplicar carga a una probeta y un medio para equilibrar y medir la carga aplicada. Dependiendo del diseño de la máquina, estas dos partes pueden estar completamente separadas o superpuestas. Además de estos aspectos básicos, hay una variedad de partes o mecanismos accesorios, tales como dispositivos para agarrar o apoyar la pieza de prueba, la unidad de fuerza, los controles, los registros, los indicadores de velocidad y amortiguadores de retroceso o choque.

La carga puede aplicarse por medios mecánicos, mediante el uso de mecanismo de engrane y tornillo, caso en el cual las máquinas son llamadas de "engrane y tornillo" o "mecánicas". Cuando la carga es aplicada por medio de un gato o prensa hidráulicos, el dispositivo es llamado "máquina hidráulica". La fuerza puede proveerse manualmente o por medio de alguna máquina motriz (por lo general, un motor eléctrico) a una bomba o una cadena de engranes, dependiendo del diseño de la máquina y su capacidad.

Algunas máquinas son diseñadas para un solo tipo de ensaye, como una máquina de tensión hecha para ensayar cadenas y alambre; y otras hechas únicamente para ensayos

compresivos. Sin embargo, si una máquina es diseñada para ensayar probetas en tensión, compresión y flexión, es llamada "máquina de ensayo universal". También hay máquinas especiales para torsión, dureza, impacto, resistencia, flexión en frío y otros ensayos. En algunas de estas máquinas la carga no es medida.

Dos tipos de máquinas universales motorizadas son: las máquinas de engrane y tornillo con dispositivos de pesaje de palancas múltiples y contrapeso móvil o péndulo o con dispositivos electrónicos de medición de cargas y las máquinas hidráulicas, en las cuales los tipos más precisos utilizan la cápsula de Emery y un tubo de Bourdon modificado, o un tubo de Bourdon en combinación con un resorte iselástico o un dispositivo electrónico, para medir e indicar la carga.

En una máquina mecánica la carga ordinariamente es aplicada a una probeta a través de un "puente móvil". En el caso de una probeta en tensión la carga es soportada por un "puente fijo".

En las máquinas de engrane y tornillo del tipo de palanca, el puente fijo o la mesa transmiten entonces la carga al sistema de pesaje de palancas compuestas. En una máquina hidráulica la carga es ordinariamente aplicada por medio del movimiento del pistón del sistema hidráulico, el cual está conectado ya sea a la mesa de la máquina, o a un puente móvil.

Las capacidades de las máquinas de engrane de tornillo son, generalmente, menores de 300 000 ó 400 000 lb, aunque se ha construido una con capacidad de 3 000 000 lb.

Las máquinas hidráulicas más baratas que utilizan la presión en el cilindro de carga como una indicación de la carga sobre la probeta pueden resultar susceptibles a inexactitudes mayores, pero las mejores de ellas, especialmente aquellas que incorporan la cápsula Emery, pueden ser muy exactas.

Algunos de los requerimientos generales para las máquinas de ensayo son los siguientes:

1. La exactitud requerida de carga; se requiere que los errores sean menores del 1%, pero 0.5% o menos es deseable.
2. Debe ser sensitiva a los cambios ligeros de carga.
3. Las mordazas del puente deben estar alineadas.
4. Los puentes móviles no deben oscilar, torcerse o moverse lateralmente.
5. La aplicación de la carga debe ser uniforme, controlable y capaz de un considerable rango de velocidades.
6. Debe estar libre de vibraciones excesivas.
7. El mecanismo de retroceso debe ser adecuado para absorber la energía de ruptura, de las probetas que se quiebran súbitamente para evitar daños a la máquina al cargársele a toda capacidad.
8. Debe ser susceptible a la manipulación y al ajuste fáciles y rápidos y debe permitir el fácil acceso a las probetas y deformímetros.

2.4.1 Máquinas de engrane y tornillo.

Un mecanismo de engrane y tornillo impulsado por un motor acciona al puente móvil, el cual transmite la carga a través de la probeta directamente a la mesa o al puente fijo y luego indirectamente a la mesa de trabajo. La carga sobre la mesa puede a su vez equilibrarse por medio de un sistema de palancas múltiples que elimina la palanca graduada al larguero de la balanza y el contrapeso, sin embargo, algunas máquinas de engrane y tornillo construidas recientemente, miden la carga mediante un sistema de péndulo de lectura directa.

En algunas máquinas de ensaye los tornillos mismos giran dentro de tuercas de apoyo montadas en el puente móvil, en otras máquinas los tornillos están fijados al puente móvil, y las tuercas de apoyo están en los engranes debajo de la mesa de trabajo.

Se usan máquinas con dos, tres o cuatro tornillos. Las máquinas de dos tornillos están bien adaptadas para los ensayos de tensión y transversales, pero cuando se usan para ensayos de compresión, debe tenerse cuidado de colocar la probeta en el plano de los tornillos y a la mitad de la distancia entre ellos, para evitar la flexión de los tornillos. La probeta no queda tan accesible en las máquinas de tres y cuatro tornillos como en aquellas de solo dos tornillos, pero las primeras no resultan fácilmente dañadas por la excentricidad accidental o las cargas excéntricas.

Para evitar que la mesa se bote y suelte de los filos cuando una probeta se rompe repentinamente, se usan pemos de sujeción con tuercas de retroceso aisladas con hule. Estas tuercas no deben descansar sobre la mesa y siempre debe revisarse el inicio de un ensaye para cerciorarse de que estén apenas sueltas.

Algunas máquinas de engrane y tornillo están diseñadas de modo que las diferentes pesas equilibrantes o pendulares pueden usarse. Utilizando una pesa que sea más pequeña que la requerida para cargas de toda capacidad, la máquina puede usarse para pequeñas cargas con precisión, siempre y cuando se puedan mantener una sensibilidad adecuada.

2.4.2 Máquinas hidráulicas.

En el tipo A, la carga es aplicada por una prensa hidráulica y es medida por la presión desarrollada dentro del cilindro hidráulico. El pistón principal, por lo general, se ajusta y empalma cuidadosamente; para reducir la fricción del pequeño pistón usado en el sistema de medición, el segundo de ellos se hace girar durante la operación de la máquina. La carga es finalmente medida por un dispositivo pendular, aunque se usa un tubo Bourdon en algunas máquinas.

En el tipo B, la carga es aplicada por una prensa hidráulica independientemente del sistema de medición, el cual es accionado por una cápsula hidráulica.

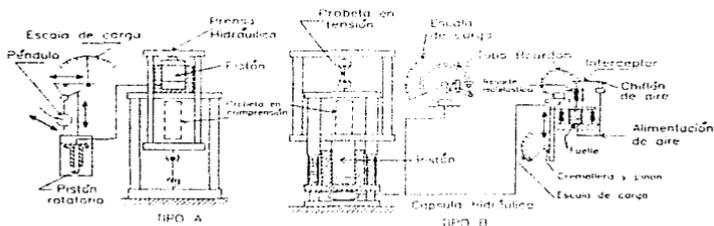


Fig. 10 Aspectos esenciales de las máquinas de ensaye hidráulicas.

En otras máquinas el uso directo del tubo Bourdon ha sido reemplazado por un mecanismo, operando según el método "nulo". En este método, un ligero movimiento del extremo del tubo Bourdon mueve al interceptor sobre él un chiflón de aire y permite que la presión del aire del chiflón y, por lo tanto, del fuelle decrezca. Los resortes de la izquierda y la derecha del fuelle aplastan a éste y atan al resorte isocástico, el cual está fijado al extremo del tubo Bourdon. Este movimiento restaura al interceptor sobre el chiflón de aire a su posición original y acciona la manecilla sobre la balanza de carga.

En las máquinas de capacidad pequeña o moderada, la energía de retroceso puede absorberse por medio de cojinetes de hule, pero en las máquinas hidráulicas grandes se usan cilindros de retroceso.

En un sistema hidráulico cerrado de indicación de cargas, la presencia del aire en el sistema causa mediciones erráticas e inexactas.

La mayoría de las máquinas hidráulicas están equipadas con dos o más carátulas indicadoras de cargas para servir a diferentes rangos de carga o llevan una carátula con una máscara que puede hacerse girar para exponer grupos diferentes de cifras y así permitir que la carátula única sirva para varios rangos de carga.

2.4.3 Ajuste de velocidad.

Los mecanismos propulsores para las máquinas de ensaye de engrane y tornillo usualmente se hace que accionen el puente a cuatro o más velocidades. Las diversas velocidades pueden obtenerse por medio del uso selectivo de diferentes razones de engranaje, de varias velocidades de motor fijas, o propulsiones electrónicamente controladas que permitan el uso de cualquier velocidad de ensaye descendida. En la mayoría de las máquinas hidráulicas modernas, cualquier velocidad de aplicación de carga deseado puede obtenerse mediante el uso de una velocidad de bombeo apropiada o un ajuste valvular que controle el flujo del aceite de la bomba al cilindro de carga.

2.4.4 Calibración de máquinas de ensaye.

Tres métodos comúnmente usados para calibrar las máquinas de ensaye son: el uso de pesas solas, el uso de palancas y pesas y el uso de dispositivos de calibración elásticos.

El uso de pesas está limitado por el espacio disponible sobre la mesa de la máquina y el número de pesas disponibles.

La razón de palanqueo de cualquier sistema de palancas debe determinarse por medio de un ensaye de carga más bien que por la medición directa de los brazos de la palanca.

Las limitaciones generales del uso de las pesas, o de las palancas con pesas, son que resultan inconvenientes para transportarse y solamente pueden usarse para un rango de carga relativamente pequeño usualmente menos que el rango de carga útil de las máquinas de ensaye de capacidad intermedia y grande.

Probablemente, el método de calibración más simple y común para las máquinas de mayor capacidad consiste en el uso de un dispositivo de calibración elástico, el cual a su vez consiste de un miembro, o miembros de metal elástico, combinado con un mecanismo para indicar

la magnitud de la deformación bajo la carga. Dos formas de ese dispositivo son: una barra de acero junto con un deformímetro acoplado y un "anillo de calibración", el cual es un aro o anillo de acero combinado con algún tipo de indicador de deflexión. Una carga comprensiva acorta el diámetro vertical, y este cambio es medido por micrómetro. Con este cambio y los datos de calibración para el anillo, la carga aplicada puede determinarse. Los anillos de calibración de esta clase son adaptables en capacidades hasta de 300 000 lb, pero las barras de comprensión tienen capacidad hasta de 3 000 000 lb, equipadas de calibradores de deformación electrónica.

A continuación aparece tres importantes requerimientos de un dispositivo de calibración elástico:

1.- Debe ser construido de tal manera que su exactitud no resulte afectada por el manejo y la transportación y que las partes susceptibles de dañarse o removerse pueden remplazarse sin disminuir la exactitud del dispositivo

2.- Debe de estar provisto de conexiones o portacojinetes construidos de tal manera que la exactitud del dispositivo en uso no resulte afectada por imperfecciones en las conexiones o en las portacojinetes.

3.- Debe calibrarse en combinación con el deformímetro que haya de usar con él, y el deformímetro debe usarse en el mismo rango que la cubierta en la calibración.

2.5 Medición de longitud.

Consistente en tomar decisiones lineales cuantitativas se reduce en última instancia a la toma de lecturas en una escala graduada. Para obtener una estimación exacta, por "coincidencia tangencial" o el uso del principio de la "escala de espejo". En el primer método se hace que la marca quede en el plano de las graduaciones escalares. Cuando el alambre o manecilla parece coincidir con su imagen, la línea de visión por el alambre es perpendicular a la escala y al espejo.

La mínima lectura de una escala depende del espaciamiento de las marcas de graduación, y siempre que sea posible es deseable estimar décimos de divisiones. Para un mayor refinamiento al leer las divisiones de una división se puede usar un Vernier.

Un Vernier sencillo de lectura directa, una distancia igual a nueve divisiones de la escala se divide en 10 divisiones iguales en el Vernier. Entonces cada división del Vernier equivale a nueve décimos de una división de la escala. Por lo tanto, si la primera marca del Vernier después del cero o índice coincide con cualquier marca de la escala, el índice queda un décimo de división más allá de la marca escalar precedente; si la segunda marca del Vernier coincide, el índice queda dos décimos de una división más allá de la marca escalar precedente.

Para distancias pequeñas, el uso directo de la escala graduada arroja resultados de exactitud limitada por que la mínima lectura práctica de un escala a simple vista es aproximadamente de 0.01plg.

2.5.1 Micrómetros.

En principio, un micrómetro es simplemente un instrumento para obtener una indicación amplificada de las distancias pequeñas. En muchos micrómetros la distancia es, de hecho, recorrida por una parte móvil, y el movimiento resultante es amplificado y medido.

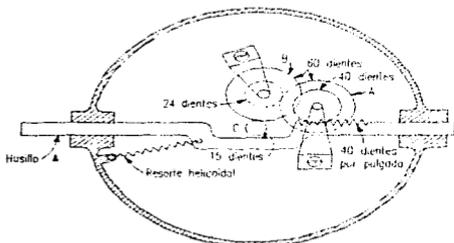
Micrómetro de tornillo. Ahí el tornillo generalmente lleva 40 cuerdas por pulgada, y el cañón tiene 25 divisiones, de modo que 1/25 de vuelta arroja un movimiento de husillo (y una lectura correspondiente) de 0.001 plg. Los micrómetros de tornillo más precisos se hacen graduados hasta 0.0001 plg.

En muchos usos del micrómetro de tornillo el extremo de husillo o tornillo debe entablar contacto con la pieza con referencia de la cual las mediciones se estén haciendo. Es necesario algún método para controlar la presión de contacto si han de obtenerse resultados consistentes.

Microscopio micrómetro. En una de sus formas la imagen ampliada de los puntos o las marcas (con respecto a los cuales la medición haya de realizarse) se superpone a una escala dentro del instrumento. En otra forma la distancia ampliada a medir es recorrida por un retículo, cuyo movimiento es indicado por el micrómetro de tornillo. La lectura práctica mínima de un microscopio micrómetro ordinario es aproximadamente de 0.00005 plg con una amplitud entre 0.1 y 0.2 plg.

Micrómetro de carátula. En estos instrumentos, el movimiento del husillo acciona una palanca o un engranaje, el cual a su vez acciona una manecilla en una carátula graduada. El indicador de carátula posee la gran ventaja de ser autoindicativo.

