

# ELEMENTOS DE DISEÑO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA

Informe de año sabático  
Fernando Álvarez Mejía  
Profesor Titular  
Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS  
Sede Medellín  
2007

## TABLA DE CONTENIDO

	PAG.
CAPITULO I. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA	1
1. UN PROCESO GENERAL DE DISEÑO	
2. CONSIDERACIONES GENRALES SOBRE MECANISMOS	17
CAPITULO II. ESFUERZO Y DEFORMACION EN ELEMENTOS MECÁNICOS	26
1. ANÁLISIS DEL ESFUERZO	26
2. CONSIDERACIONES REFERENTE A LA RIGIDEZ Y A LA DEFORMACIÓN	39
CAPITULO III. MATERIALES MAS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE MAQUINARIA AGRÍCOLA	67
CAPITULO IV. TEORÍAS DE FALLA DE LOS MATERIALES	113
1. DISEÑO POR RESISTENCIA ESTÁTICA	
2.. FALLA POR FATIGA	
CAPITULO V. EJES DE TRANSMISIÓN	138
CAPITULO VI.. VIBRACIONES MECÁNICAS	148
CAPITULO VII. TRENES DE ENGRANAJE	173
CAPITULO VIII. CALCULO DE CORREAS Y CADENAS	189
1. CORREAS O BANDAS DE TRANSMISION	189
2. TRANSMISIÓN DE POTENCIA POR CADENAS	197
CAPITULO IX. ELEMENTOS ROSCADOS DE SUJECCIÓN Y TORNILLOS DE POTENCIA	222
CAPITULO X. RESORTES	235
CAPITULO XI. CALCULO DE COJINETES Y RODAMIENTOS	255
CAPITULO XII. ACOPLAMIENTOS	270
ANEXO 1. SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)	291
ANEXO 2. FUERZA CORTANTE, MOMENTO FLEXIONANTE Y DEFLEXIONES EN VIGAS	309
ANEXO 3. DIAGRAMAS PARA FACTORES TEÓRICOS DE CONCENTRACION DE ESFUERZOS	305
BIBLIOGRAFIA	





## PROLOGO

El texto que aquí se presenta se adapta al programa de la asignatura Mecanismos que actualmente viene impartándose en la formación de los Ingenieros Agrícolas y servirá de guía al estudio de las máquinas agrícolas para profesiones afines al sector agropecuario. Los estudiantes deberán haber adquirido un conjunto de herramientas de ingeniería que consisten esencialmente de Matemáticas, Geometría, Física y varias de las ciencias básicas como la Resistencia de los Materiales. Estas herramientas y ciencias, constituyen la base para la práctica de la ingeniería y, por tanto, en la etapa de educación universitaria, es apropiado introducir algunos aspectos profesionales de la ingeniería.

Su estudio resulta necesario para resolver las múltiples aplicaciones y situaciones prácticas que en el sector de la maquinaria agrícola puede encontrar el técnico responsable del diseño y cálculo de piezas y sistemas mecánicos.

El Capítulo I, Consideraciones generales para el diseño de maquinaria agrícola contiene un tratamiento completo del proceso general del diseño y un análisis funcional de la maquinaria agrícola. En el Capítulo II, Esfuerzo y deformación de elementos mecánicos y Capítulo III, Materiales más utilizados en la construcción de maquinaria agrícola, se presenta la información básica que se considera que el estudiante deberá estar preparado en la mayoría de estos temas, pero no siempre es así. El material básico es presentado con el simbolismo y la terminología de las partes subsiguientes del libro. En el Capítulo IV, Teorías de falla para el diseño de máquinas, se integran los fundamentos de los capítulos anteriores con la meta de analizar, evaluar y diseñar los elementos mecánicos. En los Capítulos del V al XII se examinan los elementos mecánicos específicos tales como ejes, trenes de engranajes, bandas y cadenas, sujetadores, resortes, cojinetes, rodamientos, acoplamientos y el tema de las vibraciones mecánicas tan importante en la formación de los ingenieros proyectistas.

Confío que la temática expuesta en el texto de modo conciso y básico, sea útil no sólo para los alumnos de la asignatura, sino para quienes estén interesados en adquirir una imprescindible formación en el campo del diseño y evaluación de los equipos mecánicos agrícolas.

Fernando Álvarez Mejía  
Profesor Maquinaria Agrícola

# **CAPITULO I. CONSIDERACIONES GENERALES PARA EL DISEÑO DE MAQUINARIA AGRICOLA**

## **1. UN PROCESO GENERAL DE DISEÑO**

### **1.1 Introducción**

El diseño de maquinaria agrícola se dedica en buena parte al cálculo de transmisiones y de elementos mecánicos, aun cuando estos tópicos constituyen parte importante en el contexto general de la maquinaria agrícola, no dejan de ser un paso dentro del proceso total de diseño.

La integración del proceso mediante un método general permite al Ingeniero Agrícola tener una visión más exacta del diseño de la maquinaria agrícola, integrar los conocimientos adquiridos y seguir un procedimiento más confiable.

La cualidad que hace buenos diseñadores es la capacidad para desarrollar su propia filosofía del diseño. La filosofía de diseño incluye organizar la metodología desde que aparece la necesidad hasta que se llegue al producto final, determinando cuales son los recursos tecnológicos a usar: relaciones matemáticas, consideraciones económicas, oportunidad, confiabilidad y seguridad durante el proceso de diseño. Para desarrollar una filosofía de diseño, el ingeniero debe sumar las destrezas ya aprendidas y aquellas que se encuentran en los libros o textos especializados para crear un producto que beneficie a la humanidad y mejore la calidad de vida, ahora y de las generaciones futuras.

Para Shigley y Mischke: "Diseñar es formular un plan para satisfacer una demanda humana". Para Tedeschi: "Proyectar en el campo mecánico puede también significar inventar, pero es mucho mejor tener la idea de que es desarrollar una máquina que resultará diferente a cualquiera otra de las existentes solamente por su disposición general, por sus dimensiones o por ciertos detalles de importancia". Afirma además que: "inventar es un don exclusivamente personal y exquisitamente vocacional".



Gasson define los diseñadores como: " Aquellos quienes emplean los agentes de la destreza y facilidad tecnológica y hacen uso de sus energías creativas para efectuar alguna ventaja útil al hombre".

Cuando se plantea una necesidad el proyectista siempre se pregunta: no será que el problema ha sido ya resuelto?. Habrá más personas trabajando en el asunto?. Para diseñar hay que tomar decisiones, y una decisión en un proyecto es siempre un compromiso. El tractor Ford de 60 kW en el toma de fuerza (PTO) y el tractor Massey-Ferguson de la misma potencia son soluciones buenas para un mismo problema, pero son diferentes, puesto que tienen diferentes motores, diferentes, capacidades de lastre, etc.; lo único que tienen igual son las piezas normalizadas (pernos, tuercas y los elementos o mecanismos fabricados por un tercero).

Para un buen proyecto, el diseñador debe tener en cuenta:

1. Las cargas aplicadas a la máquina, los esfuerzos y deformaciones que estos producen.
2. Materiales a utilizar y proceso de conformación de las piezas y mecanismos
3. Aspectos económicos de construcción
4. El factor de seguridad para cada caso
5. Las condiciones de trabajo
6. Las características más recomendables para que los diferentes mecanismos cumplan con las condiciones específicas en la máquina: tamaño, peso, operación automatización, etc.

Así como la tecnología cambia, los métodos y la filosofía de diseño cambian . La automatización de algunas tareas de diseño ha dado lugar al desarrollo del llamado diseño auxiliado por computadora (Computer-Aided-Design, CAD) y más ampliamente los sistemas CAD/CAM (Computer-Aided-Manufacturer), herramientas poderosas

que han proporcionado a los ingenieros un diseño más eficiente y a más bajo costo.

## 1.2 El proceso de diseño en ingeniería

La resolución de problemas de diseño en Ingeniería es todo un proceso, que comienza con el análisis de las necesidades, en donde se obtienen unas especificaciones preliminares y en donde el mayor trabajo se traduce en la formulación de preguntas. El reconocimiento de la necesidad supone en si mismo una capacidad de observación destacada y un conocimiento amplio del tema. A medida que el proceso avanza mediante la definición, análisis, síntesis, evaluación etc., las especificaciones del problema se dan cada vez más detalladas hasta obtener las especificaciones finales. En este momento el proyecto está detallado y se tiene toda la información para iniciar la construcción del prototipo y la programación de pruebas.

Este proceso posee un carácter interactivo, ya que muchas veces durante el mismo se descubren muchos datos o se adquieren nuevas perspectivas que exigen repetir algunos de los pasos enunciados anteriormente.

Todas las fases del proceso, a excepción de la fase creativa, necesitan de bastante información. Por ejemplo para definir el problema es necesario recopilar información, procesarla y comunicarla. El Ingeniero normalmente proyecta con la mayor información disponible, no necesariamente con la existente. Frecuentemente los datos o ecuaciones necesarias no existen, pero el proyecto del prototipo debe estar listo antes de ser construido. Entonces, Cuál es la diferencia entre un Ingeniero con buen dominio de las ciencias básicas y aplicadas y un observador experimentado con muchos años de trabajo?. Dependiendo del grado de desconocimiento que exista en la ciencia aplicada sobre el proyecto en cuestión, el ingeniero puede inicialmente ser superado por el observador, ya que deberá iniciar su trabajo en la observación y experimentación, fase superada por el observador empírico.

A medida que el cúmulo de observaciones van siendo cotejadas con leyes físicas conocidas, el dominio intuitivo del observador experimentado va siendo superado por el binomio observación-

ecuación, utilizado por el ingeniero. La pura observación repetitiva acompañada de un análisis cualitativo del proceso, conduce a una solución funcionalmente aceptable, cuya distancia a la solución óptima es desconocida. Esa solución escapa de la definición básica del proyecto de ingeniería donde la necesidad humana debe ser satisfecha con máximo aprovechamiento de los recursos naturales, o sea debe resultar de un proceso de optimización.

La observación de los fenómenos por parte del ingeniero debe estar constantemente asociada a las leyes de las ciencias aplicadas y básicas, buscando encuadrar el proceso observado dentro de esas leyes (ecuaciones o modelos matemáticos) con el fin de poder optimizarlo a través de criterios y procedimientos matemáticos convencionales. Esas ecuaciones son necesarias para hacer uso de la informática, ya que la naturaleza de la información procesada es determinística.

Después de la determinación de las ecuaciones que gobierna el proceso, queda bajo el control del ingeniero extraer el máximo físicamente posible (optimizar). El grado de dificultad en la identificación de las ecuaciones o modelos que rigen el proceso en observación aumenta una vez que el caso se aparta de la mecánica clásica aplicada a casos conocidos, tales como los materiales con comportamiento lineal independiente del tiempo como lo es el acero y otros metales.

Gran número de problemas vienen recibiendo la atención científica necesaria para generar la ciencia aplicada, en el nivel necesario de aprovechamiento de los ingenieros. Un modelo matemático de los fenómenos de transferencia de calor y masa en el secado y almacenamiento de granos y otros productos es un buen ejemplo de esa evolución. Otro ejemplo destacable, es la resistencia de los materiales aplicada a las estructuras de alto grado de hiperestaticidad, la cual ha evolucionado con el auxilio de la informática al punto de permitir el dimensionamiento de piezas de geometría compleja (ejes, chasis, etc.), sin limitaciones con relación a las condiciones de carga, forma, tipos de vínculos o materiales.

Nuevos ecuacionamientos del comportamiento mecánico de materiales son observados progresivamente en el campo de la ciencia aplicada, tales como el comportamiento viscoelástico de



los productos biológicos con fuerte participación de la variable tiempo en su comportamiento reológico, como es el caso de las presiones sobre superficies de frutas y hortalizas generadas por los componentes de las máquinas agrícolas.

Otros materiales como los elastómeros no suficientemente conocidos en su comportamiento mecánico, gana espacios en las aplicaciones agrícolas. Compuestos de caucho con bajo módulo de elasticidad y comportamiento elástico no lineal, soportan grandes deformaciones específicas y consecuentemente limitan la utilización de los recursos matemáticos como el principio de superposición que se apoya en la linealidad del comportamiento carga-deformación.

La peculiar estructura molecular de los polímeros de cadenas extremadamente largas de baja ramificación y de alta densidad relativa y grado cristalino, les confiere notables propiedades, traducidas en un bajo coeficiente de fricción, acompañado de propiedades de perfecto deslizamiento, antiadherencia, autolubricación y máxima resistencia al impacto y una sobresaliente resistencia a la abrasión.

La rápida difusión de los recursos de informática, junto con la utilización creciente de los recursos de las áreas exactas en la agricultura, están acelerando la generación de las leyes del comportamiento mecánico de los materiales menos convencionales.

El comportamiento mecánico de elementos de prueba de geometría regular (cubo, cilindro, etc.) es fácilmente ecuacionable. Elementos mayores de geometría irregular, pueden ser representados por la superposición de un número y disposición adecuada de cuerpos menores de geometría regular (elementos finitos) y comportamientos conocidos hasta predecir el comportamiento del elemento en estudio más complejo.

### 1.3. Desarrollo del proceso general de diseño

- Estudio de factibilidad. El propósito de este estudio es obtener un conjunto de soluciones útiles para el problema del proyecto como se muestra en la figura 1. Dicho estudio comienza con el análisis de las necesidades: la meta de este análisis es determinar las necesidades

reales que el sistema debe satisfacer. En el siguiente paso se realiza el análisis de la actividad, el cual consiste en un estudio de las condiciones que limitan el sistema. La meta de este estudio está en determinar los límites y las condiciones limitantes que se aplicarán al sistema y con los cuales deberá coincidir dicho sistema antes de poderlo considerar como una solución posible, el análisis de la actividad está basado en el análisis de las entradas y salidas exigidas a un sistema cuya forma es desconocida.

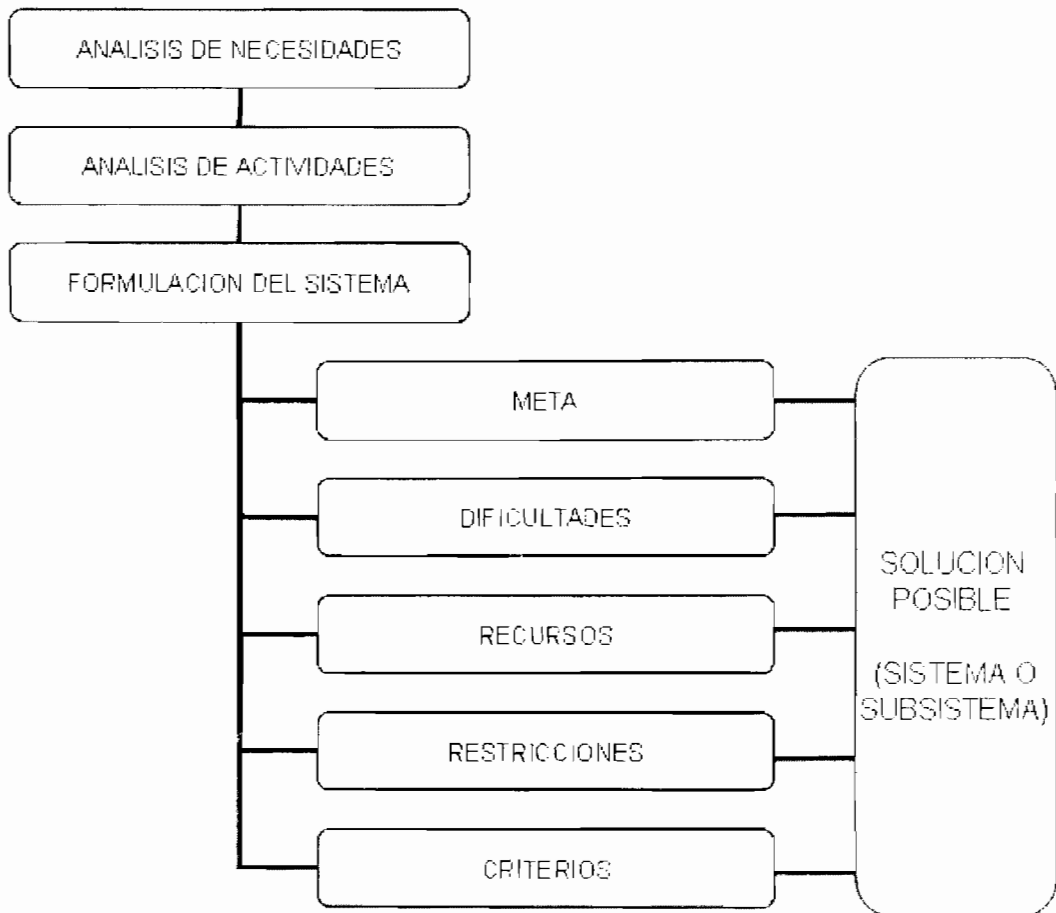


Figura 1. Elementos utilizados para alcanzar una solución posible a un problema dado.

- Definición. El problema de diseño se debe definir en forma amplia y precisa sin considerar detalles y sin preocuparse por soluciones. En general, la definición del problema debe incluir la mayor parte del problema total, pues a mayores subdivisiones

menor posibilidad de que la solución resulte óptima. En esta etapa se hace un esfuerzo por entender el problema, enunciar las metas que se propone alcanzar el diseñador y verificar la validez de la existencia económica de la necesidad.

La formulación del problema es como un corolario de esa necesidad reconocida que pretende satisfacerse con la existencia de la máquina. Un problema bien formulado permite abordar las distintas fases del proyecto con seguridad y eficacia. Para esto se debe conocer: la actividad que se va a desarrollar, los objetivos que se pretenden alcanzar, recursos económicos, materiales y humanos, el entorno de trabajo del equipo, restricciones y tolerancias.

- Análisis. Una vez definido el problema se siguen determinando especificaciones, las cuales puedan comprender parámetros, restricciones y criterios. Esta parte del procesamiento está caracterizada por la gran cantidad de preguntas que hay que formular. El análisis del problema implica la recopilación y procesarlo de gran cantidad de información. Al finalizar esta fase, el problema debe quedar claramente definido en términos técnicos.

- Síntesis. El paso de la síntesis se inicia formalmente después que el problema ha sido comprendido. El objetivo es idear diversas soluciones posibles. En términos generales, el diseñador puede iniciar la búsqueda de las soluciones siguiendo uno de los siguientes caminos: 1) encontrar el máximo número de soluciones posibles, 2) organizar las investigaciones y razonamientos de tal forma que se obtengan soluciones básicamente diferentes y 3) sistematizar la forma de hacer preguntas, de combinar ideas, de examinar soluciones análogas y de modificar las variables de solución.

Con la síntesis se llega a un plan completo de todos los elementos que van a componer la máquina. A partir de las ideas generales de la máquina se van detallando los órganos funcionales que intervienen. Se realiza la elección del mecanismo, el tipo de accionamiento, tipo de control, etc. No siempre la primera síntesis es la definitiva. Lo normal es que se vuelva sobre ella en ciclos reiterados hasta alcanzar la solución óptima deseada.



- Evaluación. Existen dos consideraciones básicas para la evaluación: 1) la economía proyectada del producto y 2) la tecnología en progreso y la obsolescencia técnica. Hay necesidad de comparar las ideas de diseño y encontrar los méritos relativos, ventajas y desventajas asociadas con cada una. Por medio de esta composición se pueden determinar los valores relativos de cada alternativa. Las bases que permitan solucionar la mejor solución son los criterios, los cuales deben ser definidos en términos generales durante el análisis del problema. En cualquier forma deben verificarse los siguientes pasos: 1) seleccionar los criterios. 2) predecir la efectividad de las diversas soluciones. 3) comparar las efectividades pronosticadas de las diversas soluciones y 4) hacer una elección.

#### 1.4 Formalización del proyecto

El proyecto preliminar o anteproyecto tiene como finalidad establecer cuál de las alternativas propuestas es el mejor concepto del proyecto. En esta etapa se realizan estudios para establecer la amplitud del dominio dentro del cual tendrán que controlarse los parámetros fundamentales del proyecto.

La importancia de usar un producto comercial debe resaltarse. El diseñador debe examinar los costos de manufactura y compararlos con los disponibles en el comercio, en donde existen especialistas que casi sin excepción puede manufacturar un producto más barato y de mayor claridad.

El anteproyecto es la base que será usada para suministrar estimativos preliminares de costos para materiales, mano de obra y manufactura; es también la base para posteriores detalles. Las notas descriptivas sirven para describir más completamente el producto. Las notas deben especificar tolerancias de los principales componentes, tratamientos térmicos, terminados, materiales, proveedores de partes especiales, y cualquier otra información relevante del proyecto. Si así lo considera el diseñador, el trámite de la patente debe estar asociada con estas actividades.