El mecanismo interno de una forma de indicador de carátula, el cual utiliza trenes o cadenas de engranaje. Debe advertirse que en este dispositivo la cremallera propulsa un piñón, el cual a su vez acciona un engrane. Esto es lo contrario de la operación ordinaria del tren de engranes y toma importante la fricción de apoyo de manera que, en las mejores calidades de indicadores de carátula se usan rodamientos enjovados. En el indicador de carátula ordinario, la división más pequeña de la carátula corresponde a un movimiento del husillo de 0.001 plg, que arroja una mínima lectura estimada de 0.001 plg.



Por cada movimiento de una plg del husillo

A gira una vez

B gira $\frac{24}{60}$ de A

C gira $\frac{24}{60} \times \frac{60}{40} = \frac{3}{5}$ de B = 10A

Por eso una revolución de C (unidad de la manecilla) es 1 plg de movimiento del husillo

Carátula graduada en 100 partes

División carátula mínima = $\frac{0.1}{100} = 0.001$ plg de movimiento del husillo

Fig. 11 Mecanismo típico de indicador de carátula

Estos indicadores se construyen para varios rangos de movimiento del husillo, siendo una amplitud común 0.2 píq; sin embargo, amplitudes de 1/2 ó hasta 1 píq, son adquiribles. Sobre cualquier amplitud considerable, la mayoría de los indicadores de este tipo son confiables hasta 1 ó 2 divisiones de la carátula.

Palanca de luz. Un medio para amplificar el movimiento angular con alta precisión, el cual ocasionalmente se adapta a las mediciones de deformación, es el método de la "palanca de luz". Un rayo de luz es reflejado desde un espejo en el elemento móvil, y el movimiento del rayo es observado en una escala a alguna distancia deseada desde el espejo.

Interferómetro. El medio más exacto conocido para medir movimientos pequeños es una adaptación del fenómeno de la interferencia de las ondas de luz. Un interferómetro se construye de tal modo que, cuando la luz monocromática es reflejada desde dos planos superficiales, casi paralelos, los rayos reflejados que están desfasados media honda de luz interfiere, causando que una serie de bandas claras y oscuras pueda verse.

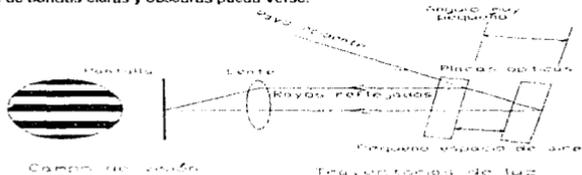


Fig. 12 Principio del interferómetro

Ese instrumento es sumamente sensible y resulta adecuado hasta mediciones muy finas.

El principio del interferómetro tiene un uso importante en la calibración y revisión de bloques calibradores en los cuales se requiera una exactitud extrema.

2.5.2 Deformímetros mecánicos.

Los puntos entre los cuales se miden las deformaciones se llaman *puntos de calibración* y la distancia inicial o nominal entre los puntos de calibración es llamada *distancia de calibración* o *longitud de calibración*. La medición de la deformación total no depende de la longitud de calibración si se usa un dispositivo de tipo micrométrico.

Extensómetro de collarín de tipo de promediación. Para las mediciones ordinarias de la deformación de probetas axialmente cargadas, quizás el tipo de deformímetro más generalmente útil sea el extensómetro o compresómetro de promediación. Este tipo de instrumento da con mucha exactitud la deformación media en la barra, aún cuando ocurra una flexión ligera. La deformación se amplifica, primeramente por la acción de la palanca de los collarines y luego se mide con algún tipo de micrómetro.

Con un calibrador de 8 plg y el uso de la lectura de un indicador de carátula ordinario hasta 0.001 plg por estimación, este tipo de instrumento es capaz de medir deformaciones hasta aproximadamente 0.00008 plg por pulgada.

Para obtener la deformación promedio en una barra prismática, las deformaciones deben medirse cuando menos sobre dos líneas de calibración, las cuales deben estar diametralmente opuestas.

Calibradores de deformación. Estos dispositivos llevan dos patas puntiagudas que se encajan en pequeños agujeros taladrados en el objeto ensayado. En el calibrador Whittemore, las barras laterales están conectadas por placas pivotales flexibles. El indicador de carátula está conectado a la barra A, y el husillo de la carátula presiona un diente fijado a la barra lateral B, de modo que cualquier cambio de longitud en el calibrador causa a su vez un cambio en la posición relativa de las barras laterales, el cual es señalado por el indicador de carátula. El calibrador Berry acciona un indicador de carátula mediante el uso de una palanca en forma de cigüeñal, un brazo de la cual constituye una pata del calibrador. La razón de palanca es usualmente 1:5.

Estos calibradores son llamados instrumentos *portátiles* porque pueden ser aplicadas a una línea de calibración solamente en el momento que una observación haya de hacerse, y así un instrumento puede usarse para medir deformaciones a lo largo de cualquier número de líneas de calibración. Cuando se les usa como instrumentos portátiles, las lecturas sobre una barra auxiliar no esforzada, llamada *barra normalizadora*, se hacen a intervalos para servir como base con la cual se comparan las observaciones sobre la probeta esforzada.

Tensómetro Huggenberger. Los principales aspectos del "tensómetro" Huggenberger, el cual funciona según el principio de la palanca multiplicadora. Cada división escalar de este instrumento representa 0.001 plg. El alcance del instrumento es aproximadamente de 0.008 plg.

Deformímetro de espejo, de Marten. Los sistemas de palancas mecánicas están limitados por la fricción en las articulaciones y el peso de las palancas. Utilizando rodamientos enjogados, pivotes de placa, o filos de cuchillos, la fricción por empuje puede reducirse considerablemente, pero las palancas aún tienen peso; la última objeción puede eliminarse mediante el uso de rayos de luz para amplificación. Un espejo plano se fija aun doble filo o rombo de modo que el espejo gira según la probeta cambia de longitud. El grado de amplificación de este movimiento depende de la longitud de la palanca larga, la cual es la distancia entre el espejo y la escala, y la de la corta, o sea la distancia entre los extremos opuestos del rombo a los cuales se fija el espejo. El deformímetro completo consiste en dos de esas unidades fijadas a los lados opuestos de la probeta.

Deformímetro óptico de Tuckerman. Uno de los deformímetros más precisos es el calibrador óptico de deformación de Tuckerman. Una superficie del rombo, el cual ha sido pulido hasta una tersura óptica, se usa como espejo giratorio u oscilatorio. Su rotación con respecto a otro espejo fijado en posición con respecto al marco se mide con un dispositivo óptico llamado *autocolimador*. El tramo de calibración normal es de 2 plg. Con el instrumento de 2 plg, la mínima deformación mensurable es 0.000002, y el rango es de 0.0025 plg/plg.

2.5.3 Registradoras de esfuerzos-deformaciones

Algunas máquinas de ensaye están equipadas con grabadoras autográficas de esfuerzo y deformación, las cuales automáticamente trazan un diagrama de esfuerzo y deformación. En un tipo, el deformímetro eléctrico fijado a la probeta lleva una palanca de acción por deformación que mueve un núcleo dentro de la bobina eléctrica de un transformador en miniatura. El movimiento del núcleo es transmitido electrónicamente a un transformador similar que acciona un servomotor que hace girar el cilindro de la grabadora. La aguja accionada por la carga y el cilindro accionado por la deformación controlan los dos movimientos necesarios para trazar el diagrama de esfuerzo y deformación.

2.5.4 Montaje de calibradores

La superficie sobre la cual un calibrador deba montarse debe estar totalmente limpia y pareja, pero de preferencia no demasiado lisa o muy pulida. La limpieza se realiza satisfactoriamente con acetona o tetracloruro de carbono.

2.5.4.1 Impermeabilización

La inestabilidad de calibración es causada primordialmente por la humedad absorbida por el calibrador. La humedad produce cambios de conductividad y cambios dimensionales del cemento de unión que resultan en deformaciones en los alambres de calibración, las cuales a su vez causan cambios de resistencia.

La humedad se minimiza por medio de una completa impermeabilización. Sin embargo, solamente unos cuantos tipos de servicio requieren esta protección, ya que en la mayoría de las aplicaciones el efecto de los cambios de humedad no es significativo durante el curso de un ensaye.

Antes de impermeabilizar cualquier calibrador es necesario que el cemento se seque y cure perfectamente y que el calibrador quede libre de toda humedad absorbida o superficial. El calibrador puede entonces impermeabilizarse con una capa de grasa, compuestos sellantes derretidos, neopreno, o compuestos autovulcanizantes de hule sintético.

2.5.5 Medidores fotoelásticos de deformación

El calibrador fotoelástico Strainline permite la determinación de deformaciones a lo largo del eje del calibrador usando la luz ordinaria como única fuente de potencia. Está hecho de un material delgado fotoelástico de $\frac{1}{4}$ por 2 plg., el cual está adherido a la probeta por medio de un cemento epóxico. El esfuerzo aplicado al calibrador causa que las bandas, o franjas, de color se muevan con respecto a las escalas de calibrador permitiendo así la lectura directa de la deformación. La tensión causa que las líneas de franja se muevan hacia las cifras superiores de la escala y la compresión provoca un movimiento inverso. Entonces $e = X/SF$ cuando $e =$ deformación unitaria a lo largo del calibrador; $X =$ el movimiento de deformación de una franja dada del calibrador, en divisiones; $SF =$ factor de deformación del calibrador en u (micro) plg/división.

El factor de banda o franja FF es la deformación requerida para causar que una franja sea reemplazada en posición por la adyacente. Para material Strainline.

$$FF = 700u \text{ plg/plg/franja.}$$

El factor de deformación, SF se obtiene dividiendo el factor de franja por el número de divisiones, d , entre franjas o

$$SF = FF/d.$$

Estos calibradores poseen factores de deformación prácticamente constantes entre 50 y 100°F. La máxima deformación utilizable al pegárseles con cemento epóxico es de aproximadamente 7 000u pig/pig.

2.5.6 Uso de los calibradores

En conexión con la inspección de materiales, frecuentemente se requiere que no sólo la calidad del material, sino también las dimensiones y tolerancias se revisen.

Los calibradores son dispositivos usados para determinar si una o más de las dimensiones de una parte simple o un montaje están dentro de los límites admisibles. Un calibrador simple es un instrumento individual y puede usarse para revisar solamente una dimensión, mientras que un micrómetro o escala, cuando puede usarse, servirá para cualquier medición dentro de su alcance. El calibrador, sin embargo, asegura una positividad y rapidez de medición.

Los calibradores de referencia pueden usarse para revisar los calibradores de servicio que se usan en operaciones de fabricación o inspecciones.

2.5.6.1 Calibradores simples

Los calibradores simples se hacen en tamaños "pasa" o "no pasa". El calibrador "pasa" ajustará sobre o ingresará en la parte que esté siendo medida, existen dos tipos de calibradores simples, el calibrador receptor y el ingresante o enchufable. El tipo ingresante puede ser recto o ahusado y tener cualquier sección, tales como circular, cuadrada, rectangular o irregular. Cuando son circulares y rectos, se les designa calibradores simples de pija cilíndrica y se usan para revisar diámetros internos. Al usar estos calibradores la labor es satisfactoria si sus dimensiones están entre las de los calibradores "pasa" y aquellas de los "no pasa".

Los calibradores de pija simples pueden hacerse sólidos, es decir, de una sola pieza. Los tipos separables son diseñados y contruidos a modo de minimizar la posibilidad de cualquier "sacudida" que interfiera con el sensitivo "táctico" tan esencial para la manipulación y el uso apropiado de éstos calibradores. Requieren manejo delicado y nunca deben "forzarse". La habilidad y la experiencia son necesarias para lograr resultados confiables, especialmente en los tamaños grandes.

Los de tamaño pequeño, cuando no son sólidos, usualmente se hacen con un vástago ahusado que se hincan en el extremo de una manija hueca, el calibrador de "pasa" en un extremo y el "no pasa" en el otro.

El tipo receptor, cuando es circular, es comúnmente llamado calibrador anular y puede ser cilíndrico o ahusado y liso o roscado.

El calibrador anular roscado usual se hace ajustable. El tornillo tiene dos partes, una de las cuales es un husillo ranurado roscado tanto interna como externamente de modo que cuando el

extremo A se hace girar, esto abre o cierra la rendija de ajuste, mientras que al hacer girar el extremo B el tornillo se traba en posición.

En general, los calibradores exteriores de presión permiten una inspección más rápida que los anulares, pero cuando las tolerancias son muy rígidas, los calibradores anulares de "pasa" comprobaran rápidamente la redondez y el diámetro.

2.5.6.2 Calibradores de contorno

Los calibradores de contorno, perfil y plantilla para determinar el contorno o la forma de una parte pueden hacerse del tipo "pasa" o "no pasa", sin embargo, en lugar de utilizar esos calibradores, una sombra ampliada de la parte que se esté examinando o inspeccionando pueden proyectarse sobre un dibujo ampliado o magnificado.



Fig. 13 Típicos calibradores de ajuste de presión

2.5.6.3 Calibradores indicadores y comparadores

Los calibradores indicadores emplean un dispositivo tal como una palanca y escala graduada o un indicador caratular para mostrar las variaciones de las dimensiones en revisión.

CAPITULO III JUICIOS PARA LA REALIZACION DE INSTRUMENTACIONES.

3.1 El ensaye de tensión

3.1.1 Requerimientos para probetas de tensión

La sección transversal es redonda, cuadrada, o rectangular, para los metales. Una probeta redonda, para láminas y placas en almacenamiento usualmente se emplea una probeta plana. La porción central del tramo es usualmente de sección menor que los extremos para provocar que la falla ocurra en una sección donde los esfuerzos no resulten afectados por los dispositivos de sujeción. El tramo de calibración es el tramo marcado sobre el cual se toman las mediciones de alargamiento o extensómetro.



FIG. 14. Probetas planas de tensión.

La forma de los extremos debe ser adecuada al material, y tal, que ajuste debidamente en el dispositivo de sujeción a emplear. Los extremos de las probetas redondas pueden ser simples, cabeceados, o roscados. Los extremos simples deben ser suficientemente largos para adaptarse a algún tipo de mordazas uniformes. Las probetas rectangulares generalmente se hacen con extremos simples, aunque éstos ocasionalmente pueden ser cabeceados o contener un orificio para aplicar presión con perno.

La relación entre el diámetro o ancho del extremo y el diámetro o ancho de la sección reducida, es determinada en gran parte por la costumbre, aunque para los materiales quebradizos es importante tener los extremos suficientemente grandes para evitar la falla debida a la combinación del esfuerzo axial y los esfuerzos debidos a la acción de las mordazas.