Aprobado el anteproyecto, se procede a desarrollar la información detallada del diseño del sistema. Así como un



sistema puede estar compuesto de varios subsistemas, un subsistema puede comprender varios componentes y un componente varias partes, los cuales se han desarrollado de modo semejante.

El anteproyecto indicó los materiales y tamaños de las partes, pero no suministró todas las dimensiones detalladas e información para manufactura. En el proyecto los dibujos detallados deberán mostrar toda la información necesaria: dimensiones con sus respectivas tolerancias, materiales acabados superficiales, etc., y cualquier nota que requiera la manufactura de las partes.

En el proyecto debe incluirse:

- Memoria definitiva y justificación de soluciones, dimensionado y proceso de fabricación de todos los elementos o piezas, memoria de cálculos y anexos complementarios.
- Planos generales y de detalle
- Presupuesto de fabricación
- Programa de mantenimiento
- Pliego de condiciones con la normatividad existente para piezas, procesos y materiales.

### 1.5 Ejecución del proyecto

Ejecutar el proyecto es llevar a cabo su construcción siguiendo las especificaciones establecidas. Cuando se inicia deben revisarse completamente los planos, instalaciones y campos de experimentación, la instrumentación para mediciones y todos los equipos para su producción. Es práctico realizar primero modelos a escala del conjunto o partes de él. De esta manera se va progresando hasta la construcción del prototipo, con el que se harán los primeros ensayos y pruebas y se obtendrán experiencias completas cuando es sometido a las diferentes cargas y condiciones de trabajo. La información es registrada considerando el comportamiento y será importante para inspeccionar el proyecto hasta considerarlo satisfactorio. De aquí se pasa a la fabricación en serie, primero de pequeñas series, cuya salida al mercado al trabajar en condiciones diversas y reales, aportan nuevos datos, que con evaluaciones tanto técnicas como comerciales permitirán decidir sobre la

fabricación de series mayores y proceder a la explotación total del proyecto.

## 1.6 Códigos y normas

Un código es un conjunto de especificaciones para efectuar el análisis, el diseño, la fabricación y la construcción de un objeto o sistema. Su propósito es alcanzar un grado de seguridad especificado, buen funcionamiento y buena calidad.

Una norma o estándar es un conjunto de especificaciones para piezas, materiales o procesos establecidos, con el fin de lograr eficiencia, uniformidad y calidad especificadas.

La normalización es el conjunto de normas generales, para todos los fabricantes, comunes a un país o con ámbito internacional. Su objeto es establecer reglas que faciliten la producción en serie y el intercambio de productos a nivel nacional e internacional, con el cumplimiento de usos mínimos de calidad que garanticen el producto.

La normalización tiene ventajas para los fabricantes, le permite racionalizar variedades y tipos de productos, les facilita la producción y el intercambio de piezas, disminuye el volumen de existencias en almacén, mejora la gestión y el diseño, facilita la comercialización de los productos y su exportación y simplifica la gestión de compras.

Para los consumidores la normalización establece niveles de calidad y seguridad de los productos y servicios, suministra información de las características del producto y facilita la comparación entre varias ofertas.

Los elementos normalizados incluyen las unidades y sistemas de medida, los elementos constructivos, las dimensiones de las piezas, la designación de materiales, las tolerancias y grados de precisión, los procesos de elaboración, los procedimientos de ensayo, medición y análisis, las condiciones de suministro, la seguridad y la ergonomía.

La normalización es establecida por comités o institutos de los países tecnológicamente desarrollados que generan documentos

técnicos que contienen especificaciones de aplicación voluntaria. Las normas más importantes son las normas ISO, DIN y UNE.

### 1.7 El factor de seguridad para diseño

Al tratar con esfuerzo y resistencia uno de los problemas con que se enfrenta el diseñador es la forma de relacionar los dos conceptos a fin de crear un diseño seguro, confiable, eficiente y económico.

La resistencia ( $S$ ) es una característica o propiedad inherente de un material o de un elemento mecánico, que depende de la elección, procesado o tratamiento del material y que es independiente de que se someta o no a la acción de una carga. La resistencia de una pieza puede variar de un punto a otro dependiendo a que haya sido sometida a procesos de labrado y tratamiento térmico, como laminado, forja y conformado en frío.

Se ha vuelto costumbre la designación de  $\sigma$  para el esfuerzo normal y  $\tau$  para el esfuerzo cortante, como resultado de cualquier carga que se pueda aplicar en un elemento. Se utilizan también los términos esfuerzo permisible o valor permisible del esfuerzo ( $\sigma_p$  y  $\tau_p$ ) para indicar valores de resistencia reducidos que permiten determinar las dimensiones de una pieza con tamaños establecidos de conformidad con la resistencia. La relación entre esfuerzo permisible y resistencia mínimas especificadas (resistencia de fluencias  $S_y$ ) de conformidad con el Código de el Instituto Americano de Construcciones en Acero (American Institute of Steel Construction-AISC) se establecen como:

TENSIÓN:	$0.45 S_y$	$\leq$	$\sigma_p$	$\leq$	$0.60$
CORTE:	$\tau_p =$	$0.40$	$S_y$		
FLEXION:	$0.60 S_y$	$\leq$	$\sigma_p$	$\leq$	$0.75$
APLASTAMIENTO:	$\sigma_p =$	$0.90$	$S_y$		

El valor del esfuerzo en el cual se prevé que empieza la falla de una pieza es conocido también como “esfuerzo admisible”. Este valor se determina con base a los ensayos estandarizados o pruebas normalizadas sobre probetas, debido a que las condiciones de laboratorio en las cuales se miden las propiedades de los materiales difiere de aquellos en los cuales se elaboran y trabajan las piezas. Lo ideal es poder disponer de

una buena cantidad de ensayos de resistencia del material que va a ser utilizado en un diseño. Si el elemento va a estar sometido a cargas de flexión, entonces se requieren los resultados de un ensayo de flexión y si es sometido a cargas combinadas se requiere de los resultados de un ensayo según la combinación de estas cargas. Debido a que este tipo de ensayos son costosos, se recurre a las publicaciones, libros y/o tablas para obtener los valores de la resistencia de fluencia ( $S_y$ ), resistencia última ( $S_u$ ), resistencia al corte ( $S_s$ ), resistencia a la fatiga ( $S_f$ ), etc.

El término Factor de Seguridad ( $n$ ), también denominado Factor de Diseño, es un número que sirve para evaluar la condición segura de un elemento. Cuando el esfuerzo es linealmente proporcional a la carga se define por la relación:

$$n = \frac{\text{Resistencia}}{\text{Esfuerzo}} \quad (1.1)$$

La resistencia puede ser fijada por el proyectista y debe estar en correspondencia con el esfuerzo empleado; si la resistencia es al cortante ( $S_s$ ) en MPa entonces el esfuerzo debe ser un esfuerzo cortante ( $\tau$ ) en las mismas unidades (MPa) y aplicado en el mismo punto o conjunto de puntos de la pieza que se diseña.

En muchas aplicaciones no existe una relación lineal entre una carga y el esfuerzo producido. En estos casos, el factor de seguridad se define como:

$$n = \frac{\text{Carga Limite}}{\text{Carga Admisible}} \quad (1.2)$$

$$n = \frac{\text{Resistencia en unidades de fuerza}}{\text{Carga o fuerza aplicada}} \quad (1.3)$$

Para tener en cuenta las incertidumbres que puedan ocurrir de resistencia y carga, se emplean el factor de seguridad aplicado totalmente a la resistencia ( $n_s$ ) y el factor de seguridad aplicado íntegramente a la carga o a los esfuerzos que resultan de esas cargas ( $n_l$ ). Cuando  $n_s$  se aplica a la resistencia se tiene un esfuerzo permisible ( $\sigma_p$ ,  $\tau_p$ ):



$$\sigma_p = \frac{S}{n_s} \quad (1.4)$$

Cuando  $n_L$  se aplica a la carga límite  $F_u$ , se tiene una carga permisible:

$$F_p = \frac{F_u}{n_L} \quad (1.5)$$

El factor de seguridad total será entonces:

$$n = n_s \times n_L \quad (1.6)$$

El factor de seguridad es utilizado en el diseño para considerar las incertidumbres que puedan ocurrir cuando las cargas reales actúen sobre un elemento diseñado y construido, sobre los cuales el fabricante y el proyectista no tienen control o cuando va a ser construidas muchas piezas a partir de diversos materiales.

La determinación del factor de seguridad es una de las labores más importante del ingeniero. Un valor muy pequeño conduce a una probabilidad de falla inaceptablemente grande y un factor innecesariamente grande conduce a diseños antieconómicos y no funcionales. El valor del factor de seguridad está influenciado fuertemente por los siguientes elementos:

1. El material de la pieza, esto es: si es dúctil, frágil, homogéneo, de especificaciones bien conocidas, etc.

Durante el proceso de fabricación, la composición, resistencia y dimensiones de los materiales están sujetos a pequeñas variaciones. Además se pueden introducir esfuerzos residuales debido al calentamiento y deformaciones durante el almacenamiento, transporte o la construcción.

Los materiales frágiles fallan súbitamente, sin aviso previo; mientras que los materiales dúctiles, como es el caso del acero estructural, sufren una deformación considerable antes de fallar, que es la conocida como fluencia.

2. La carga que actúa en la pieza. Si es constante; cíclica o variable, si es bien conocida, su modo de aplicación, sobrecargas posibles, etc.

La carga estática es una acción estacionaria de una fuerza o un momento que posee magnitud, dirección y punto de aplicación invariables. También puede ser definida como aquella carga que induce a esfuerzos que no varían. Las cargas que varían poco y lo hacen infrecuentemente son generalmente tratadas como cargas estáticas; es el caso de la carga de un resorte sobre una válvula de seguridad.

La carga variable o carga cíclica es aquella que induce a esfuerzos que varían en magnitud y/o dirección. Estas cargas pueden estar acompañadas de choques. Para la mayoría de los materiales, el esfuerzo normal decrece cuando el número de ciclos de carga aumenta. Son consideradas cíclicas por ejemplo: las cargas en los dientes de los engranajes, ejes rotando sujetos a momento flector y cargas causadas por vibración.

Muy pocas veces se conoce con exactitud el tipo de cargas; la mayoría de las utilizadas en diseños son aproximaciones y es por esto que se usan factores mayores cuando la carga es variable, dinámica o de impulso.

3. Peligro de vida del operador de la máquina y daños costosos en la maquinaria o equipos. Cuando una máquina no implica pérdidas de vidas o de propiedad puede utilizarse un factor pequeño de seguridad.

Es importante que el Ingeniero disponga de resultados de una buena cantidad de ensayos de resistencia, puesto que le proporciona información muy útil y precisa y más cuando la falla de una pieza puede poner en peligro la vida humana. Al respecto, se distinguen cuatro categorías de diseño:

- La falla podría poner en peligro la vida humana. Se justifica un amplio programa de pruebas.
- La pieza se fabricará en cantidades grandes que justifica una serie importante de ensayos.

- Las cantidades de las piezas son tan reducidas que no justifica ningún ensayo.
  - El elemento ya ha sido diseñado, fabricado y probado con resultados negativos. Se requiere de un análisis para conocer las causas de su trabajo y lo que debe hacerse para mejorarlo.
4. El ambiente en el que actúan los elementos puede indicar un mayor factor de seguridad especialmente en sitios en donde condiciones como la corrosión y el desgaste son difíciles de controlar.
  5. Los métodos de análisis de diseño se basan en hipótesis simplificadoras que conllevan al cálculo de esfuerzos que son aproximaciones de los esfuerzos reales.

En gran parte de las aplicaciones prácticas los factores de seguridad están especificados en normas de diseño o códigos preparados por comités de ingenieros experimentados. Los factores de seguridad varían de una industria a otra, pues son el resultado de las experiencias acumuladas con la clase de máquinas o la naturaleza del ambiente.

Joseph Vidosic, citado por Juvinall y Marshek estableció una guía para el factor de seguridad ( $n$ ) basado en la resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) que pueden emplearse en los proyectos básicos y que varían entre 1.25 y 4, de conformidad con el grado de incertidumbre que exista:

1.  $n = 1.25 - 1.5$ : para materiales seguros. usados en condiciones controlables y sujetos a cargas y esfuerzos que pueden ser determinados con certeza.
2.  $n = 1.5 - 2$ : para materiales bien conocidos, bajo razonables condiciones ambientales, sujetos a cargas y esfuerzos que pueden ser determinadas fácilmente.
3.  $n = 2 - 2.5$ : para materiales medios operando en ambientes ordinarios y sujeto a cargas y esfuerzos que pueden ser determinados.

4.  $n = 2.5 - 3$ : para materiales probados o para materiales frágiles en condiciones promedias de ambiente, carga y esfuerzo.
5.  $n = 3 - 4$ : para materiales no probados usados en condiciones promedias de ambiente, cargas y esfuerzos.
6.  $n = 3 - 4$ : puede también ser usado para materiales bien conocidos que van a ser usados en ambientes inciertos o sujetos a esfuerzos inciertos.
7. Cargas repetidas: los factores establecidos en los ítem 1 a 6 son aceptables pero deben ser aplicados al límite de resistencia a la fatiga más bien que a la resistencia de fluencia del material.
8. Fuerzas de impacto: son razonables los factores dados en los ítem 3 a 6, pero debe ser incluido un factor de impacto.
9. Materiales frágiles o quebradizos: donde la resistencia última ( $S_u$ ) es usada como la máxima teórica, los factores presentados en los ítem 1 a 6 deben ser aproximadamente doblados.
10. Cuando los altos factores son deseables, un análisis más profundo debe ser llevado a cabo antes de decidir su uso.

## 1.8 Sistemas de unidades

En la ecuación simbólica dimensional  $F = MLT^{-2}$  (segunda ley de Newton),  $F$  representa la fuerza,  $M$  representa la masa,  $L$  indica longitud y  $T$  simboliza tiempo. Las unidades asignadas para tres de estas cantidades se denominan unidades básicas o fundamentales. Seleccionadas tres de las cuatro unidades, la cuarta es considerada como unidad derivada. Cuando la masa es la unidad derivada el sistema que resulta se conoce como el sistema gravitacional de unidades. Cuando la fuerza es la unidad derivada, el sistema resultante es el sistema absoluto de unidades, como es el sistema internacional de unidades (SI).

El sistema pie-libra-segundo y el sistema pulgada-libra-segundo son los dos sistemas gravitacionales más utilizados en los países de habla inglesa.

Teniendo en cuenta el uso que actualmente se le da a los diferentes sistemas (ingles, gravitacional y SI), se presenta en la tabla siguiente las unidades básicas y derivadas para cada uno de ellos.

Tabla 1. Sistemas de unidades para longitud, tiempo, masa y fuerza.

Cantidad	Sistema Inglés		Sistema Gravitacional		Sistema Internacional	
	Unidad	Simbolo	Unidad	Simbolo	Unidad	Simbolo
Masa	Libra masa	lbm	slug	slug	Kilogramo	kg
Longitud	Pie	ft	Pie	ft	Metro	m
Tiempo	Segundo	s	Segundo	s	Segundo	s
Fuerza	Libra-fuerza	lb(lbf)	Libra	lb	Newton	N
	(=32.1740 lbm.ft/S <sup>2</sup> )		(=1 slug.ft/S <sup>2</sup> )		(=1 kg.m/S <sup>2</sup> )	

La unidad de fuerza tiene significancia particular en el análisis y diseño de los elementos o piezas, la cual es incluida en los cálculos de torque, esfuerzo (y presión), trabajo (y energía), potencia y módulo elástico. En el anexo 1 se presenta una descripción más amplia sobre el sistema internacional de unidades (SI).

## 2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE MECANISMOS

### 2.1 Introducción

El trabajo de cualquier máquina y sus características, dependen de su concepción como conjunto para responder a unas necesidades, pero también de la correcta ejecución de sus piezas y mecanismos, de su correcto montaje y del empleo de materiales adecuados. Y este trabajo será útil si, además, resulta económico. Esto depende no sólo del precio, sino también del costo y facilidad de sus reparaciones y de su vida previsible, económicamente hablando.



El proyecto y la construcción de una máquina representa el resultado de conjuntar y utilizar muy hábilmente: lo teórico (conceptos básicos y leyes fundamentales de la mecánica, resistencia y materiales e hidráulica); lo experimental (para orientar con carácter técnico la selección y el análisis de un mecanismo en particular) y los conocimientos de las técnicas de trabajo.

## 2.2 Definiciones

Se entiende por **mecanismos** el estudio de las leyes que regulan los movimientos de las diversas piezas, miembros y órganos de las máquinas y las fuerzas que estos transmiten. Toda máquina posee un conjunto de órganos o elementos enlazados entre sí, de modo que el movimiento de uno de ellos implica el de los restantes.

El estudio de los mecanismos comprende: el aspecto cinemático, se refiere al movimiento de los miembros (geometría de las máquinas) y al cambio de posición de las diferentes piezas, para nada tiene en cuenta la resistencia del mecanismo y el aspecto **dinámico** que se refiere a todas las fuerzas que transmiten las piezas, el conocimiento de esas fuerzas permite dimensionar el mecanismo de conformidad con la resistencia de los materiales.

**Máquina:** es un conjunto o combinación de órganos dispuestos de tal forma que las fuerzas que transmiten se emplean para producir algún tipo de trabajo útil. Es decir las máquinas tienen por objeto ejecutar un trabajo mecánico.

**Cadena cinemática:** conjunto de mecanismos que integran una máquina y que determinan las transformaciones de movimientos adecuados para la consecución del objeto final que se pretende.

**Transmisión de movimiento:** no teniendo en cuenta las fuerzas que obran a distancia como la atracción, la gravedad, etc., un cuerpo o pieza no pretende hacer que otra se mueva sino están en contacto las dos o están ligadas por intermedio de un tercer cuerpo que transmita el movimiento.

**Conductor y conducido:** el elemento de una máquina que obliga moverse a otro se llama conductor y el que recibe el movimiento se denomina receptor o conducido. El conductor puede transmitir el

movimiento al conducido por: contacto directo o por rodadura (ruedas dentadas o engranajes); por deslizamiento (ruedas excéntricas o camas) y por medio de conexiones rígidas (bielas), flexibles (correa) y fluidas (hidráulica).

### 2.3 Transformación de movimientos

Combinaciones más usadas de órganos para formar mecanismos y así obtener la transformación de los distintos movimientos:

1. Mecanismos que transforman un movimiento rectilíneo continuo en otro movimiento rectilíneo continuo. Ejemplo: poleas fijas y poleas móviles.
2. Mecanismos que transforman un movimiento de rotación continuo en otro de traslación rectilíneo o alternativo o en otro que obedezca a una ley dada. Ejemplo, el torno simple, el torno de engranaje, torno diferencial, los tornillos que puede tener dos finalidades, como elemento de fijación o unión y en determinadas piezas como husillos. El piñón engranado con una cremallera y las excéntricas o camas, son ejemplos también de este tipo de mecanismos.
3. Mecanismos que transforman un movimiento rotacional continuo en otro movimiento rotacional continuo. Ejemplo: engranajes, transmisión por correas y cables y cadenas; juntas cardánicas, la doble junta, acoplamientos y embragues.
4. Mecanismos que transforman un movimiento rectilíneo alternativo en movimiento rotacional continuo. Ejemplo: los mecanismos de biela y manivela en motores de combustión interna, bombas y compresores.
5. Mecanismos que transforman un movimiento rotacional continuo, en otro alternativo oscilante. Ejemplo: mecanismos biela y manivela y las levas.

### 2.4 Análisis funcional de las máquinas agrícolas

Una máquina agrícola tiene varios componentes que trabajan como un sistema con el fin de que la máquina funcione de conformidad para lo que fue diseñada. Cualquier máquina por simple que sea, puede ser dividida en varios componentes. Para entender como trabaja una máquina, es necesario considerarla como una colección o sistema de varios subsistemas. Una

máquina agrícola puede ser dividida en dos subsistemas: sistemas de soporte y sistemas de proceso (Figura 2).