La transición del extremo a la sección reducida debe hacerse por medio de un bisel adecuado para reducir la concentración del esfuerzo causada por el cambio brusco de sección.

El efecto del cambio de sección sobre la distribución del esfuerzo, es prácticamente inapreciable a distancias mayores de más o menos 1 ó 2 diámetros desde el cambio.

Para obtener una uniforme distribución del esfuerzo, a través de las secciones críticas, la porción reducida de la pieza frecuentemente se hace con los lados paralelos a todo su largo.

Una probeta debe de ser simétrica con respecto a un eje longitudinal a toda su longitud , para evitar la flexión durante la aplicación de la carga .

La longitud de la sección reducida depende de la clase de material a ensayar y las mediciones a tomar. Con los metales dúctiles, para los cuales el alargamiento o la reducción de área hayan de determinarse, la longitud debe ser suficiente para permitir una ruptura normal, es decir el estiramiento o la estricción no deben ser inhibidos por la masa de los extremos.

El tramo de calibración siempre es un poco menor que la distancia entre las cabeceras, pero la práctica con respecto a la relación entre estos tramos no es uniforme. Si se han de tomar mediciones de extensómetro, se considera deseable que el tramo de calibración sea más corto que la distancia entre las cabeceras ; cuando menos el equivalente a 2 veces el diámetro de la probeta. Los puntos extremos del tramo calibrado deben de ser equidistante del centro del tramo de la sección reducida.

El porcentaje de alargamiento de una probeta de metal dúctil de diámetro dado, depende del tramo de calibración a lo largo del cual se toman las mediciones. Se ha establecido por medio de muchos ensayos que el alargamiento es prácticamente constante para piezas de varios tamaños, si las piezas son geométricamente similares.

La probeta de tensión redonda para metales dúctiles ASTM STANDARD mostrada en la fig. 5.3a frecuentemente se hace de 0.505 plg de diámetro para tener una área seccional exactamente de 0.2 pulgadas cuadradas. Pueden utilizarse probetas más pequeñas , siempre y cuando el tramo de calibración sea de 4 veces el diámetro de la probeta. Si se hace un adelgazamiento, la diferencia de diámetro entre los extremos y el centro del tramo de calibración no debe exceder de 1% aproximadamente.

Las probetas provenientes de barras, varillas o alambres, usualmente tienen el área seccional completa del producto que representa. Cuando resulta práctico el tramo de calibración debe tener 4 veces el diámetro de la probeta , aunque para tamaños de ¼ plg. y menores , se usan frecuentemente un tramo de calibración de 10 plg. . Los ensayos de tensión de cable de alambre se realizan sobre tramos cortados de cable comercial.

Los tubos pequeños se ensayan a pleno diámetro. Se insertan tapones metálicos de ajuste apretado, en los extremos, hasta una profundidad suficiente para permitir que los sujetadores abracen la probeta sin causar el colapso del tubo.

3.1.2 Dispositivos de montaje

La función del dispositivo de montaje es transmitir la carga desde los puentes de la máquina de ensayo hasta la probeta. El requerimiento esencial del dispositivo de montaje es que la carga sea transmitida axialmente a la probeta; ésto implica que los centros de acción de las mordazas estén alineados al principio y durante el progreso del ensayo, y que no se introduzca ninguna flexión o torsión por la acción, o una falla en la acción de las mordazas . Además, por supuesto, el dispositivo debe estar adecuadamente diseñado para soportar las cargas y no debe aflojarse durante un ensayo .

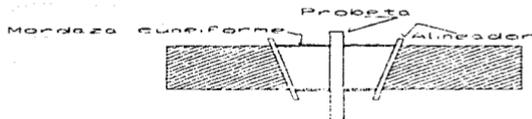


Fig. 15. Dispositivos de montaje.

Las mordazas, son un tipo común de dispositivo de montaje. Resultan satisfactorias para ensayos comerciales de probetas de metal dúctil de longitud adecuada, porque una ligera flexión o torsión no parece afectar la resistencia y el alargamiento de los materiales dúctiles.

Las mordazas del tipo de cuña son usualmente satisfactorias para usarse con materiales quebradizos, porque la acción presionante de las mordazas tiende a causar la falla en o cerca de las mordazas. Las caras de las mordazas que tocan la probeta se hacen ásperas o estriadas para reducir el deslizamiento; y para las probetas cilíndricas, las mordazas llevan una ranura en V de tamaño adecuado. El ajuste se hace por medio de tabillitas o alineadores, de modo que el eje de la probeta coincida con el centro de los puentes de la máquina de ensayo y las mordazas queden apropiadamente ubicadas en la cabecera.

De materiales quebradizos se usan los dados en ambos extremos; usualmente es un arreglo de asentamiento esférico o de perno (denominado enlace "autoalineante").

Un dispositivo para sujetar adecuadamente probetas delgadas de lámina metálica y alambre (sujetadores de Tempin).

3.1.3 Realización de ensayos

En el ensayo comercial de tensión de los metales, las propiedades usualmente determinadas son la resistencia a la cedencia, la resistencia a la tensión, la ductilidad y el tipo de la fractura. Para material quebradizo, solamente la resistencia a la tensión y el carácter de la fractura se determinan comúnmente. En ensayos más completos, como una gran parte de la labor de investigación. Las determinaciones de las relaciones entre esfuerzo y deformación, el módulo de elasticidad y otras propiedades mecánicas, se incluyen.

Previamente a la aplicación de cargas a una probeta, sus dimensiones se miden. Ocasionalmente, se puede requerir el peso unitario, requiriendo determinaciones de peso y volumen. Las mediciones lineales se hacen con báscula, separadores y escala, o micrómetros, dependiendo de la dimensión a determinar y la precisión a alcanzar. En el caso más simple, solamente el diámetro o el ancho y el grueso de la sección crítica se miden.

Se han de tomarse mediciones de alargamiento, el trazo de calibración es marcado o trazado. Sobre probetas de metal dúctil de tamaño ordinario, ésto se hace con un punzón de centros; pero sobre láminas delgadas o material quebradizo, deben usarse rayas finas.

Antes de usar una máquina de ensayo por primera vez, el operador debe familiarizarse con la máquina, sus controles, sus velocidades, la acción del mecanismo de carga y el valor de las graduaciones del indicador de carga. Antes de poner una probeta en una máquina debe comprobarse que el dispositivo de carga de la máquina dé la indicación de carga cero y se hagan los ajustes si fuere necesario.

La probeta debe colocarse de tal manera que resulte conveniente para hacer observaciones en las líneas de calibración.

Si se ha de utilizar un extensómetro, el valor de las divisiones del indicador y la relación de multiplicación deben determinarse antes de colocar el extensómetro sobre la probeta. Cuando se usan extensómetros del tipo de collares, el eje de la probeta y el de el extensómetro debe hacerse coincidir. Frecuentemente una pequeña carga inicial se coloca sobre la probeta, antes de poner el extensómetro en posición de cero.

La velocidad del ensayo no debe ser mayor que aquella a la cual las lecturas de carga y otras pueden tomarse con el grado de exactitud deseado, y si la velocidad de ensayo ejerce una influencia apreciable sobre las propiedades del material, el ritmo de deformación de la pieza de ensayo deben de quedar dentro de límites definidos.

Los métodos para especificar las velocidades de ensayo varían. Un número de recomendaciones para velocidades de ensayo han sido hechas y retiradas de las normas de la ASTM para metales.

Sobre el punto de cedencia de los metales dúctiles se permiten velocidades más altas porque la variación de la velocidad no parece tener tanto efecto sobre la resistencia última, como la resistencia a la cedencia; el alargamiento, sin embargo, es sensitivo a la variación de la velocidad a altas velocidades de carga.

Después de que la probeta ha fallado, se le retira de la máquina de ensayo, y si se requiere valores de alargamiento, los extremos rotos de una probeta se juntan y se mide la distancia entre los puntos de referencia con una escala o un separador hasta el 0.01 plg más cercano. El diámetro de la sección más pequeña se puede calibrar preferiblemente con un separador micrométrico equipado con un huso puntalagudo y un yunque o tas, para determinar la reducción del área.

3.1.4 Observaciones de ensayo

Las observaciones hechas durante un ensayo se registran de alguna manera apropiada separada, antes de iniciar el ensayo. La identificación de las marcas y la información similar pertinente se anotan. Las dimensiones original y final, así como las cargas críticas se registra al observarse. Si las mediciones extensométricas se hacen manualmente, se lleva una bitácora de las cargas y las deformaciones correspondientes. Algunas máquinas de ensayo están equipadas con un aditamento automático para trazar el diagrama de esfuerzo y deformación. Se anotan, la característica de la fractura y la presencia de algunos defectos. También se anotan en las bitácoras las condiciones del ensayo, particularmente el tipo del equipo usado y la rapidez del ensayo. Las deformaciones, esfuerzos, porcentaje de elongación y reducción del área se calculan sobre la base de las dimensiones originales.

La bitácora contiene casi toda la información pertinente de un ensaye de tensión, pero no se supone que sea completa, ya que conceptos tales como la fecha y los nombres del operador y del registrador, los cuales deben consignarse, no se incluyen.

Las fracturas por tensión pueden clasificarse en cuanto a forma, textura y color. Los tipos de fractura, en lo respectivo a la forma, son simétricos: cono y cráter, planos e irregulares. Varias descripciones de la textura son: sedosa, grano fino, grano grueso ó granular, fibrosa, cristalina, vidriosa y mate.

3.1.5 Efecto de las variables importantes

Los informes de las investigaciones para determinar tales efectos comprenden una vasta literatura que cubre muchos años.

En general, en los materiales metálicos, si el metal es de *calidad uniforme*, el tamaño de probetas geoméricamente similares no parece afectar apreciablemente los resultados del ensaye de tensión. Varias investigaciones sobre aceros estructurales han corroborado esto. Sin embargo, es importante recordar que, en el curso de la fabricación o el procesado de partes o formas, la calidad del metal frecuentemente varía de acuerdo con el tamaño de la pieza en producción. Así pues, los resultados de ensaye para probetas de diferentes tamaños pueden reflejar el efecto de la masividad sobre las propiedades. En el caso del acero roiado en caliente, la ductibilidad resulta afectada hasta cierto punto por la labor de roiado, aunque las resistencias a la cedencia y a la tensión son apenas afectadas. La resistencia del alambre tensado en frío es marcadamente influida por el proceso de tensado. Debido al efecto del endurecimiento por deformación, hay un aumento considerable en el punto de cedencia y la resistencia última de los metales trabajados en frío, pero estos cambios son acompañados por una marcada disminución de la ductibilidad. En el caso de los metales fundidos, la variación de la resistencia de acuerdo con el tamaño del fundido es marcada, como queda ilustrado por los resultados de ciertos ensayos de tensión de barras de hierro fundido, pero las diferencias representan en gran parte diferencias reales de las propiedades de las probetas, por fundición más bien que un efecto real del tamaño.

El alargamiento total de un metal dúctil en el punto de ruptura se debe al alargamiento plástico, el cual está más o menos uniformemente distribuido a lo largo del tramo de calibración, sobre el que se superpone un estiramiento de la sección restringida lo cual ocurre justamente antes de la ruptura.

3.2 El ensaye de Compresión.

3.2.1 Observaciones generales

Cuando menos en teoría, el ensaye de compresión es meramente lo contrario del de tensión con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado. Las razones generales para la elección de uno u otro tipo de ensaye se establecieron. Así mismo, un número de principios generales se desarrolló a través de la sección sobre el ensaye de tensión los cuales son igualmente aplicables al ensaye de compresión. Existen, sin embargo, varias limitaciones especiales del ensaye de compresión a las cuales se debe dirigir la atención:

- 1.- La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial.
- 2.- El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga tensiva. Existe siempre una tendencia al establecimiento de esfuerzos flexionantes y a qué el

efecto de las irregularidades de alineación accidentales dentro de la probeta se acentúa a medida que la carga prosigue.

3.- La fricción entre los puentes de la máquina de ensaye o las placas de apoyo y las superficies de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de ésta. Esto puede alterar considerablemente los resultados que se obtendrían si tal condición de ensaye no estuviera presente.

4.- Las áreas seccionales, relativamente mayores de la probeta para ensaye de compresión para obtener un grado apropiado de estabilidad de la pieza. Esto se traduce en la necesidad de una máquina de ensaye de capacidad relativamente grande o probetas tan pequeñas y, por tanto, tan cortas que resulta difícil obtener de ellas, mediciones de deformación de precisión adecuada.

Se supone que se desean las características simples del material y no la acción de los miembros estructurales como columnas, de modo que la atención se limita aquí al bloque de compresión corto.

3.2.2 Requerimientos para probetas de compresión

Para el esfuerzo uniforme de la probeta de compresión, una sección circular es preferible. Sin embargo, la sección cuadrada o rectangular se usa frecuentemente, para piezas manufacturadas.

A medida que la longitud de la probeta se aumenta, se presenta una tendencia creciente hacia la flexión de la pieza, con la consiguiente distribución no uniforme del esfuerzo sobre una sección recta.

Así mismo, para longitudes menores de aproximadamente 1.5 veces el diámetro, los planos diagonales a lo largo de los cuales la falla se verificaría en una probeta más larga intersectan la base, son el resultado de que la resistencia aparente se aumenta. Comúnmente se emplea una relación entre longitud y diámetro de 2 ó más.

El tamaño real depende del tipo de material, del tipo de mediciones a realizar, y del aparato de ensaye disponible.

Los extremos a los cuales se aplica la carga deben ser planos y perpendiculares al eje de la probeta o, de hecho, convertidos así mediante el uso de cabeceo y dispositivos de montaje.

Los tramos de calibración para mediciones de deformación deben preferiblemente ser más cortos que el largo de la probeta, cuando menos el diámetro de la probeta.

3.2.3 Probetas estándar

Las probetas para ensayos de compresión de materiales metálicos recomendados por la ASTM. Las probetas cortas son para usarse con metales antifricción, las de longitud mediana para uso general y las largas para ensayos que determinen el módulo de elasticidad.

Para el concreto, las probetas estándar son cilindros con una altura del doble del diámetro.

Las probetas para ensayos de compresión de piezas pequeñas y limpias de madera paralela a la fibra, son prismas rectangulares de 2 por 2 por 8 pig.

La resistencia a la compresión del ladrillo para construcción se determina sobre medio ladrillo con superficie aproximadamente plana y paralela, ensaye acostado.

3.2.4 Camas y bloques de apoyo

Los extremos de las probetas de compresión deben ser planas para no causar concentraciones de esfuerzos y deben ser perpendiculares al eje de la pieza para no causar flexión debida a la carga excéntrica.

Las superficies de los extremos de las probetas metálicas pueden maquinarse planas y en ángulo recto con el eje. Las piezas de ensaye de madera usualmente pueden arreglarse para satisfacer estas condiciones. Para materiales tales como el concreto, la piedra y el ladrillo.

Los materiales comúnmente usados para camas son el yeso, el Hydrostone (un compuesto de gisonita de alta resistencia), los cementos de graduado rápido, y los compuestos de sulfuro.

Es deseable que el material de cabeceo posea un módulo de elasticidad y una resistencia cuando menos iguales a los del material de probeta. La cabeceada debe ser tan delgada como sea práctico. Si un compuesto para laponar contiene agua, ello puede afectar la resistencia de los materiales absorbentes como el ladrillo, de modo que una capa de goma laca o una hoja de papel encerado se fija sobre los extremos de la probeta antes de rematarla.

Usualmente un extremo de la probeta debe apoyarse en un bloque o dado esféricamente asentado. El objeto del bloque es contrarrestar el efecto de una pequeña falta de paralelismo entre el puente de la máquina y la cara extrema de la probeta, confinando a la probeta una distribución inicial de la carga tan pareja como sea posible. Es deseable que el bloque de apoyo esféricamente asentado, esté en el extremo superior de la probeta. Para que el resultante de las fuerzas aplicadas al extremo de la probeta no quede excéntrica con respecto al eje de la probeta.

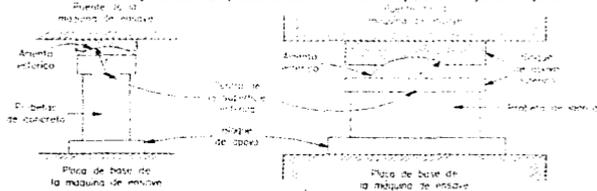


Fig. 16 Bloques o dados de apoyo esféricos para ensayos de compresión

3.2.5 Realización de los ensayos

En los ensayos comerciales la única propiedad ordinariamente determinada es la resistencia a la compresión. Para los materiales quebradizos en los cuales ocurre una fractura, la resistencia última se determina fácil y definitivamente. Para aquellos materiales en los cuales no hay un fenómeno singular que marque la resistencia última, se toman límites de deformación arbitrarios como criterios de resistencia.

Las dimensiones deben determinarse. Las precisiones recomendadas para mediciones transversal seccionales en la labor ordinaria son las siguientes: metales, hasta el 0.001 pig más cercano; concreto y madera, hasta el 0.01 pig más cercano.

Debe tenerse mucho cuidado para lograr el centrado y la alineación de la probeta y la de los bloques de apoyo en la máquina de ensaye.

Al ensayar los metales, los extremos de la probeta y las caras de los bloques de apoyo deben limpiarse con acetona o cualquier otro solvente adecuado inmediatamente antes del ensaye para quitar la grasa y el aceite que pudieran influir en la restricción friccional de las superficies extrémeales.

Para la máquina de engranes de tornillo, la velocidad de ensaye en compresión es todavía comúnmente especificada en términos de la velocidad de marcha del puente movable.

En muchos casos, velocidades más lentas son deseables. Para ensayos de concreto que involucren mediciones de deformación, una velocidad de cruceta de 0.01 a 0.02 pig por minuto es satisfactoria.

En un ensaye de compresión, una distribución de esfuerzos absolutamente uniformes prácticamente nunca se alcanza. Al realizar determinaciones precisas de esfuerzo y deformación con la mira de encontrar el límite proporcional, resulta pues deseable medir las deformaciones a lo largo de cuando menos tres líneas de calibración con 120° de separación alrededor de una pieza cilíndrica. Para determinaciones ordinarias del módulo de elasticidad, un compresómetro del tipo de promediación es usualmente suficiente.

3.2.6 Observaciones de ensaye

La identificación, las dimensiones, las cargas críticas, las lecturas compresométricas, el tipo de la falla, incluyendo los cruquis, etc. se registran en una forma apropiada al tipo de ensaye y la extensión de los datos a tomar.

Los materiales quebradizos comúnmente se rompen ya a lo largo de un plano diagonal, o ya con una fractura en forma de cono (probetas cilíndricas) o pirámide (probetas cuadradas), ocasionalmente denominada fractura en forma de *reloj de arena*. El hierro fundido usualmente falla a lo largo de un plano inclinado, y el concreto exhibe una fractura del tipo cónico. Tales fracturas son esencialmente fallas por corte.

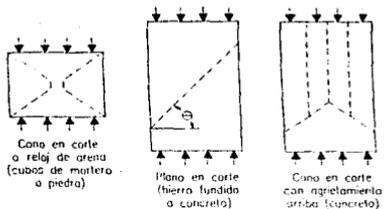


Fig. 17 Tipos de falla de los materiales quebradizos bajo cargas compresivas

Para un material cuya resistencia a la falla se deba en tanto a la fricción interna como a la cohesión y el cual se comporte de acuerdo con la teoría de la ruptura de Mohr, el ángulo de ruptura no es de 45° (plano de máximo esfuerzo cortante), sino una función del ángulo de fricción interna. En el círculo de esfuerzos de Mohr, el estado de esfuerzo al ocurrir la falla en un elemento sometido a un esfuerzo principal uniforme en solamente una dirección. De la representación de los ángulos de ruptura en el diagrama circular de Mohr se puede demostrar que:

$$\alpha = 45^\circ - \varphi / 2 \quad \text{o} \quad \theta = 45^\circ + \varphi / 2$$

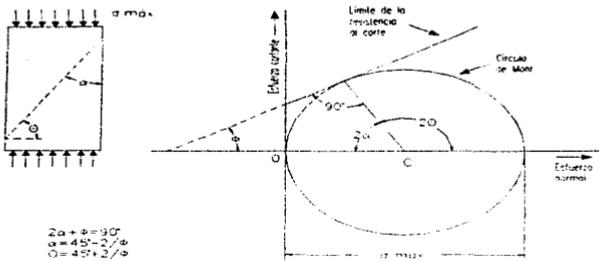
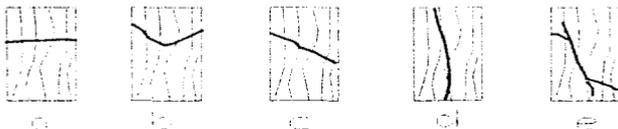


Fig. 18. Relación entre el ángulo de ruptura α y el ángulo de fricción interna ϕ .
 Los valores de (theta) observados para ser número de materiales incluyendo el hierro fundido, la piedra caliza, el ladrillo y el concreto, varían más o menos de 50 a 60° para las probetas de largo, suficiente para que puedan desarrollarse superficies normales de falla.

La madera exhibe, bajo carga compresiva, un comportamiento peculiar propio. Es cualquier cosa, más no un material isotrópico, y se compone de células formadas por crecimientos orgánicos que se alinean para formar una serie de tubos o columnas en la dirección de las fibras. Como resultado de esta estructura, el límite elástico es relativamente bajo, no existe un punto de falla o cedencia definido y se verifica una deformación permanente considerable antes de la falla. Estas propiedades varían según la orientación de la carga con respecto a la dirección de las fibras.



- (a) aplastamiento
- (b) grieta cuneiforme
- (c) corte
- (d) rajadura
- (e) corte y rajadura paralelos a la fibra

Fig. 19 Tipos de falla en la madera.

3.3 Ensayes de corte

3.3.1 Comportamiento de los materiales bajo el esfuerzo cortante

Un esfuerzo de corte es aquél que actúa paralelamente a un plano para distinguirlo de los esfuerzos tensivos y comprensivos que actúan normalmente a un plano. Las cargas que producen las condiciones de corte de interés principal en el ensaye de materiales, son las siguientes:

1.- Las resultantes de fuerzas paralelas, pero opuestas, actúan a través de los centroides de secciones espaciadas a distancias "infinitesimales" entre sí. Es concebible en tales casos que los esfuerzos de corte sobre las secciones sean uniformes y existan un estado de corte directo puro. Es posible acercarse a esta condición, pero nunca alcanzarla prácticamente.

2.- Las fuerzas opuestas aplicadas son paralelas, actúan normalmente a un eje longitudinal del cuerpo, pero están espaciadas a distancias finitas entre sí. Entonces, además de los esfuerzos cortantes producidos, se establecen esfuerzos flexionantes. En el caso de una viga rectangular sometida a cargas transversales, los esfuerzos cortantes sobre cualquier sección transversal varían en intensidad desde cero en las superficies superiores e inferiores de la viga hasta un máximo en el eje neutro.

3.- Las fuerzas aplicadas son paralelas y opuestas, pero no yacen en un plano que contenga el eje longitudinal del cuerpo; aquí se establece un par que produce una torsión alrededor de un eje longitudinal. Esta acción torcente de una sección de un cuerpo con respecto a una sección contigua es denominada *torsión*. Los esfuerzos cortantes de torsión sobre secciones transversales circulares varían desde cero en el eje de torsión hasta un máximo en las fibras extremas. Si no se presenta flexión alguna, existe "esfuerzo de corte puro".

En cualquier punto de un cuerpo esforzado, los esfuerzos de corte en cualquiera de dos direcciones mutuamente perpendiculares son iguales en magnitud. Si sobre algún par de planos en un punto, solamente esfuerzos de corte actúan, el material en ese punto se dice que está en "corte puro".

La condición de corte puro, la cual representa un bloque o dado elemental sobre el cual los esfuerzos están uniformemente distribuidos. Sobre todos los planos inclinados con respecto a los planos de corte máximo, esfuerzos tensivos o comprensivos actúan; y sobre planos mutuamente perpendiculares a 45° con los planos de corte máximo, los esfuerzos normales son iguales en magnitud a los máximos esfuerzos de corte. El corte inversamente puro es inducido por esfuerzos normales y opuestos iguales. La comprensión secundaria resultante del corte puro primario en placas delgadas pueda causar pandeo por corte.

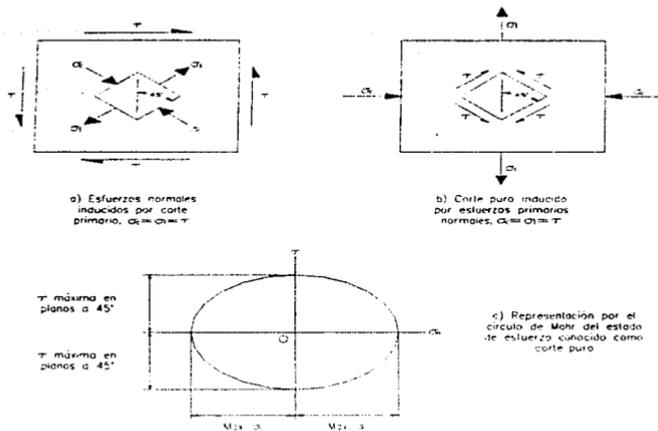


Fig. 2D Relación entre corte puro y los esfuerzos normales

Si un cuerpo es sometido a un esfuerzo tensivo o compresivo que actúe solamente en una dirección, los esfuerzos cortantes a 45° correspondientes tienen la mitad de la magnitud del esfuerzo directo aplicado. En el caso general, los máximos esfuerzos de corte equivalen a la mitad de la diferencia entre los esfuerzos principales máximo y mínimo, y actúan sobre planos inclinados a 45° con estos esfuerzos.

La deformación que acompaña al corte puede considerarse que proviene del esfuerzo de las delgadas tiras paralelas de un cuerpo por deslizarse una sobre otra. La deformación por corte, o "detrusión" es una función del cambio de ángulo entre los lados adyacentes de un bloque elemental al distorsionarse bajo esfuerzos cortantes.

El cambio total de ángulo se representa más convenientemente por medio de un diagrama, en el cual puede advertirse que la deformación por corte es la tangente de la distorsión angular. Sin embargo, dentro del rango de la resistencia elástica de los materiales usados para la construcción, las deformaciones por corte son pequeñas, y el ángulo comúnmente se expresa en radianes.

Por lo que respecta a los problemas prácticos del ensayo, las relaciones entre esfuerzo y deformación por corte son de interés, principalmente en conexión con la carga torsionante. En la teoría común de la torsión, se asume que las secciones planas permanecen así después de la torsión. La sección circular es la única que se ajusta a esta condición, de ahí que la teoría simple de la torsión no sea satisfactoriamente aplicable, en los cálculos prácticos para secciones no circulares, los resultados de la teoría de la torsión simple frecuentemente se usan en combinación con factores de corrección adecuados.

Varias relaciones de esfuerzo y deformación para piezas cilíndricas en torsión se ofrecen a continuación en términos de los siguientes símbolos:

T = Torque o momento de torsion

J = momento de inercia polar = $\pi^4 / 2$ para un círculo.

ϕ = deformación por corte

r = radio de una pieza cilíndrica de ensayo

r_i = radio interior de una pieza tubular de ensayo

L = distancia entre collarines del deformímetro

θ = ángulo de torsión medido en la distancia L

τ = esfuerzo cortante en la fibra extrema

E_s = módulo de rigidez o módulo de elasticidad en corte

De las relaciones geométricas entre los diversos elementos de una barra sometida a la torsión:

$$\phi = \frac{r\theta}{L}$$

Dentro del rango elástico toda la evidencia indica que las deformaciones por corte son proporcional a la distancia desde el eje de torsión; y ésta relación parece también ser válida aproximadamente arriba del límite proporcional.

Dentro del límite proporcional,

$$\tau = \phi E_s = \frac{r\theta}{L} E_s$$

El esfuerzo varía linealmente desde cero en el eje de torsión hasta un máximo en la fibra extrema y varía directamente según el ángulo de torsión.

Sumando los esfuerzos correspondientes a una sección transversal la relación entre el esfuerzo cortante en la fibra extrema y el torque aplicado puede encontrarse:

Para secciones sólidas:

$$r = \frac{Tr}{J} = \frac{2T}{\pi r^3}$$

Para secciones tubulares:

$$r = \frac{2Tr}{\pi(r^4 - r_i^4)}$$

Esta relación es llamada la fórmula de torsión y es aplicable solamente a las secciones circulares.

La expresión para el módulo de rigidez en términos del torque y del ángulo de torsión puede demostrarse que es:

$$E_s = \frac{TL}{J\theta} = \frac{2TL}{\pi r^4 \theta}$$

Puede demostrarse teóricamente que el módulo de rigidez o el módulo de elasticidad en corte para materiales homogéneos e isotrópicos es de aproximadamente un 40% del módulo de elasticidad en tensión.