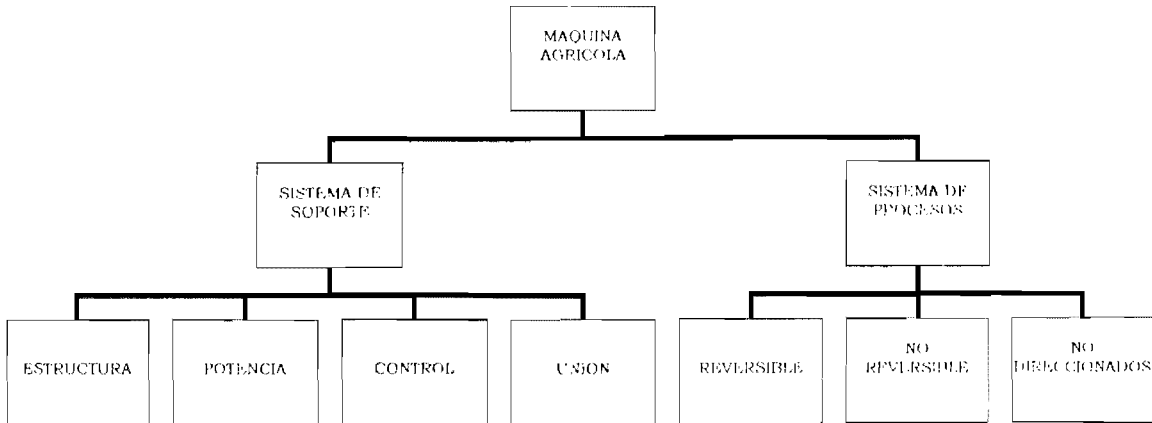


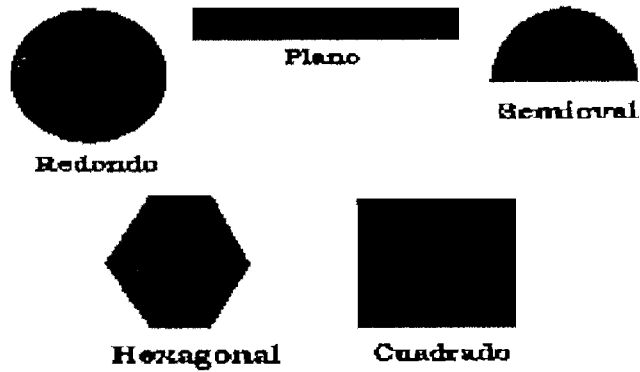
Figura 2. Sistemas de Máquinas Agrícolas

Los sistemas de soporte son los que ayudan a los sistemas de proceso a cumplir su función y se pueden clasificar como sistemas: estructural, de potencia, de unión y de control.

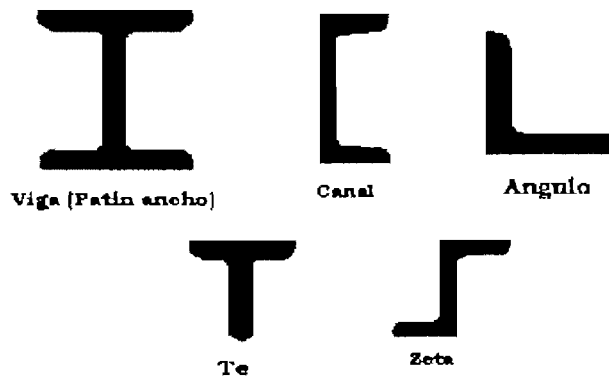
El sistema estructural o chasis tiene como función soportar todas las partes de la máquina para que puedan cumplir con las funciones que le son propias. La parte estructural de la máquina puede estar soportada por: las ruedas, por el fondo de algunos tipos de arado o por el tractor, como en el caso de equipos montados o integrales.

El chasis se construye de piezas de acero fundido y de partes de acero prensado. Esto quiere decir que se construye de materiales que soportan las condiciones de trabajo durante la vida útil de la máquina. Se emplean materiales estandarizados y secciones disponibles como se muestran en la figura 3:

- Planchas: lisas de metal empleadas en las tapas de las máquinas cosechadoras, en la protección de sistemas de transmisión y construcción de tanques y tolvas
- Barras planas: para soportar cargas de tensión
- Tubos: soportan bien cargas de tensión, compresión y torsión.
- Perfiles: soportan bien cargas de tensión, compresión y flexión.



**(a) Material en la barra**



**(b) Perfiles estructurales**

Figura 3. Secciones usuales disponibles de barras y perfiles

El sistema de potencia suministra la potencia a los sistemas de proceso. Las máquinas autopropulsadas contienen ambas, la fuente de potencia (motor) y los dispositivos de transmisión de potencia (tren de transmisión). Otras máquinas dependen del tractor como fuente de potencia, utilizando sistemas de transmisión de potencia como cadenas, bandas, engranajes, ejes de potencia (PTO), etc.,

Los elementos y mecanismos de transmisión de potencia incluyen: ejes; chumaceras y cojinetes; resortes mecánicos; engranajes: rectos, cilíndricos, cónicos, hipoidales, tornillos sinfín y epicicloidales; cadenas y ruedas; poleas y bandas; manivelas; mandos excéntricos; levas; acoplamientos: junta cardánica, uña y trinquete; embragues y frenos y volantes.

Los elementos de unión o conexión juntan los elementos entre sí y con el chasis y se conciben teniendo en cuenta su necesidad de montaje o desmontaje:

- Conexiones fijas: soldadura eléctrica y pegantes (no desmontables).
- Conexiones desmontables. Permiten el desmontaje de las partes para su reparación y reemplazo: pernos, resortes, tornillos, tuercas, chavetas, pasadores, entre otros.
- Conexiones más o menos desmontables: remaches, soldadura autógena y algunos pegantes.

La función del sistema de control es proveer el control sobre los sistemas de proceso, controles que pueden ser manuales o automáticos.

Los sistemas de proceso son aquellos componentes de la máquina que desempeñan las funciones para lo cual la máquina fue diseñada: cortar, separar, mezclar, etc., son conocidos como mecanismos operativos y forman la parte de operación de la máquina. En general el nombre de la máquina se deriva del nombre del mecanismo operativo. El nombre de algunas máquinas incluye el nombre del mecanismo operativo y el nombre del cultivo o proceso: arado de discos, cosechadora de maíz, clasificadora de papa, etc.

Como los sistemas de soporte, los sistemas de proceso pueden ser divididos en tres tipos (Figura 2): reversibles, no reversibles y no direccionados. Los procesos reversibles son aquellos que pueden ser regresados a su concepción inicial como la clasificación, la compactación, etc. Los procesos no reversibles son aquellos que no pueden volver a su estado inicial como por ejemplo el corte, la molienda, etc. Como su nombre lo indica los procesos no direccionados son aquellos que no tienen dirección. Ejemplo: transporte, medición o control y almacenamiento de materiales.

## PROBLEMAS

1. Convierta las siguientes cantidades a expresiones en unidades SI apropiadas.
  - a. Un esfuerzo de 20000 psi

- b. Una fuerza de 350 lb
  - c. Un momento de 1200 lb-in
  - d. Un área de 2,4 in<sup>2</sup>
  - e. Un módulo de elasticidad de 21 Mpsi
  - f. Una velocidad de 45 millas/h
  - g. Un volumen de 60 in<sup>3</sup>
  - h. Una longitud de 60 in
  - i. Un esfuerzo de 90 kpsi
  - j. Una presión de 160 psi
  - k. Un módulo de sección de 11,2 in<sup>3</sup>
  - l. Un peso unitario de 2,61 lb/ft
  - m. Una deflexión de 0,002 in
  - n. Una velocidad de 1200 ft/min
  - o. Un volumen de 8 galones
  - p. Un área de 100 acres
  - q. La velocidad de un tractor que recorre 180 pies en 40 segundos
  - r. Una potencia de un motor de 5 HP
  - s. Un caudal de 60 galones por minuto
2. Una cosechadora de maíz de dos surcos, separados 90 cm entre sí, recorre 80 m en 27 segundos. Cosecha 200 libras en 40 segundos, tiene 30% de pérdidas de tiempo. Su jornada diaria de trabajo es de 9 horas, consume 3 galones de combustible por hora, y el combustible cuesta \$6000 por galón. Determine:
- a. La velocidad de la cosechadora en millas por hora (mph) y km/h.
  - b. Cuál es el consumo de combustible en litros por día de trabajo.
  - c. Cuántas hectáreas cosecha por día de trabajo, cuántas cuadras por hora.
  - d. Cuál es la producción de ese lote en toneladas por ha (Asumir que no hay pérdidas de producto al cosechar).
  - e. Cuántos kilos recoge la cosechadora por hora de trabajo.
3. Una aspersora de 12 boquillas separadas 0.70 m entre sí, se utiliza para hacer una aplicación de insecticidas. La aspersora descarga 2 galones por boquilla por cada 250 m recorridos. Si la eficiencia es del 80%, la velocidad de operación 5 km/h y trabaja 10 horas por día:
- a. Calcule la dosis que se está aplicando por ha, cuadra y acre.
  - b. Si se tiene un lote de maíz de 18 ha, cuántas horas tardará en ser asperjado.
  - c. Cuántas hectáreas se cubren en 300 horas de trabajo.

- d. Si la aspersora recorre una milla en forma continua, cuántos galones aplica en ese recorrido y cuánto tiempo gasta para cubrirlo.
4. Halle los factores unidad que relacionan:
- Acres y pulgadas cuadradas
  - Kilómetros por hora y pies por segundo
  - Metros cúbicos y galones
  - Galones por segundo y metros cúbicos por hora
  - Milla cuadrada y acres
  - Centímetros cúbicos y pulgadas cúbicas
  - Galón y pulgadas cúbicas
  - Galón y pintas
  - Galón y cuartos.
5. El eje de una máquina tarda 0,08 segundos para dar un giro, calcule su frecuencia en revoluciones por minuto (rpm) y en herz (Hz)  $1\text{Hz} = 1 \text{ ciclo/segundo}$ .
6. ¿Cuántos metros cúbicos de agua se pueden recoger en una hectárea durante un aguacero de 100 mm de precipitación?
7. ¿Cuál es el caudal en litros por segundo de una acequia que tiene una sección de 3 pies cuadrados y el agua tiene una velocidad de 3 km/h?
8. La energía almacenada (U) en un resorte helicoidal está dada por la ecuación:  $U = 4F^2D^3n/d^4G$ . Si  $F = 4\text{N}$ ,  $D = 11\text{mm}$ ,  $n = 36$ , (número adimensional),  $G = 79.3 \text{ GPa}$  y  $d = 1,2 \text{ mm}$ . Calcule la energía almacenada en J.
9. La fórmula para la deflexión (y) de cierto tipo de viga es:
- $$y = \frac{64F\ell^3}{3\pi E d^4}$$
- Si  $F = 0.45 \text{ kN}$ ,  $\ell = 3000 \text{ mm}$ , si  $E = 207 \text{ GPa}$  y  $d = 19 \text{ mm}$ . Determine la deflexión en unidades de micras ( $\mu\text{m}$ )
10. En la fórmula del problema 9 qué fuerza en kN se requiere para producir una deflexión de 1,50 mm, si  $\ell = 250 \text{ mm}$ ,  $E = 207 \text{ GPa}$  y  $d = 20 \text{ mm}$ .
11. En la fórmula del problema 9, qué longitud ( $\ell$ ) de viga, se necesita para generar una deflexión de 2 mm, si  $E = 207\text{GPa}$ ,  $F = 0.55 \text{ kN}$  y  $d = 10 \text{ mm}$ .