La ductilidad en un ensayo de tensión, se determina comparando el largo final de la fibra L' al ocurrir la ruptura con el largo original de la misma tramo de calibración L . El valor de L' se computa conociendo L y r -tetha. La ductilidad se expresa como un porcentaje del alargamiento de la última fibra y es igual a $[(L'-L)/L] \times 100$.

3.3.2 La falla bajo el esfuerzo de corte

Si la resistencia de un material a la tensión es menor que su resistencia al corte, entonces la falla bajo una carga de corte, ocurre por la separación a lo largo de un plano que esté a 45° con el plano de corte máximo. Bajo carga torsionante, está resulta una fractura con superficie helicoidal. La relación entre la resistencia al corte y la resistencia a la tensión parece variar desde quizá 0.8 para los metales dúctiles hasta valores de aproximadamente 1.1 ó 1.3 para los quebradizos como el hierro fundido. La resistencia elástica al corte de los aceros dúctiles y semidúctiles parece estar muy cerca de 0.6 de la resistencia elástica de la tensión.

Así el efecto del cedimiento de las fibras superficiales, durante su etapa inicial de acción plástica, es embozado por la resistencia del resto de la sección. No es sino hasta que se ha efectuado un cedimiento considerable que algún efecto notorio resulta aparente con los instrumentos ordinariamente usados para medir el ángulo de torsión. Esta dificultad es contrarrestada mediante el uso de probetas tubulares de ensayo debidamente diseñados que puedan dar medidas más sensitivas de la resistencia elástica al corte, ya que todas las fibras sobrellevan aproximadamente el mismo esfuerzo. Sin embargo una lámina delgada, se sujeta al corte o un tubo delgado a torsión, antes de que la resistencia del corte del material pueda alcanzarse, la falla puede ocurrir por pandeo debido a los esfuerzos *comprensivos* que actúan a 45° de los planos de corte máximo. Así en probetas tubulares para pruebas de torsión, el grueso relativo de la pared debe ser mayor que algún valor crítico si la falla por carga ha de asegurarse.

En una barra sometida a carga torsionante sobre el límite proporcional, si se asume una variación rectilínea de la *deformación*, la *vanación real del esfuerzo* se asemeja a la indicada con la línea continua. Se acostumbra, sin embargo, para propósitos comparativos con materiales similares, computar un esfuerzo nominal de fibra extrema en la ruptura por medio de la fórmula de torsión ($T = Tr/J$), la cual da lo que se denomina el *módulo de ruptura en torsión*.

En algunos materiales como el concreto la resistencia a la ruptura por corte es una función no solamente de la resistencia al corte del material, sino también de la resistencia friccional al deslizamiento sobre la superficie de ruptura. Para tales materiales es necesario entonces evaluar ambos factores. Una relación entre ellos necesario total al esfuerzo del corte (Ley de Coulomb) es:

$$\tau = c + \sigma_n \mu = c + \sigma_n \tan \phi$$

Donde:

τ = resistencia al corte

c = resistencia al corte del material bajo carga no normal denominada cohesión

σ_n = esfuerzo normal sobre el plano de falla

μ = coeficiente de fricción

ϕ = ángulo de fricción interna

3.3.3 Objeto y aplicabilidad de los ensayos de corte

Los tipos de ensayo de corte de uso común son, de corte directo y el ensayo de torsión.

En el ensayo de corte directo ocasionalmente llamado ensayo de corte "transversal", usualmente se procede a sujetar o apoyar un prisma del material, de tal modo que los esfuerzos flexionantes se minimicen a través del plano a lo largo del cual la carga cortante se aplique.

El ensayo de corte transversal posee la limitación adicional de ser completamente inútil para la determinación de la resistencia elástica o del módulo de rigidez debido a la imposibilidad de medir las deformaciones

Para una representación más precisa de las propiedades del corte, se realiza el ensayo de torsión, empleando probetas, ya sean sólidas o huecas de sección circular. En ese ensayo, la probeta tendrá tal longitud que un deformímetro (llamado troplómetro en este tipo de ensayo) pueda acoplarse para coadyuvar a las determinaciones del límite proporcional y la resistencia de cedencia en esfuerzo, resiliencia al corte y la rigidez (el módulo de rigidez o módulo de elasticidad en corte), obteniéndose el segundo del ángulo de torsión y el torque aplicado

La última resistencia al corte o módulo de ruptura por corte se obtiene usualmente. La ductibilidad del material es determinada de la cantidad de torsión hasta la ruptura, la tenacidad está representada por la cantidad de torsión y la resistencia, y la uniformidad es indicada por el espaciamiento, la distribución y la apariencia de las líneas de torsión. Para la determinación exacta de la resistencia elástica, debe usarse una probeta tubular de ensayo.

El ensayo de torsión puede ser de utilidad especial en la investigación de secciones no circulares o de secciones circulares que posean varias irregularidades superficiales.

El método de torsión es inaplicable para determinaciones de la resistencia al corte de los materiales quebradizos, tales como el hierro fundido, ya que una probeta de él fallaría por tensión diagonal antes de que la resistencia al corte se alcanzará, aunque el ensayo de torsión ha sido aplicado al hierro fundido y al concreto para determinar otras propiedades del corte o la resistencia nominal total a la torsión.

Merece notarse que, en servicio, las piezas que están sometidas a un par son usualmente parte de máquinas y deben resistir carga de impacto y las inversiones del esfuerzo.

Ni los ensayos de corte directo ni los de corte por torsión han sido normalizados, excepto en el caso de los ensayos de corte directo de la madera y la piedra para la construcción. Raramente se les usa como ensayos de aceptación.

3.3.4 El ensayo de corte directo

Para el ensayo de corte directo de metales, usualmente se corta una barra en algún dispositivo que apriete una porción de la probeta mientras que la restante es sometida a carga por medio de dados adecuados.

Los dados y la herramienta de carga se hacen de acero templado para herramientas afiladas. Los ensayos de corte directo ordinariamente se hacen en máquinas de ensayo de compresión o tensión.

Ha sido empleada para ensayos de corte directo del ladrillo, del concreto, de la piedra para construcción y del hierro fundido, pero el uso de este tipo de ensayo de materiales quebradizos han sido casi totalmente abandonado.

En un ensayo de corte simple, la probeta debe extenderse suficientemente por debajo de la herramienta de carga E para evitar los esfuerzos de compresión altos. Asimismo, en el ensayo de corte doble, la probeta B deben empalmarse sobre el segundo dado D para evitar los altos esfuerzos opresivos. La velocidad del puente para aplicar la carga no debe exceder 0.05 pig por minuto para metales, piedra, y concreto; para madera, la velocidad normal del puente es de 0.024 pig por minuto.

En el ensayo de corte directo, el único valor crítico que puede observarse es la carga máxima P. Si A es el área sometida a la fuerza, entonces la resistencia promedio al corte es tomada simplemente como A/P. La forma y textura de la superficie fracturada debe ser reportada.

Debe tenerse cuidado de distinguir entre las fallas por corte puro y aquellas que puedan ocurrir como resultado de los esfuerzos flexionantes o de los esfuerzos diagonales por tensión.

3.4 El ensayo de torsión

Los criterios principales para la selección de la probeta de torsión parecen ser que las probetas deben ser de tal tamaño que permitan que las mediciones de deformación deseadas se logren con exactitud adecuada, y de tales proporciones que eliminen aquella porción de probeta sobre la cual se tomen las mediciones del efecto de los esfuerzos debidos a la sujeción de los extremos. Los extremos deben ser tales que puedan sujetarse y asegurarse sin desarrollar esfuerzos suficientemente localizados para causar la falla en las mordazas.

Para determinaciones de la resistencia a la cedencia cortante y del módulo de rigidez, una probeta hueca que posea una longitud de cuando menos 10 diámetros y una razón entre el diámetro y el grueso de pared de aproximadamente 8 a 10, debe preferirse para su sección reducida. Para razones mayores entre el diámetro y el grueso existe una tendencia a la ocurrencia de la falla por pandeo, debido a los esfuerzos comprensivos inclinados; esto afectaría apreciablemente el valor determinado para la resistencia a la cedencia. Las dimensiones reales de la probeta usada comúnmente se eligen de acuerdo con el tamaño y tipo de la máquina de ensayo disponible, así como el producto a ensayar.

Al realizar un ensayo de torsión en tubos, los extremos usualmente deben taparse para que la presión de las quijadas o tenazas de la máquina no induzca el colapso del tubo.

El ensayo de torsión de metales se realiza en una máquina especial, diseñada con este propósito. Un mecanismo propulsor adecuado mueve un mandril con mordazas dentadas y endurecidas, y el par aplicado es transmitido a través de la probeta a un mandril similar en el cabezal de medición lo cual acciona algún tipo de indicador del torque. Por un método, un sistema de palancas acciona una vigueta sobre la cual un contrapeso movible puede hacerse viajar; la vigueta está graduada en unidades de torque, digamos libras pulgadas. En algunas máquinas, el sistema de medición involucra un péndulo conectado a la manecilla de una carátula, la cual está graduada en libras pulgada; a medida que el par es transmitido a través de la probeta, el péndulo gira desde su posición de equilibrio vertical hasta que su momento estático contrarreste el torque aplicado.

Una capacidad de 100 000 lb-plg probablemente sea satisfactorio para casi todo el ensayo ordinario de material para barras, aunque se han diseñado máquinas que poseen una capacidad de 2 000 000 lb-plg.

Dispositivos para medir la deformación. Estos indicadores de torsión o trolómetros ordinariamente consisten en dos collannes sujetados a la probeta a una distancia o tramo de calibración de separación dados, con algún medio para medir el desplazamiento angular relativo de los collannes. En un tipo, un Vernier acoplado a un collarín se mueve alrededor de un círculo graduado acoplado al otro collarín, en otro tipo se acoplan espejos a los collannes, y las observaciones se hacen con telescopios y escalas.

La sección transversal de una probeta de torsión debe medirse hasta 1 parte en 1 000, dentro del límite proporcional del material, la velocidad del cabezal de torsión no debe exceder de aproximadamente 0.01 r.p.m. por plg de longitud de la probeta, aunque la velocidad puede aumentarse después de haberse alcanzado el punto de cedencia.

3.4.1 Observaciones de ensayo

Para los materiales que se rompen en el ensayo de corte o torsión, la ruptura en varillas sólida es plana y normal al eje de la pieza. Para los aceros dúctiles, la fractura es usualmente de textura sedosa, y el eje alrededor del cual el torcido final se verificó, puede usualmente observarse. Como las superficies de la ruptura pueden no ser lisas, las porciones exteriores, al rebasarse mutuamente, actúan como levas, rompiendo la pieza en la dirección de su longitud.

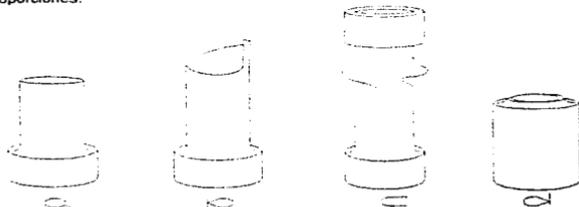
La ruptura de un material para el cual la resistencia a la tensión sea menor que la resistencia al corte ocurre por separación en tensión a lo largo de una superficie helicoidal. Este

tipo de ruptura ocurre cuando el hierro fundido o el concreto ordinario son sometidos a la torsión. La silueta de la fractura hace una revolución completa en la barra, quedando unidos los extremos de la hélice por una línea aproximadamente recta. El tipo de fractura helicoidal puede fácilmente obtenerse quebrando una pieza de gis en torsión con los dedos.

Las probetas tubulares de pared delgada de material dúctil que posean una sección reducida de mayor longitud que el diámetro fallan por pandeo, pero las que poseen una sección reducida corta fallan en torsión en una sección recta.

3.4.2 Determinaciones especiales e indirectas de las propiedades del corte

En las vigas de concreto reforzado, la falla puede ocurrir debido al agrietamiento causado por los esfuerzos diagonales tensivos. Como estos esfuerzos diagonales tensivos son causados por el corte, se acostumbra diseñar el refuerzo del alma sobre la base de los esfuerzos de corte admisibles. Los esfuerzos de corte admisibles se obtienen de un estudio de la falla de vigas de varias proporciones.



- (a) Barra sólida de material dúctil
- (b) Barra sólida de material quebradizo
- (c) Probeta tubular de material dúctil. Falla por pandeo.
- (d) Probeta tubular de material dúctil

Fig. 21 Tipos de falla en torsión.

3.5 Ensayes de flexión

3.5.1 Comportamiento de los materiales sometidos a la flexión

Si las fuerzas actúan sobre una pieza de material de tal manera que tiendan a inducir esfuerzos comprensivos sobre una parte de una sección transversal de la pieza y los esfuerzos tensivos sobre la parte restante, se dice que la pieza está en flexión.

La flexión puede también causarse por momentos o pares tales como, por ejemplo, los que pueden resultar de cargas excéntricas paralelas al eje longitudinal de una pieza.

En los ensayos para determinar el comportamiento de los materiales en flexión, la atención usualmente se limita a las vigas. Se asume que las cargas se aplican de modo que actúen en un plano de simetría, de modo que no ocurra torsión alguna y que las deflexiones sean paralelas al plano de las cargas. Se asume también que ninguna fuerza longitudinal es inducida por las cargas o los apoyos.

El efecto flexionante en cualquier sección se expresa como "momento flexionante" M , el cual es la suma de los momentos de todas las fuerzas que actúan hacia la izquierda (o la derecha) de la sección. Los esfuerzos inducidos por un momento flexionante pueden denominarse *esfuerzos flexionantes*. Para que exista equilibrio, la resultante de las fuerzas tensivas T , debe siempre ser igual a la resultante de las fuerzas comprensivas C . Las resultantes de los esfuerzos flexionantes en cualquier sección forman un par que es igual en magnitud al momento flexionante. Cuando no actúan ningunos otros esfuerzos que los flexionantes se dice que exige una condición de "flexión pura". La flexión pura se desarrolla bajo ciertas condiciones de carga, en el caso, la flexión va acompañada por el corte transversal. La acción flexionante de las vigas es frecuentemente denominada "flexión". El término *flexión* se refiere a ensayos flexionantes de vigas sometidas a cargas transversales.

Las variaciones del corte transversal total y del momento flexionante a lo largo de una viga son comúnmente representadas por diagramas de corte y de momento. Debe señalarse que la carga simétrica en dos puntos arroja una condición de flexión pura (momento constante) sobre la porción central del claro.

En una sección transversal de la viga, la línea a lo largo de la cual los esfuerzos flexionantes son cero es llamada el *eje neutro*. La superficie que contiene los ejes resultos de las secciones consecutivas es la *superficie neutra*. Sobre el lado de la viga en compresión, las "fibras" de la viga se acortan, y sobre el lado en tensión se estiran; así la viga se flexiona o "pandeo" en una dirección normal a la superficie neutra, tornándose cóncava del lado en compresión.

Ha quedado bien establecido por muchas observaciones que en la flexión pura las *deformaciones* son proporcionales a la distancia desde el eje neutro. Esta es llamada una condición de "flexión plana".

Si los esfuerzos son proporcionales a las deformaciones, la variación del esfuerzo a través de una sección es lineal.

Sumando los momentos de los esfuerzos alrededor del eje neutro, el momento de resistencia, dentro del límite proporcional, puede encontrarse en términos del esfuerzo sobre la fibra extrema:

$$M = \frac{\sigma I}{c} \text{ Formula de flexión}$$

Donde:

σ = esfuerzo sobre la fibra extrema

c = distancia del eje neutro de la fibra extrema

I = momento de inercia de la sección alrededor del eje neutro

En términos de las deformaciones en las fibras extremas, el momento puede expresarse como

$$M = \epsilon \frac{EI}{c}$$

ϵ = deformación en la fibra extrema por largo unitario de viga

Para flexión pura el momento también puede encontrarse por el cambio de pendiente en la viga:

$$M = EI \frac{\theta}{x} = \frac{EI}{\rho}$$

Donde:

θ = cambio de pendiente entre las dos secciones transversales

x = distancia entre las dos secciones transversales

ρ = radio de curvatura de la superficie neutra

La deflexión de una viga es el desplazamiento de un punto sobre la superficie neutra de una viga de su posición original bajo la acción de las fuerzas aplicadas. Dentro del límite proporcional, la deflexión debida a la flexión bajo un tipo de carga puede computarse del módulo de elasticidad del material y de las propiedades de la sección. Las deflexiones transversales para dos casos comunes son: La deflexión (flecha) central de una "viga simple".

La deflexión es una medida de la rigidez general de una viga dada y puede constatarse que es una función de la rigidez del material y de las proporciones de la pieza. Las mediciones de las deflexiones constituyen un medio para determinar el módulo de elasticidad del material en flexión. Si el módulo de elasticidad en tensión y compresión no es lo mismo, el módulo de elasticidad computado del ensayo de flexión tiende a ser intermedio entre los de tensión y compresión. Aún más, si hay esfuerzos cortantes transversales, el módulo de elasticidad en flexión tiende a ser ligeramente inferior al correspondiente al esfuerzo axial, ya que las deformaciones por corte tienden a aumentar una deflexión observada sobre la debida a las deformaciones en las fibras por sí solas.

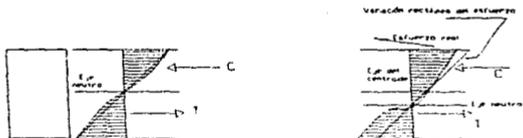


Fig. 22. Esfuerzo en las Fibras sobre el Límite Proporcional

Si la viga es de sección rectangular, el esfuerzo cortante llega a un máximo en el eje neutro y varía parabólicamente desde un máximo en el eje neutro hasta cero en las fibras extremas, el esfuerzo cortante máximo es $(3/2, V/A)$. Si actúan esfuerzos cortantes, una sección transversal plana, no permanece plana bajo carga. Las deflexiones debidas al corte puede computarse sumando las deformaciones por corte de los diversos elementos de una viga. En las vigas en que la razón entre la longitud y el peralte es de aproximadamente 10 o más, las deflexiones por corte son suficientemente pequeñas comparadas con las deflexiones por flexión para ser usualmente ignoradas en el ensaye práctico.

Amba del límite proporcional, los esfuerzos flexionantes no varían linealmente a través de una sección transversal, porque el esfuerzo no es proporcional a la deformación. La distribución de esfuerzo computada sobre la base de la fórmula de flexión (signa) = M/I está indicada por la línea intermitente. Los esfuerzos rectilíneos en las fibras extremas, computados basándose en esta fórmula puede advertirse que son mayores que los máximos esfuerzos reales en las fibras.

Si el material no posee las mismas características de esfuerzo y deformación en tensión que en compresión, el eje neutro debe desplazarse hacia el lado más rígido de la viga para mantener la igualdad de los resultantes de las fuerzas tensivas y compresivas. En este caso el esfuerzo de las fibras computadas por la fórmula de flexión es menor que el verdadero esfuerzo en las fibras sobre el lado menos rígido.

Si la viga posee una sección transversal tal como la mostrada en la fig. 22, los esfuerzos son bajos más cerca del eje centroidal. Este lado de la viga es de hecho, más fuerte debido de la concentración del material para resistir el esfuerzo. La cedencia de las fibras más intensamente esforzadas en el lado opuesto, causa entonces un desplazamiento del eje neutro hacia el lado más fuerte, dando una distribución de esfuerzos similar a la mostrada.

3.5.2 Fallas por flexión

La viga puede fallar por cedencia de las fibras extremas. Cuando el punto de cedencia es alcanzado en las fibras extremas, la deflexión de la viga aumenta más rápidamente con respecto a un incremento de carga; y si la viga tiene una sección gruesa y fuerte o está firmemente empotrada de tal modo que no pueda torcerse o pandearse, la falla se verifica con un pandeo gradual que finalmente se torna tan grande que la utilidad de la viga como miembro sustentante queda destruida.

El pandeo, el cual generalmente ocurre en dirección lateral, puede deberse ya sea a la causa primaria o secundaria de la falla. En un viga en la cual el esfuerzo flexionante excesivo sea la causa primaria de la falla y en la cual la viga no esté firmemente sostenida contra el pandeo lateral, el sobreesfuerzo puede ser rápidamente seguido por el colapso de la viga debido al pandeo lateral, ya que la estabilidad lateral de la viga es considerablemente disminuida si sus fibras extremas son esforzadas hasta el punto de la falla de la viga, caso en el cual el esfuerzo en las fibras computado, en general, no alcanza la resistencia hasta el punto de cedencia del material antes de que el pandeo ocurra. El pandeo frecuentemente limita la resistencia de las vigas angostas de mucho peralte, especialmente de las de sección I con patines de tensión y compresión conectadas por una alma delgada.

La falla de los miembros de alma delgada, como un vigueta I, puede ocurrir debido a los esfuerzos cortantes excesivos en el alma o por el pandeo del alma bajo los esfuerzos comprensivos diagonales que siempre acompañan a los esfuerzos cortantes.

El peligro de la falla en el alma como una causa primaria de la falla de la viga existe, en general, solamente para las vigas cortas con alma delgada.

En aquellas partes de vigas adyacentes a los lados de apoyo que transmiten las cargas concentradas o las reacciones a las vigas, pueden establecerse esfuerzos locales en aquella parte del alma más cercana a un dado de apoyo puede tomarse excesivo.

La falla de las vigas de material quebradizo como el hierro fundido y el concreto simple, siempre ocurre por ruptura súbita. Sin embargo, cuando se acerca el momento de la falla, el eje neutro se desplaza hacia el canto en la compresión y tiende así a reforzar la viga, la falla finalmente ocurre en las fibras tensadas porque la resistencia a la tensión de estos materiales es únicamente una fracción de la resistencia a la compresión.

La falla de las vigas de concreto armado puede ser el resultado de la así llamada *falla del acero* debido a los esfuerzos sobre el punto de cedencia resultante en grietas verticales sobre el lado tensado de la viga; la falla del concreto en compresión en las fibras en compresión más alejadas; y la falla de concreto por la tensión diagonal primariamente debida a los esfuerzos cortantes excesivos, que resultan en la deformación de grietas que descienden diagonalmente hacia las reacciones, tomándose frecuentemente horizontales justamente arriba del armado principal en las vigas de claro simple.

3.5.3 Objeto y aplicabilidad de los ensayos de flexión

Los ensayos flexionantes de vigas usualmente se hacen para determinar la resistencia y la rigidez a la flexión; ocasionalmente se hacen para obtener una imagen más o menos completa de la distribución del esfuerzo en un miembro en flexión. Los ensayos de vigas también ofrecen un medio para determinar la resistencia y la tenacidad de los materiales en flexión.

Bajo la designación general de resistencia se pueden incluir el límite proporcional, la resistencia al cedimiento, y el módulo de ruptura. Estas propiedades pueden determinarse con la mira de establecer con factores de reducción apropiados, esfuerzos flexionantes admisibles para utilizarse simplemente como un criterio de calidad en los ensayos de control.

La rigidez de un material puede determinarse de un ensayo de flexión en el cual la carga y la deflexión se observan. El módulo de elasticidad para el material en flexión se computa

mediante el uso de una fórmula de deflexión apropiada. El valor de módulo de elasticidad puede entonces usarse para computar la deflexión elástica de otro tamaño, forma o carga, aunque algún error puede quedar involucrado debido a la desestimación de las deflexiones por esfuerzo, las cuales son de importancia en las vigas cortas de gran peralte, las desviaciones de la relación rectilínea entre el esfuerzo y la deformación como se expresa en la ley de Hooke, y la falta de uniformidad del material.

Como las cargas requeridas para causar la falla pueden ser relativamente pequeñas y fáciles de aplicar, los ensayos de flexión pueden frecuentemente hacerse con aparatos simples y baratos. Debido a que las deflexiones de un ensayo de flexión equivalen a muchas veces las deformaciones de un ensayo de tensión, una determinación razonable de la rigidez o resistencia se puede hacer con instrumentos menos sensitivos y menos caros que los requeridos para ensayos de tensión. Por eso es que el ensayo de flexión es frecuentemente usado como un ensayo de control para materiales quebradizos, notoriamente el hierro fundido y el concreto.

Para el alambre y las láminas metálicas ocasionalmente se usa un ensayo de flexión simple como una medida arbitraria de las flexibilidad relativa. Para los materiales dúctiles en forma de carillas, tales como las barras de refuerzo para el concreto, un ensayo de doblado en frío se usa para averiguar si la varilla puede o no doblarse bruscamente sin rupturarse y sirve de ensayo de aceptación con respecto a esta forma de ductibilidad.

3.5.4 Probetas para ensayos de flexión

Para determinar el módulo de ruptura para un material dado, la viga bajo ensayo debe proporcionarse de tal manera que no falle por corte o deflexión lateral antes de alcanzar su última resistencia a la flexión. Para producir una falla por flexión, la probeta no debe ser demasiada corta con respecto al peralte de la viga, e inversamente, si se desea la falla por esfuerzo cortante, el claro no debe ser demasiada largo. Los valores de $L = 6d$ a $L = 12d$ (dependiendo el valor real del material, de la forma de la viga y del tipo de cargado) en que L = largo y d = peralte, sirven como línea delimitante aproximada entre las vigas cortas de mucho peralte que fallan por corte y las largas de poco peralte que fallan en las fibras extremas.

Las probetas de hierro fundido son barras cilíndricas, vaciadas por separado, pero en moldes de arena de las mismas condiciones y tomados del mismo ensol que los vaciados que representan. Existen tres tamaños comunes de barras de ensayo; ellas son ensayadas como vigas simples bajo carga central con claros que dependen del tamaño de la barra.

El ensayo de vigas de concreto simple de sección rectangular demandan carga en los tercios y la mitad del claro sobre un claro simple. El tamaño de la viga no se especifica, pero para agregado hasta 2¼ plg de tamaño máximo, se han usado secciones de 6 por 8 plg y 8 por 8 plg. Las vigas se ensayan sobre un claro 3 veces el peralte de la viga.

Los ladrillos para construcción son aproximadamente de un tamaño 2 X 4 X 8 plg y se ensayan acostados sobre un claro de 7 plg bajo carga central.

Las vigas de ensayo normales de piezas pequeñas y limpias de madera son de 2 x 2 x 30 plg de tamaño y se ensayan sobre un claro de 28 plg bajo carga central. La madera en tamaños estructurales frecuentemente se ensaya bajo carga en los tercios de un claro de 15 pies; los tamaños comunes de las vigas de madera grandes de ensayo son de 16 pies de largo con secciones transversales nominales de 6 x 12 plg u 8 x 16 plg.

3.5.5 Aparatos para ensayos de flexión

Los principales requerimientos de los bloques de apoyo y cargas para ensayos de vigas son los siguientes:

- 1.- Debe tener una forma tal que permita el uso de un claro de largo definido y conocido.
- 2.- Las áreas de contacto con el material bajo ensaye deben ser tales que las concentraciones de esfuerzo indebidamente altas, no ocurran.
- 3.- Deben haber margen para algún ajuste longitudinal de la posición de los apoyos de modo que la restricción longitudinal no pueda desarrollarse a medida que la carga progresa.
- 4.- Debe haber margen para algún ajuste lateral rotativo para acomodar las vigas que estén ligeramente torcidas de uno al otro extremo, de modo que no se inducirán esfuerzos torsionantes.
- 5.- El arreglo de las partes debe ser estable bajo carga.

Muchos ensayos de flexión se realizan en máquinas de ensaye universales, con los apoyos colocados sobre la base o una extensión de ella y el bloque de carga colocado bajo el cabezal móvil. Sin embargo, para los ensayos de control de algunos materiales (por ejemplo, ensayos de fundición del hierro fundido y ensayos de campo del cemento), frecuentemente se emplean máquinas especiales de operación manual.

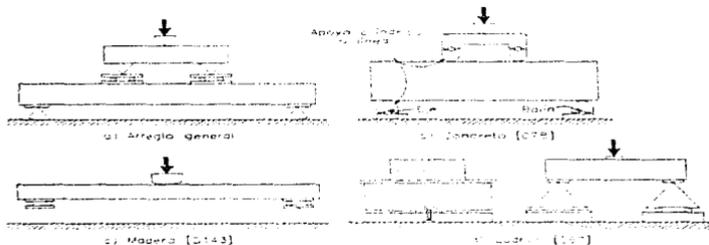


Fig. 23 Aspectos principales de los dispositivos de apoyo para ensayos de vigas que indican el margen para ajuste lateral y rotativo.

Los aparatos para medir la deflexión (flecha) deben diseñarse de tal modo que el aplastamiento en los apoyos, el asentamiento de los apoyos y la deformación de los bloques de apoyo y carga o de las partes de la máquina, no introduzcan errores serios en los resultados. Un método para evitar estas fuentes de errores consiste en medir las deflexiones con referencia a puntos sobre el eje neutro amba de los apoyos.