12. Teniendo en cuenta las reglas dadas en el Anexo 1 (Sistema Internacional) como redondeo de cifras, elección de prefijos, unidades recomendables, etc., resuelva las siguientes relaciones:
- $\sigma = M/Z$ , donde  $M = 200 \text{ N}\cdot\text{m}$  y  $Z = 15.3 \text{ cm}^3$
  - $\sigma = F/A$ , donde  $F = 42 \text{ kN}$  y  $A = 6 \text{ cm}^2$
  - $y = Fl^3/3EI$ , donde  $F = 1200 \text{ N}$ ,  $l = 800 \text{ mm}$ ,  $E = 207 \text{ GPa}$ ,  $I = 6.4 \text{ cm}^4$
  - $\Phi = Tl/GJ$ , donde  $J = \pi d^4/32$ ,  $T = 100 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,  $l = 250 \text{ mm}$ ,  $G = 79.3 \text{ GPa}$   
y  
 $d = 25 \text{ mm}$ . Convierta los resultados a grados de ángulo.
  - $\sigma = F/wt$ , donde  $F = 600 \text{ N}$ ,  $w = 20 \text{ mm}$  y  $t = 6 \text{ mm}$
  - $I = bh^3/12$ , donde  $b = 8 \text{ mm}$  y  $h = 24 \text{ mm}$
  - $I = \pi d^4/64$ , donde  $d = 32 \text{ mm}$
  - $\tau = 16T/\pi d^3$  donde  $T = 16 \text{ N}\cdot\text{m}$  y  $d = 25 \text{ mm}$
  - $\tau = F/A$ , donde  $A = \pi d^2/4$ ,  $F = 120 \text{ kN}$  y  $d = 20 \text{ mm}$
  - $\sigma = Fa/\pi d^3$ , donde  $F = 800 \text{ N}$ ,  $a = 8000 \text{ mm}$ ,  $d = 32 \text{ mm}$
  - $Z = (\pi/32d)(d^4 - d_i^4)$  para  $d = 36 \text{ mm}$  y  $d_i = 26 \text{ mm}$
  - $K = d^4 G/8D^3 N$ , donde  $d = 1.6 \text{ mm}$ ,  $G = 79.3 \text{ GPa}$ ,  $D = 19.2 \text{ mm}$  y  $N = 32$  (número adimensional)

## CAPITULO II. ESFUERZO Y DEFORMACION EN ELEMENTOS MECANICOS

### 1. ANÁLISIS DEL ESFUERZO

#### 1.1 Introducción

El diseñador debe tener la certeza que la resistencia de la pieza que diseñe siempre sea mayor que el esfuerzo atribuido a cualquier carga exterior. Cuando un elemento de un mecanismo es sometido a cargas externas de tensión, compresión, flexión, torsión o combinación de ellas, generan esfuerzos internos que tienden a modificar la estructura reticular del material. En cada sección del material, los esfuerzos se cuantifican por unidad de área.

#### 1.2 Estado general del esfuerzo

En un punto determinado de un elemento mecánico con un sistema de ejes referenciados, se coloca un cubo infinitesimal del material cuyas caras sean perpendiculares a los ejes, con tensiones o esfuerzos normales  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  (positivos, salen de la cara del elemento) y seis esfuerzos cortantes positivos:  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{zy}$ ,  $\tau_{zx}$  y  $\tau_{xz}$  (Figura 4).

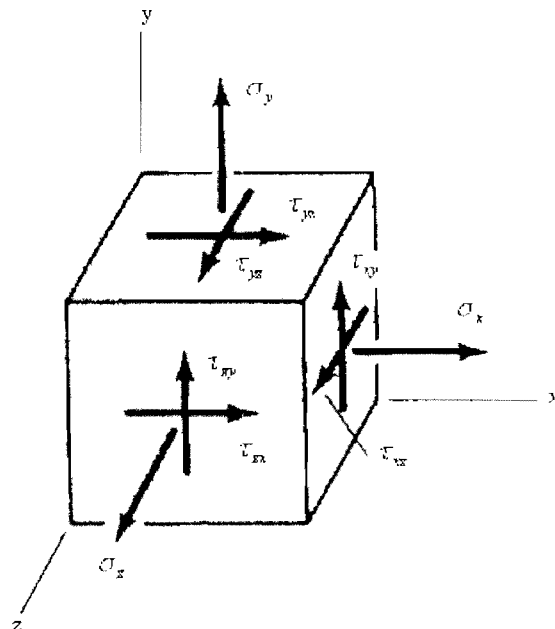


Figura 4. Estado general del esfuerzo tridimensional.



En el equilibrio estático:

$$\tau_{xy} = \tau_{yx}; \quad \tau_{yz} = \tau_{zy} \text{ y } \tau_{zx} = \tau_{xz} \quad (2.1)$$

Los nueve esfuerzos mostrados, se pueden acomodar en forma matricial en el denominado tensor de esfuerzo y representa el estado general de esfuerzo en un punto.

$$\text{Tensor } (\sigma) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{zx} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

El estado general de esfuerzo en un punto como el mostrado en la figura 4, no dan una visión clara de la manera como las fuerzas se transmiten dentro del material. Es necesario hacer uso de teoremas y definiciones que aclaran esta situación:

- En cualquier estado de esfuerzo en un punto, un elemento se puede orientar de tal manera que los esfuerzos cortantes se conviertan en cero sobre todas sus superficies.
- Las tres direcciones normales a las superficies del elemento se denominan direcciones principales.
- Los tres esfuerzos normales ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) que actúan en ese elemento se llaman esfuerzos principales. En figura 5 se ilustra gráficamente la naturaleza de la transformación involucrada, en donde los esfuerzos equilibrantes en las caras negativas no son mostrados.

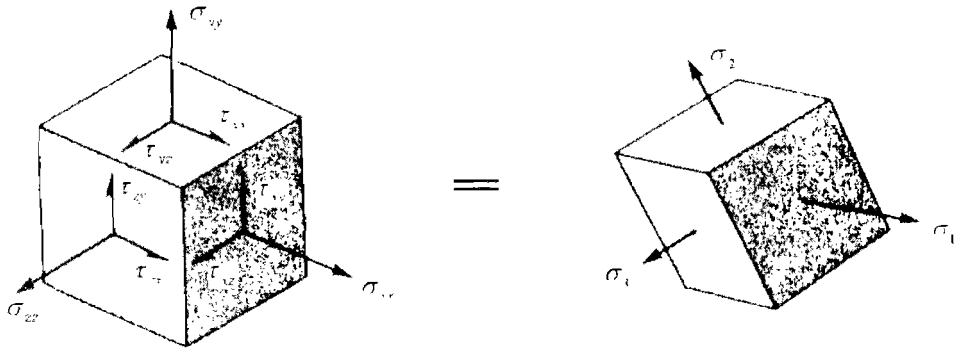


Figura 5. Transformación de los ejes a un sistema de ejes principales. El tensor de esfuerzo básico para el estado de esfuerzo en un punto, en términos de los esfuerzos principales, se puede escribir como:

$$\text{Tensor } (\sigma), \text{ principal} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Un estado de esfuerzo plano o biaxial, en donde se supone que las acciones exteriores sólo provocan esfuerzos en el plano xy, es mostrado en la Figura 6.

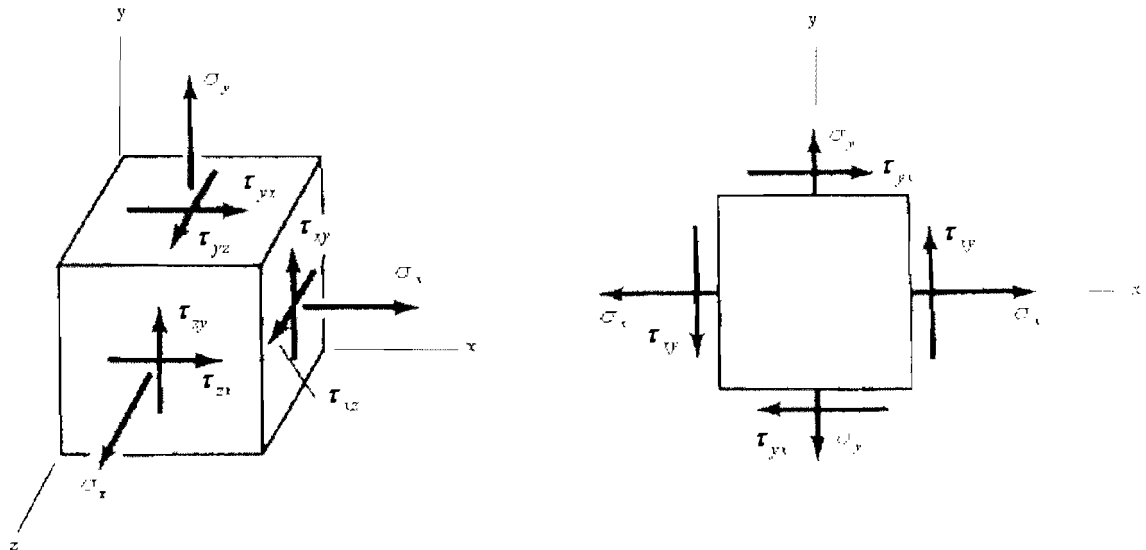


Figura 6. Estado general de esfuerzo biaxial.

En forma tensorial, el estado se describe como:

$$\text{General: Tensor } (\sigma) = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Referida a los ejes principales:

$$\text{Tensor } (\sigma), \text{ principal} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

En el estado bidimensional interesa conocer cuales son los esfuerzos  $\sigma$ , y  $\tau$  en cualquier plano, definido por el ángulo  $\phi$  en la figura 7 a partir de los esfuerzos  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ , y  $\tau_{xy}$  en el plano de referencia  $xy$  considerando un elemento de material de espesor igual a la unidad.