Para determinar las deformaciones de las fibras, un deformómetro superficial, calibradores con alambre de resistencia SR-4 o un calibrador de deformación portátil puede usarse para medir las deformaciones a lo largo de las líneas de calibración deseadas, o un dispositivo especial puede

usarse para indicar la rotación relativa de las secciones transversales planas a alguna distancia de separación dada.

Los deflectómetros deben diseñarse de modo que no se dañen por falla de la pieza de ensaye, o deben tomarse precauciones para retirarlos con bastante anterioridad a la ruptura final.

Las dimensiones de las probetas de hierro fundido se miden hasta el 0.001 de plg más cercano, de los de madera y concreto hasta el 0.01 de plg más cercano. Los bloques de apoyo y carga se indican con un grado de exactitud razonable, digamos 0.2% del largo del claro. El montaje de apoyos y probeta debe colocarse centralmente en la máquina de ensaye y debe revisarse para cerciorarse de que estén debidamente alineados y puedan funcionar según se desee. Los deflectómetros y los deformímetros deben ubicarse cuidadosamente y revisarse para cerciorarse de que operen satisfactoriamente y se les ajusta para funciones sobre el rango requerido.

Las vigas de concreto pueden cargarse rápidamente según cualquier velocidad deseada hasta un 50 % de la carga de ruptura, después de la cual, las cargas deben ser aplicadas a un grado tal que las fibras extremas se esfuercen a 150 lb/plg² o menos por min. Para piezas de madera pequeñas y limpias la carga debe aplicarse durante todo el ensaye a una velocidad de movimiento del puente móvil de 0.1 plg/min; esto corresponde al arreglo de ensaye normalizado para probetas pequeñas y limpias a una velocidad de carga de unas 400 lb por minuto.

3.5.5 Observaciones de ensaye

Las condiciones bajo las cuales el módulo de ruptura se determina (tipo de probeta, longitud del claro, tipo y velocidad de carga, etc.) deben siempre registrarse, ya que ellos afectan marcadamente los resultados.

Al computar el módulo de elasticidad de los datos de carga y de deflexión, el procedimiento más simple consiste en trazar un diagrama de carga y deflexión y de la pendiente del diagrama computar las cargas y la deflexión para su sustitución en la fórmula de deflexión pertinente



Fig. 24. Varias modos de falla de una viga de madera

La fractura de materiales tales como el hierro fundido y el concreto es definida, y usualmente ocurre sobre una superficie aproximadamente plana en una sección de momento máximo. La textura de la fractura puede tener significación y debe consignarse. En los ensayos de

vigas que no fallan por ruptura súbita, las indicaciones de la inminencia de la falla, tales como grietas, cedencia localizada, pandeo, etc. deben observarse cuidadosamente. Las causas de las fallas primarias y secundarias de las vigas estructurales deben advertirse.

3.5.7 Efecto de las variables importantes en los ensayos de flexión

En los ensayos de flexión de materiales quebradizos, algunos de los factores más importantes que afectan los resultados son el tipo y la velocidad de cargas, al largo del claro, y las dimensiones seccional-transversales de la viga.

El efecto del tipo de carga lo ilustra los resultados de numerosos ensayos de concreto los cuales han indicado que las magnitudes relativas del módulo de ruptura para tres tipos comunes de cargado son los siguientes.

1.- En un claro simple, el máximo valor del módulo de ruptura se obtiene de carga central. Los valores computados sobre la base del momento al centro del claro tienden a ser un poco mayores (aproximadamente 7%) que los valores computados sobre la base del momento en la sección de ruptura.

2.- La carga en voladizo tiende a arrojarse valores ligeramente más altos que la carga central sobre un claro simple, aunque promedialmente la diferencia no es grande.

3.- La carga en los tercios sobre un claro simple arroja resultados invariablemente un poco menores que la carga central (en términos generales entre 10 y 25%). Parece razonable suponer que como la resistencia del material varía un tanto a todo el largo de la viga, en la carga en los tercios, la sección más débil, se busca.

Los ensayos tanto del hierro fundido como del concreto han demostrado que para vigas con la misma sección transversal, mientras más corta longitud de claro, mayor módulo de ruptura.

La forma de la sección transversal de una viga puede afectar apreciablemente la resistencia de la viga. Los ensayos de vigas de hierro fundido son de una variedad de formas; pero de aproximadamente la misma área seccional demuestran, que en general el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad son más bajos para vigas que tengan una proporción relativamente mayor del área seccional concentrada cerca de las fibras extremas, como en el caso de una sección I.

Los ensayos tanto del hierro fundido del concreto indican resistencias menores para vigas de dimensiones seccionales mayores.

CAPITULO IV TECNICAS DE INTERPRETACION DE RESULTADOS

4.1 Análisis y Presentación de los Datos.

En ingeniería, ninguno de los datos son de valor mientras no se les ha dado una forma que pueda fácilmente entenderse y utilizarse.

Algunas de las consideraciones que pueden mencionarse en conexión con el problema del análisis de los datos son las siguientes:

1.- *Reducción de los datos "Burdos".* Como la mayoría de los datos poseen significados solamente en comparación con datos similares, las medidas cuantitativas obtenidas de un Ensayo se reducen a valores cuyas unidades sean aceptables como base de comparación; así las cargas se reducen a esfuerzos, digamos, en libras por pulgada cuadrada, y las deformaciones a deformaciones unitarias. Aún más, la confiabilidad de los datos es condicionada por los errores de medición. Al reducir los datos, deben aplicarse las correcciones de los errores sistemáticos, y para poder expresar los datos finales en el número de los errores accidentales inherentes a las mediciones y el efecto de esos errores sobre la precisión de los valores reducidos.

2.- *Resumen de los datos.* Las operaciones en gran escala pueden acumularse masas de cifras que sean tan numerosas y variables que resulte prácticamente imposible para la mente digerirlos y evaluarlos en forma suelta. Entonces pueden aprovecharse los bien conocidos métodos estadísticos para resumir los datos.

3.- *Estudio de las relaciones entre las variables.* Después de que los datos han sido reducidos y resumidos a una forma manejable, el paso final en el análisis usualmente consiste en buscar o desarrollar relaciones entre las variables involucradas o entre los datos obtenidos de un Ensayo particular y los previamente obtenidos o alguna teoría. Los dispositivos comunes empleados al utilizar las relaciones son las tabulaciones, las gráficas, las gráficas simbólicas y los diagramas de correlación.

Algunos aspectos del problema de la presentación de los datos son:

- 1.- La manera en que la información se resume. Tablas, figuras y la palabra escrita puede usarse.
- 2.- La índole, el alcance y la estructuración del informe. Los datos de ingeniería son transmitidos en forma de informes o documentos técnicos.

4.1.1 Variaciones de los Datos

Prácticamente todos los datos derivados de los Ensayos son susceptibles de variar. Después de que las mediciones han sido corregidas por los efectos de los errores sistemáticos, usualmente se advierte que las variaciones de las mediciones ajustadas o corregidas siguen una distribución por azar.

4.1.2 Agrupamiento de los Datos

El primer paso de un análisis involucra el agrupamiento de los datos. Cuando el momento de ocurrencia es importante, ocasionalmente se usa una secuencia cronológica y los datos se presentan en forma de serie de tiempo.

La aplicación de los métodos y criterios estadísticos a la gráfica de control de calidad de productos manufacturados por medio de la carta de control es de interés y valor considerables en conexión con el problema de la inspección.

Algunos datos pueden requerir agrupamiento geográfico, pero el agrupamiento de la mayoría de los datos en el ensayo de materiales se rige por la magnitud. El arreglo simétrico de los datos de acuerdo con la magnitud resulta en lo que se conoce técnicamente como "distribución de frecuencias". Ocasionalmente la última serie se considera como dividida en dos tipos, una consistente en n mediciones de una característica dada de n piezas diferentes y el otro de n mediciones de una característica dada de una sola pieza. Ambos tipos consisten de datos homogéneos. Para exponerlo en lenguaje estadístico, provienen de una población madre, y cada uno no constituye una constante de valor único sino más bien una función de la distribución de frecuencias.

En el ensayo de materiales la exactitud de las máquinas, los deformímetros, los calibradores y otros dispositivos de medición usualmente se mantienen dentro de límites conocidos, y las variaciones de las mediciones debidas al paralaje, el movimiento perdido y los efectos de la inercia se limitan a valores mínimos mediante el diseño y uso apropiado. Aún más, estos límites (errores) son pequeños comparados con las variaciones usuales de las medidas de propiedad de muestra a muestra.

La primera operación realizada sobre los datos brutos consisten en arreglar los valores de acuerdo con la magnitud, usualmente en orden ascendente. Esto es ocasionalmente un arreglo o una distribución de frecuencias agrupadas. Simplemente por inspección, pueden elegirse los valores mínimo y máximo, y por medio de una computación simple, el valor medio y el rango puedan determinarse.

En lugar de un agrupamiento basado en el número de partes como el descnto, las subdivisiones pueden basarse en la variable a medir. Estos grupos son ocasionalmente denominados células a intervalos de clase o paso.

Cuando hay una gran número de valores, se recomienda de 13 a 20 intervalos de clase. Demasiados intervalos pueden amorar una distribución irregular. Utilizando intervalos mayores, la apariencia de la distribución frecuentemente pueden mejorarse. Cuando el número total de piezas es menor de 25, tal presentación es de poco valor.

En la presentación gráfica usual las frecuencias, reales o relativas, se trenzan como ordenadas a una escala aritmética sobre la línea central de cada intervalo. Cuando los puntos sucesivos trazados son conectados por líneas rectas, la grafica se denomina polígono de frecuencias. Un diseño diferente resaltaría al trazar una línea gruesa o barra a lo largo de la línea central de cada intervalo desde la base hasta los puntos trazados. El diagrama es entonces conocido como gráfica de barras de frecuencia. Si en lugar de rellenar las barras se les deja clara, el diagrama es designado histograma de frecuencias. Todas estas formas diferentes se usan extensamente.

Como el diagrama de frecuencias es meramente una gráfica de la tabulación de frecuencias agrupadas, no puede ofrecer más información que la tabulación misma, aunque ocasionalmente es ventajoso mostrar las relaciones en forma gráfica.

4.2 Tendencia Central

Una medida de la tendencia central, o la tendencia a agruparse alrededor de un valor central, es denominada un *promedio* que significa resumir los datos localizando este valor típico. Los promedios más significativos son la media aritmética, la mediana, el modo, la media geométrica y la media armónica.

La media aritmética es la más extensamente usada de todos los criterios de tendencia central. Constituye el promedio del lenguaje ordinario. El símbolo usual es \bar{X} (testada), y la fórmula frecuentemente se escribe

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

la cual es idéntica a

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n}$$

La media aritmética es un promedio calculado (contrastado con la mediana) y es afectada por cada valor pero muy distorsionada por los inusualmente altos valores de los extremos.

La mediana es la magnitud del valor intermedio de un grupo. En una distribución en que los valores centrales estén estrechamente agrupados, la media resulta típica de los datos puesto que no resulta afectada por los valores terminales usuales.

El modo es el valor que ocurre más frecuentemente. En una distribución de frecuencia ideal el valor del modo se localiza por medio de la mínima o más alta ordenada de frecuencia.

Las medias geométricas y armónicas raramente se usan en conexión con los datos provenientes del ensayo de materiales.

4.3 Dispersión

Una inspección del diagrama de frecuencias proveerá una indicación cualitativa de una característica importante -la dispersión, dispersión o variación alrededor del valor promedio-.

Las diferencias entre un promedio y los diversos elementos se llaman desviaciones, y la

$$\text{Desviación promedio} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n}$$

La cantidad $(X_i - \bar{X})$ se toma aquí como el valor absoluto de una desviación ignorando los signos. Si se usara la mediana, la desviación promedio siempre sería menor que al usar la media aritmética (\bar{X}) .

Quizás la medida de dispersión más generalmente usada es la *desviación estándar*, la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de las desviaciones de los números de su promedio \bar{X} . La ecuación en su forma más general:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n} - \bar{X}^2}$$

4.4 Asimetría

Cuando una distribución de frecuencias difiere de una forma normal teórica, se dice que es torcida o asimétrica. Las medidas absolutas y/o relativas de esta falta de simetría pueden basarse en los valores o ubicaciones de las diversas medidas de las tendencias centrales, todas las cuales son idénticas para las distribuciones simétricas. La simétrica naturalmente se mide alrededor del punto alto del polígono de frecuencias el valor de modo. La ubicación relativa de la media aritmética, como resulta afectada por la magnitud de los valores extremos, brinda un excelente criterio del *factor de asimetría k* ya sea en forma simple

$$k = \text{mediana} - \text{modo desviación estándar}$$

o una forma alterna que arroja un valor más exacto

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n\sigma^3}$$

Para curvas simétricas k es obviamente cero.

4.5 Resúmenes Estadísticos

En la presentación de los datos de ensayo de materiales mismos la información esencial está generalmente contenida en cuatro estadísticas, a saber, el número de valores n , la media aritmética \bar{X} , la desviación estándar (sigma), y el coeficiente de variación v . En general, las medidas significativas de la asimetría no pueden obtenerse cuando $n < 250$, y en muchos casos un polígono de frecuencia gráfico dará suficiente información acerca de esta propiedad. Ocasionalmente la función p , la cual da el porcentaje fuera de cierto límite como la fracción defectiva, es de importancia. Sin embargo, es obvio que ninguna estadística puede representar por sí sola una imagen completa de la manera en que los datos originales se distribuyeron; de ahí que, aquello a usar dependen del propósito de la investigación y el uso que se vaya a hacer de los resultados de los Ensayos.

4.6 Gráficas de Control

Resulta prácticamente imposible lograr un valor dado de una calidad en cada artículo manufacturado sucesivo porque la calidad es una variable y el cambio de su magnitud es una distribución de frecuencias.

La variación de la magnitud de alguna estadística de una propiedad mensurable tal como la resistencia a la tensión puede usarse como un criterio de calidad. Los criterios más frecuentemente usados son la media aritmética, la desviación normal y el rango.

Los valores de una función de calidad dada, tal como la media aritmética de la resistencia a la tensión de muestras sucesivas contenida cada una un número igual de valores, se registran como ordenadas contra una escala de abscisa que dé la secuencia numérica de las muestras aumentando de la manera acostumbrada de izquierda a derecha.

La gráfica de control presenta los datos de tal modo que su consistencia y regularidad puedan verse de golpe.

Los límites de tres desviaciones normales varían según el número de valores de cada muestra, siendo mayores es decir, alejados del valor central para los números pequeños. Las fórmulas y los coeficientes para la computación de los límites de control, cuando las muestras contienen más valores, también están disponibles en muchos textos sobre estadística.