Realizando el equilibrio de fuerzas:

$$\sigma \cos \phi ds - \sigma_x dy - \tau_{xy} dx - \tau \sin \phi ds = 0; \quad \sigma \sin \phi ds - \sigma_y dx - \tau_{xy} dy + \tau \cos \phi ds = 0$$

Dividiendo por  $ds$  y dado que  $\frac{dx}{ds} = \sin \phi$  y  $\frac{dy}{ds} = \cos \phi$ , se obtiene:

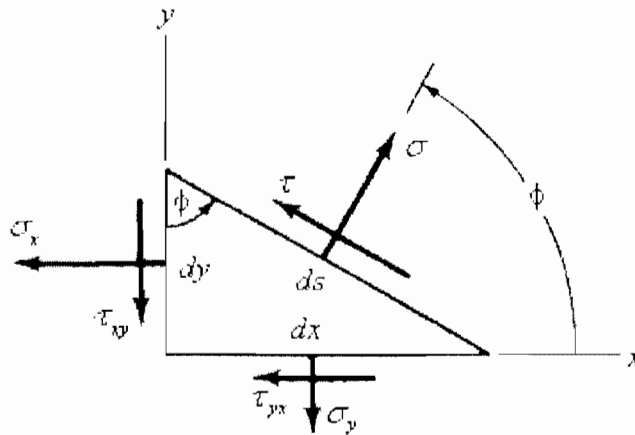


Figura 7. Estado general de esfuerzo para un ángulo  $\phi$

$$\sigma \cos \phi - \sigma_x \cos \phi - \tau_{xy} \sin \phi - \tau \sin \phi = 0$$

$$\sigma \sin \phi - \sigma_y \sin \phi - \tau_{xy} \cos \phi + \tau \cos \phi = 0$$

Organizando en forma matricial:

$$\begin{pmatrix} \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ \text{sen}\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_x \cos\phi + \tau_{xy} \text{sen}\phi \\ \sigma_y \text{sen}\phi + \tau_{xy} \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & -\text{sen}\phi \\ \text{sen}\phi & \cos\phi \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \cos\phi + \tau_{xy} \text{sen}\phi \\ \sigma_y \text{sen}\phi + \tau_{xy} \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \sigma \\ \tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \text{sen}\phi \\ -\text{sen}\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_x \cos\phi + \tau_{xy} \text{sen}\phi \\ \sigma_y \text{sen}\phi + \tau_{xy} \cos\phi \end{pmatrix}$$

$$\sigma = \sigma_x \cos^2\phi + \tau_{xy} \cos\phi \cdot \text{sen}\phi + \sigma_y \text{sen}^2\phi + \tau_{xy} \cos\phi \cdot \text{sen}\phi$$

$$\tau = -\sigma_x \cos\phi \text{sen}\phi - \tau_{xy} \text{sen}^2\phi + \sigma_y \cos\phi \cdot \text{sen}\phi + \tau_{xy} \cos^2\phi$$

Se tiene:

$$\sigma = \sigma_x \cos^2\phi + \sigma_y \text{sen}^2\phi + 2\tau_{xy} \cos\phi \cdot \text{sen}\phi$$

como:  $\cos^2\phi = \frac{1 + \cos 2\phi}{2}$  y  $\text{sen}^2\phi = \frac{1 - \cos 2\phi}{2}$ , se obtiene:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\phi + \tau_{xy} \text{sen} 2\phi, \text{ y} \quad (2.6)$$

$$\tau = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \text{sen} 2\phi + \tau_{xy} \cos 2\phi \quad (2.7)$$

Para conocer la dirección donde los esfuerzos normales son máximos (principales), o lo que es lo mismo, donde los cortantes son nulos  $\tau = 0$ , se deriva (2.6) en función del ángulo  $\phi$ :

$$\frac{d\sigma}{d\phi} = 0 \rightarrow \tan 2\phi = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

con dos soluciones, una para  $2\phi$  y otra para  $2\phi + 180^\circ$

Se obtiene:

$$\sigma_1, \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (2.8)$$

Para conocer la dirección donde se encuentran los esfuerzos cortantes máximos, se deriva (2.7) en función del ángulo  $\phi$ :

$$\frac{d\tau}{d\phi} = 0 \rightarrow \tan 2\phi = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}$$

Obteniendo:

$$\tau_{\max, \min} = \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

En los planos principales los esfuerzos cortantes son nulos. Sin embargo en los planos con cortante máximo si existe esfuerzo normal de valor  $\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$ .

Eliminando la variable  $\phi$  de las ecuaciones (2.6) y (2.7) resulta:

$$\left[\sigma - \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)\right]^2 + \tau^2 = \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2 \quad (2.10)$$

que al representar en el sistema cartesiano, en que el eje de ordenadas son esfuerzos cortantes  $\tau$ , y el eje de abscisas esfuerzos normales  $\sigma$ ,

se obtiene la ecuación de una circunferencia de centro  $\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}, 0\right)$ , y

de radio  $\sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$  llamada círculo de Mohr, que proporciona

los esfuerzos normal y cortante correspondiente al plano definido por un ángulo  $\phi$  respecto al plano principal.

En la figura 8 se establece un sistema de coordenadas, en el que los esfuerzos normales se representan como abscisas y los esfuerzos cortantes como ordenadas. En el eje de las abscisas los esfuerzos normales positivos se marcan a la derecha del origen 0 y los esfuerzos normales negativos (de compresión), a la izquierda. Los esfuerzos cortantes positivos o en el sentido del reloj (s.r.) se trazan hacia arriba

en el eje de las ordenadas y los esfuerzos cortantes negativos en el sentido contrario al reloj (s.c.r) se trazan hacia abajo.

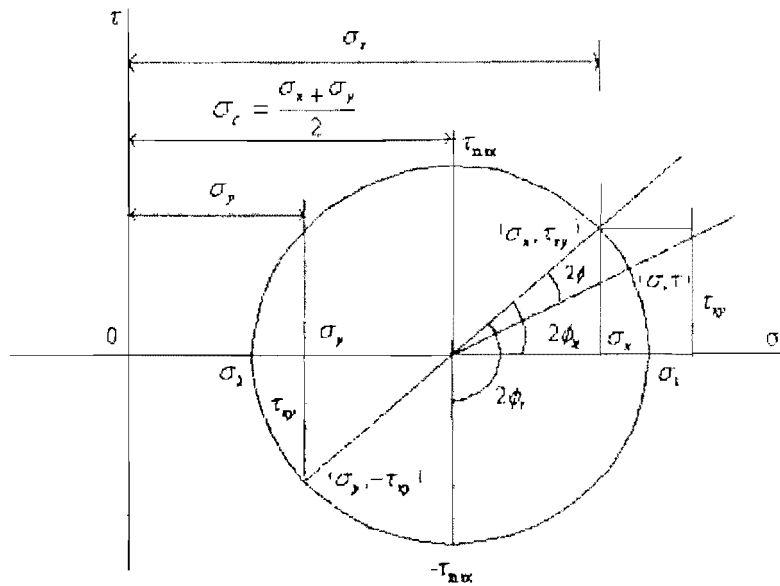


Figura 8. Diagrama del círculo de Mohr

### 1.3 Relación esfuerzo-deformación

La presencia de esfuerzos en un material conlleva a su deformación. Se procura siempre que el esfuerzo no sobrepase el límite de deformación elástica, encontrándose que en la mayoría de los materiales existe una relativa proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación en la zona elástica. En la zona elástica la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo normal ( $\sigma$ ) y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), se conoce como módulo de elasticidad ( $E$ ). El esfuerzo cortante tangencial  $\tau$  también guarda una relación proporcional con la deformación angular, deformación por cortante ( $\gamma$ ), con el módulo de rigidez o de deformación transversal ( $G$ ).

Se pueden escribir las relaciones:

$$\sigma = E\epsilon ; \quad \tau = G\gamma \quad (\text{ley de Hooke}). \quad (2.11)$$

La deformación unitaria ( $\epsilon$ ) es la relación entre la deformación total de la barra ( $\delta$ ) y la longitud original ( $l$ ).  $\epsilon = \delta/l$ .

$$(2.12)$$

La deformación total de una barra cargada axialmente ( $F$ ), de longitud ( $\ell$ ), sección transversal ( $A$ ) se pueden definir como:  $\delta = F\ell / AE$  (2.13)

Las constantes de proporcionalidad ( $E$  y  $G$ ) se relacionan mediante el coeficiente de Poisson ( $\nu$ ):  $E = 2G(1 + \nu)$  (2.14)

#### 1.4 Esfuerzos que afectan a una pieza

- Esfuerzos normales de tensión y compresión. Se dice que una Sección ( $A$ ) de una barra de una pieza está sometida a un esfuerzo axial simple, cuando la resultante de las fuerzas a la que está sometida la sección es perpendicular a ésta (Figura 9). El esfuerzo en este caso es un esfuerzo normal, uniformemente distribuido y se calcula por  $\sigma = F/A$  (2.15), este esfuerzo será positivo si  $F$  genera tensión o tracción en las fibras y negativo o de compresión si se genera el efecto contrario.

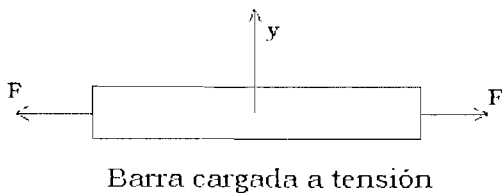


Figura 9. Barra cargada a tensión

- Esfuerzos normales por flexión. Una viga es un miembro que soporta cargas transversales a sus ejes. Estas cargas generan momentos flectores en la viga, que traen como resultado los esfuerzos normales por flexión, ya sea de tensión o compresión. El esfuerzo máximo por flexión en la viga ocurre en la parte más alejada del eje neutro de la sección. En este punto, el esfuerzo de flexión se calcula como:

$$\sigma = Mc/I \quad (2.16)$$

Donde:  $M$  = momento flector en la sección

$I$  = momento de inercia de la sección con respecto a su eje neutro.

$c$  = distancia del eje neutro a la fibra más alejada de la sección transversal de la viga.

La figura 10 muestra una típica distribución de esfuerzos en la sección transversal de la viga. La magnitud del esfuerzo por flexión varía linealmente dentro de la sección transversal desde un valor de cero en el eje neutro a un esfuerzo de tensión máximo a un lado del eje neutro y un esfuerzo de compresión máximo al otro.