Cuando la gráfica de control se usa en conexión con un estándar, los límites se establecen con respecto al valor especificado, pero si no se dan ningunos estándares, los límites se determinan sobre la base de los mismos datos a medida que se acumulan. En ambos casos la ubicación de los puntos derivados fuera de los límites establecidos se toma como una indicación de la existencia de un factor causalivo.

4.7 Correlación

La técnica estadística conocida como correlación tiene un uso relativamente limitado en el ensaye de materiales a pesar de su amplia adopción en otros campos y su prominencia en las publicaciones relacionadas con la estadística. Sin embargo, los elementos del método son utilizados por los ingenieros, muchos de quienes no se preocupan por los términos estadísticos comúnmente usados aplicados a los dispositivos empleados para expresar relaciones simples. Para poder estudiar una relación de un grupo de adiciones aprendidas, el procedimiento obvio sería la construcción de una gráfica con ejes aritméticos rectangulares. Esto se conoce como *diagrama de dispersión*, y la línea que representa el mejor ajuste es la *línea de regresión*; si la línea fuera recta, su forma general sería $Y = mx + b$, donde m sería el *coeficiente de regresión*. Si todos los puntos quedaran sobre la línea de regresión, es decir, si no hubiera dispersión o variación normal a la línea, la correlación sería perfecta y el *coeficiente de correlación* sería la unidad, esto es, 1, dependiendo el signo de la pendiente de la línea. Para una línea de regresión recta una gran dispersión disminuiría el coeficiente de correlación. La letra r se usa para designar el coeficiente de correlación lineal simple y ocasionalmente es denominado coeficiente de Pearson o *Pearsonian*. Existen procedimientos apropiados para computar la ubicación de la línea de regresión, tal como el método de los cuadrados mínimos, el cual convierte los cuadrados de las desviaciones de los puntos de la línea en un mínimo. El procedimiento general consiste en hacer un croquis a mano libre de las estadísticas anteriormente mencionadas.

Los diagramas de dispersión bien conocidos en el ensaye de materiales son los de resistencia-humedad y resistencia-densidad para la madera y la relación entre la resistencia y la dureza para el acero.

El último es probablemente el más extensamente usado en la labor de inspección y control y dondequiera que los Ensayes destructivos no resulten factibles. La resistencia usualmente se traza sobre el eje Y, y la dureza, la variable independiente, sobre el eje X. Las líneas gruesas

discontinuas igualmente espaciadas a ambos lados de la línea de regresión pueden colocarse de modo tal que indiquen cualesquiera de probabilidades deseados.

En la distribución de frecuencias indica a la derecha, el área libre es igual a la mostrada sombreada, siendo cada una igual a la mitad del total. El polígono de frecuencias indica, sin embargo, que la desviación (error) más probable es de cero, o, expresándolo de otra manera, la resistencia más probable, indica por H, es el valor central S (modo), pero debe recordarse que la dureza de un probeta dada es a su vez susceptible a errores de medición.

4.8 Errores

El criterio de tendencia central de una serie de mediciones de cantidades semejantes, las cuales difieran solamente debido a errores accidentales, se toma como la media aritmética, la cual es el más probable valor de las mediciones. En la teoría de los errores, las desviaciones del medio usualmente se denominan "residuos".

Para propósitos comparativos, el error relativo o razón de precisión comúnmente se toma como la relación entre el error probable y el valor de la cantidad medida, expresada como un porcentaje; esto corresponde a un coeficiente de variación.

El error probable de una cantidad calculada de la combinación de varias cantidades independientemente medidas deriva de la teoría de los cuadrados mínimos. Si $u = f(x, y, z, \dots)$ y Ru es el error probable de una cantidad u , Rz de la cantidad z , etc., entonces

$$Ru^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} Rz \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} Ry \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} Rz \right)^2 + \dots$$

Esto es aplicable a varios casos específicos como sigue:

1.- Productos u de x y una constante C : $Ru = CRz$

2.- Área de un círculo, u , del diámetro medido x

$$Ru = \sqrt{\left[\frac{\partial (\pi x^2)}{\partial x} Rz \right]^2} = \frac{\pi D}{2} Rz$$

3.- Suma u de cantidades semejantes x, y, z, \dots

$$Ru = \sqrt{Rz^2 + Ry^2 + Rz^2 + \dots}$$

Si el error probable de cada cantidad es el mismo, donde n es el número de cantidades.

$$Ru = Rz \sqrt{n}$$

4.- El módulo de elasticidad E de las mediciones de P , la carga aplicada; L , el tramo de calibración; A , el área transversal seccional; y e la deformación.

$$R_E = \sqrt{\left(R_P \frac{L}{Ae} \right)^2 + \left(R_L \frac{P}{Ae} \right)^2 + \left(R_A \frac{-PL}{A^2 e} \right)^2 + \left(R_e \frac{-PL}{Ae^2} \right)^2}$$

El error relativo puede usarse en lugar del error probable en las ecuaciones anteriores.

4.9 Informes

En términos generales un informe debe planearse para satisfacer las necesidades del individuo para quien se elabore. Debe tener un significado claro y una forma legible. Debe concederse atención a el formato o la mecánica de su estructuración, es decir, el método de reproducción, clase de tipo y tamaño de página; el estilo y la composición; y la manera en que los datos se presentan.

4.10 Tablas

La presentación del material, de hecho, en forma tabular economiza espacio y facilita la comprensión del alcance y de rango así como la significación de los datos. Frecuentemente más información puede condensarse en una tabla que la que puede mostrarse en una gráfica o un diagrama, y ya sea que se usen en el texto o en un apéndice, las tablas deben llevar títulos adecuados y claramente marcados, preferentemente tan breves que puedan captarse a primera vista. Los encabezados columnares deben ir completos y contener las unidades para los valores de cada tira o columna; estas unidades no deben incorporarse a los conceptos del cuerpo de la tabla. En las tablas largas, la legibilidad se aumenta agrupando las líneas, ya sea mediante el uso de líneas horizontales divisorias o aumentando los espacios entre cada tercera o quinta línea.

4.11 Figuras

Las ilustraciones en conexión con un texto acompañante se llaman figuras. En los informes sobre Ensayos de materiales estas figuras son usualmente fotografías reales de tales objetos como máquinas de ensaye, instrumentos, aparatos y probetas u originales de dibujos lineales, o alguna reproducción directa como una copia heliográfica o fotostática. En el último caso el tamaño de la reproducción puede ser mayor o menor que el original y el tamaño de los letreros y el grueso de la línea en el original deben proporcionarse de acuerdo con cualquier cambio previsto en el tamaño de la reproducción para hacerlo claro y fácilmente legible.

Los dibujos lineales más generalmente usados en los informes sobre el ensaye de materiales, por lo común, se denominan gráficas, diagramas o láminas de curvas, aunque el *diagrama* de designación frecuentemente se emplea como en este texto, por ejemplo, los "diagramas de esfuerzo y deformación".

La elección de las escalas depende del rango de los datos y del propósito de la gráfica.

La escala exacta debe elegirse de modo que la división más pequeña sea alguna parte simple de la escala y no una incómoda parte fraccionaria. Las escalas bien elegidas hacen que las líneas del papel para cartas coadyuven a conferir legibilidad a los valores de puntos tomados al azar en una curva.

Los esfuerzos usualmente se indican sobre el eje Y como ordenadas y las deformaciones y deflexiones sobre el eje X como abscisas.

Si todo el dibujo es especialmente preparado, las líneas cuadrículaes a tinta, no atraviesan ningunos símbolos o letreros y, por lo general, sólo se indican las líneas principales, correspondientes a las líneas gruesas del papel, preparado para gráficas.

Como el propósito de las ilustraciones es coadyuvar a la presentación de la información, la cuestión de la apariencia y claridad debe recibir atención especial en la preparación de diagramas y gráficas.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

En la ingeniería es necesario conocer las características de los materiales, para lo cual se necesita llevar a cabo procedimientos adecuados según sean las condiciones de carga que regirán durante la vida útil de un material o elemento.

Para la determinación de las características de los materiales se requiere de un proceso de instrumentación adecuado, esto nos permitirá no tener errores que afecten las características de la muestra y de las decisiones que a su vez se tomen al final de una serie de ensayos. En la instrumentación existen conceptos que se deben de tomar en cuenta como son exactitud, precisión, objetivos y alcances del ensayo, ya que esto nos permitirá obtener resultados más representativos del comportamiento de los materiales ante diferentes estados de esfuerzo.

En el ensayo de los materiales existen conceptos que tienen una estrecha relación con el comportamiento de los materiales y se reafirman estos conceptos mediante el ensayo de materiales. En el ensayo de materiales se busca obtener la relación entre el esfuerzo y la deformación ya que nos permite conocer otros parámetros de gran importancia en el análisis de los materiales como elementos o en forma individual. El diagrama esfuerzo-deformación se elabora trazando los valores del esfuerzo en las ordenadas y las deformaciones en la abscisas. El diagrama de esfuerzo-deformación se pueden identificar puntos que indican la variación del comportamiento, como son el límite de proporcionalidad que indica el punto donde los esfuerzos y la deformación dejan de ser proporcionales, es decir un punto después a éste se dice que inicia la acción plástica, es decir el diagrama de esfuerzo-deformación se puede dividir en dos zonas la de acción elástica y plástica donde se da la falla.

Los parámetros que se determinan de un material son básicamente los siguientes: longitudes, ángulos, volúmenes, fuerzas, intervalos de tiempo, temperaturas. En el ensayo de materiales se realizan mediciones que generalmente tiene que ver con la determinación de la relación esfuerzo-deformación.

Cada instrumento que se utilice esta ligado íntimamente a la sensibilidad y lectura mínima, ya que la sensibilidad es la capacidad del instrumento para poder captar variaciones ligeras o de mayor intensidad en la escala que indica la carátula del aparato.

En el ensayo de materiales el instrumento que proporciona mayor utilidad es sin duda la maquina universal, ya que contiene un grupo de instrumentos trabajados con la coordinación necesaria para poder determinar la relación entre los esfuerzos y la deformaciones generadas en el ensayo. Estas máquinas se dividen por el medio de aplicación de la carga en dos grandes grupos las hidráulicas y las mecánicas, estas últimas se han dejado de utilizar debido a lo difícil que resulta su utilización. Las máquinas hidráulicas reciben la fuerza por medio de presión que transmite una prensa hidráulica.

Para conocer las características de los materiales existen una gama muy amplia de ensayos, en la Ingeniería Civil las que resultan más significativas para la toma de decisiones o diseño las podemos dividir en las siguientes:

Ensayos de tensión y compresión.

Ensayo de corte y flexión.

Ensayo de Torsión

ESTA YESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

Teniendo los anteriores y las combinaciones de estos como las condiciones que mas prevalecen en los diseños ingenieriles.

Cabe señalar que para cada uno de los ensayos antes mencionados una parte primordial durante el ensaye consiste en que los dispositivos de montaje simulen las condiciones de apoyo requeridas para las condiciones de trabajo del elemento o muestra.

Otro aspecto importante para poder asegurarse de que se tendrán resultados confiables en conocer con gran exactitud el proceso de fabricación de las probetas, ya que si no se tiene la certeza de un proceso adecuado para su obtención generaria datos erróneos, además que todas las probetas están especificadas por normas estandarizadas, lo que permite obtener resultados en rangos esperados.

Los ensayos de tensión se utilizan para determinar las siguientes características resistencia al limite de proporcionalidad, resistencia última y algunas otras características como la ductibilidad, etc. La característica primordial de las probetas de tensión es que la forma adecuada es ancha en los extremos y delgadas en el centro para obligar la falla en el centro, además de que para conocer todas las características se requiere un tramo en el centro donde tomarán las medidas necesarias, a este tramo se le llama de calibración. Los tipos de falla nos pueden determinar el estado de esfuerzo que se generó en la probeta y de esta manera saber el origen de la falla.

En los ensayos de compresión la propiedad que se busca principalmente es la resistencia a la compresión, así como resistencia última, aun cuando para poder determinar lo anterior se tenga que tomar cuenta las siguientes consideraciones: la dificultad de transmitir una carga verdaderamente axial, el cambio en el estado de esfuerzos a medida que aumenta la carga lo que provocaría ciertas irregularidades en los resultados obtenidos, la fricción entre los apoyos y la máquina de ensaye debido a la expansión lateral de la probeta, la variación de las secciones transversales. Para estos ensayos se ha normado el tamaño de las muestras como se indica en este trabajo lo cual nos permite obtener resultados apropiados, además se debe de considerar las camas y bloques de apoyo los cuales nos permiten aplicar una carga axial sobre la probeta. Además es determinante la observación de la falla ya que nos permite aplicar juicios apropiados.

En general en todos los ensayos de acuerdo al tipo de esfuerzo a generar es necesario antallar las condiciones de apoyo, las características de la probeta y lo que sucede durante la falla del mismo. Esto nos permite obtener mejores resultados durante el ensaye.

En la ingeniería una de las grandes herramientas con que se cuenta es la estadística, ya que ésta nos permite manejar los datos obtenidos durante el ensaye de materiales y además aplicar criterios para llegar a conclusiones más representativas. En el ensaye de materiales se requiere hacer una reducción de datos y con esto tener un resumen de los datos obtenidos, con estos elementos poder representar lo que pasa durante el ensaye mediante el empleo de gráficas, figuras, tablas, etc., lo que le permite a los análisis de laboratorio poder lograr su objetivo que es transmitir los resultados obtenidos de una manera clara y precisa. Esto porque quien toma las decisiones acerca de un determinado material no necesariamente esta relacionado intimamente con el contexto del laboratorio.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- **Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición.**
William D. Cooper
Albert D. Helfrick
Edit. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- 2.- **Mediciones Mecánicas.**
R.S. Sirohi
H.C. Radha Krishna.
Edit. LIMUSA
- 3.- **Ensayo e Inspección de los Materiales en Ingeniería.**
Harmer E. Davis
George Earl Troxell
Edit. Mc Graw-Hill Book Company
- 4.- **Introducción a la Mecánica de Sólidos.**
Egor P. Popov
Edit. LIMUSA
- 5.- **Mecánica y Resistencia de Materiales.**
Harry Parker
Edit. LIMUSA
- 6.- **Mecánica de Materiales**
Egor P. Popov
Edit. LIMUSA
- 7.- **Resistencia de Materiales**
F. B. Seely
Edit. UTHER
- 8.- **Resistencia de Materiales.**
Stephen Timoshenko
Edit. Espasa-Calpe