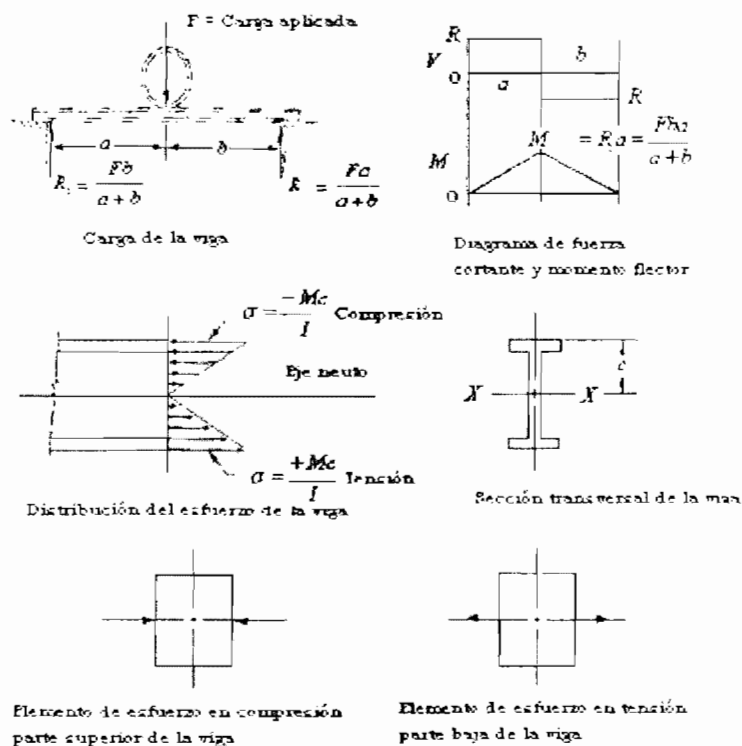


Figura 10. Distribución de los esfuerzos normales por flexión de la sección transversal de una viga.

La ecuación (2.16) está sujeta a las siguientes condiciones:

- La viga se somete a flexión pura, esto es que los esfuerzos cortantes son cero o despreciables y que no hay presencia de otros tipos de carga (axial o torsional)
- El material de la viga cumple la ley de Hooke y es homogéneo e isótropo.
- El módulo de elasticidad del material es el mismo para tensión y compresión.
- La viga es inicialmente recta y tiene sección transversal constante.
- Cualquier sección transversal plana de la viga permanece plana durante la flexión.

- Ninguna parte de la viga puede fallar por aplastamiento, corrugación o pandeo lateral.

También es común escribir la ecuación (2.16) como:

$$\sigma = M/l/c \text{ ó } \sigma = M/Z \quad (2.17)$$

Donde  $Z = I/c$ , conocido como módulo de la sección. En la Tabla 2.1, se presentan algunas propiedades de las secciones, más utilizadas en este texto.

- Esfuerzo cortante en vigas.

La mayoría de las vigas están sometidas a fuerzas cortantes y a momentos flexionantes. Una viga sometida a cargas transversales en sus ejes puede experimentar una fuerza cortante, denotada por  $V$  en el análisis de vigas, y es generalmente calculada por variación de la fuerza cortante en toda la longitud de la viga para trazar el diagrama de fuerza cortante. El esfuerzo cortante vertical puede ser calculado por:

$$\tau = VQ/It \quad (2.18)$$

Donde:  $V$  = fuerza cortante vertical

$I$  = momento de inercia de la sección total con respecto al eje neutro.

$t$  = espesor o ancho de la sección donde el esfuerzo cortante va a ser calculado.

$Q$  = momento estático de la sección, es el momento del área vertical con respecto al eje neutro =  $Ap(y)$

Donde  $Ap$  = parte del área de la sección donde el esfuerzo va a ser calculado

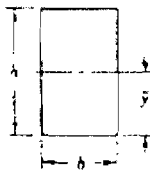
$y$  = distancia desde el eje neutro de la sección al centroide del área  $Ap$ .

La ecuación (2.18) puede ser engorrosa debido a la necesidad de evaluar el momento estático  $Q$ . El esfuerzo cortante máximo debido a la flexión es entonces calculado dependiendo de la forma de la sección de la viga:

TABLA 2.1 PROPIEDADES DE LAS SECCIONES

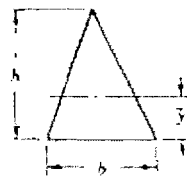
$A$  = área  
 $I$  = momento de inercia  
 $J$  = momento polar de inercia  
 $Z$  = módulo de sección  
 $K$  = radio de giro  
 $\bar{y}$  = distancia al centroide

### Rectángulo



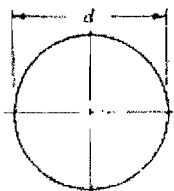
$$\begin{aligned}
 A &= bh & k &= 0.289h \\
 I &= \frac{bh^3}{12} & \bar{y} &= \frac{h}{2} \\
 Z &= \frac{bh^2}{6}
 \end{aligned}$$

### Triángulo



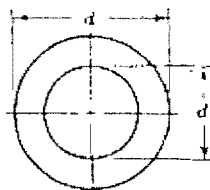
$$\begin{aligned}
 A &= \frac{bh}{2} & k &= 0.236h \\
 I &= \frac{bh^3}{36} & \bar{y} &= \frac{h}{3} \\
 Z &= \frac{bh^2}{24}
 \end{aligned}$$

### Círculo



$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi d^2}{4} & J &= \frac{\pi d^4}{32} \\
 I &= \frac{\pi d^4}{64} & k &= \frac{d}{4} \\
 Z &= \frac{\pi d^3}{32} & \bar{y} &= \frac{d}{2}
 \end{aligned}$$

### Corona circular



$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi}{4} (d^2 - d_1^2) & J &= \frac{\pi}{32} (d^4 - d_1^4) \\
 I &= \frac{\pi}{64} (d^4 - d_1^4) & k &= \sqrt{\frac{d^2 + d_1^2}{16}} \\
 Z &= \frac{\pi}{32d} (d^3 - d_1^3) & \bar{y} &= \frac{d}{2}
 \end{aligned}$$

- Para una viga de sección rectangular:  $\tau_{\text{máx}} = 3V/2A$ , donde  $A$  es el área de la sección transversal de la viga.
- Para una viga de sección circular maciza:  $\tau_{\text{máx}} = 4V/3A$
- Para una viga con sección en corona circular:  $\tau_{\text{máx}} = 2V/A$

- Para una viga en I:  $\tau_{\text{máx}} = V/A_{\text{alma}}$ , donde  $A_{\text{alma}} = (t)(h)$ :  $t$  = espesor del alma,  $h$  = altura del alma.

- Esfuerzo cortante torsional. Un vector momento que sea colineal con un eje geométrico de un elemento mecánico se conoce como vector momento torsionante (T). Una barra sometida a tal momento se dice que está en torsión. Para una barra de sección circular el ángulo de torsión se puede calcular por:  $\theta = \frac{Tl}{GJ}$

$$(2.19)$$

Donde: T = momento torsor

l = longitud de la barra

G = módulo de rigidez

J = momento polar de inercia del área transversal

Si se requiere calcular el esfuerzo cortante torsional en un punto interior del eje, la fórmula usada es:  $\tau = Ty/J$  (2.20)

Donde: y = distancia radial del centro del eje al punto de interés

En el caso de una barra maciza, el esfuerzo cortante torsional ( $\tau$ ) vale cero en el centro y es máximo en la superficie. Si r es el radio de la superficie exterior, entonces el esfuerzo cortante será:  $\tau_{\text{máx}} = Tr/J$  (2.21)

Por lo general el momento de torsión T se determina de la potencia a transmitir (hp) y de la velocidad del eje rotatorio (n). En el sistema gravitacional inglés:  $T = 63000 \text{ hp}/n$  (2.22)

En el sistema internacional:  $\text{hp} = T.w$  (2.23)

Donde: hp = potencia en W

T = par de rotación en N.m

w = velocidad angular en rad/s

### 1.5 Combinación de esfuerzos

Los esfuerzos y las deformaciones son producidos en las piezas por las fuerzas que se ejercen sobre ella. Es natural suponer que el efecto resultante en un punto cualquiera es la suma de los efectos de las

cargas presentes. La idea de que el efecto resultante es la suma de los efectos separados se conoce como principio de superposición, que es válido sólo para aquellos casos de carga en que la magnitud del esfuerzo y la deflexión es directamente proporcional a la carga.

Para determinar los esfuerzos resultantes en un elemento, se calculan separadamente los esfuerzos producidos por cada carga y luego se suman sus efectos teniendo en cuenta sus signos y direcciones.

En el caso de una pieza de sección circular sometida a fuerza axial  $(F)_x$ , a

a un momento flexionante  $(M)$  y un momento torsor  $(T)$ , los valores de  $\sigma$  y  $\tau$  en la sección transversal, serán:  $\sigma = (F/A) \pm (My/I)$   
(2.24)

(correspondiente a una fibra situada a una distancia  $y$  del eje neutro),

$$\tau = (4V/3A) \pm (Tr/J) \quad (2.25)$$

(correspondiente a los puntos exteriores de la fibra neutra)

## 1.6 Concentración del esfuerzo

Las ecuaciones de esfuerzo básicas (tensión, compresión, flexión y torsión) se derivan suponiendo que no hay irregularidades en el elemento analizado. Sin embargo, los ejes rotatorios tienen hombros o resaltos para la ubicación de los cojinetes y para soportar cargas axiales, los ejes deben tener ranuras para sujetar poleas y engranajes y otras partes requieren orificios y surcos para aceite o muescas o mellas de diversos tipos.

Cualquier discontinuidad en una parte de la máquina altera la distribución de esfuerzos en los alrededores de la discontinuidad, no siendo válidas las ecuaciones básicas de esfuerzo. A las discontinuidades se les conoce con el nombre de intensificadores de esfuerzo, y a las regiones donde ocurre se les llama área de concentración del esfuerzo, cuyo efecto es altamente localizado.

Definiendo los factores de concentración de esfuerzos como los factores por medio del cual el esfuerzo máximo actual excede al esfuerzo nominal,  $\sigma_{nom}$  o  $\tau_{nom}$ , siendo  $K_t$  el símbolo para esos factores:

$$\sigma_{\text{máx}} = K_t \sigma_{\text{nom}} \text{ y } \tau_{\text{máx}} = K_t \tau_{\text{nom}} \quad (2.26)$$

Los valores de  $K_t$  dependen de la forma de la discontinuidad, la geometría específica y el tipo de carga. Los factores de concentración de esfuerzos han sido determinados para una gran variedad de formas geométricas y tipos de carga. El resumen mejor conocido de resultados para varias formas geométricas, es el trabajo de Peterson, que se basa en trabajos fotoelásticos hechos antes de 1951. Más recientemente, los investigadores han desarrollado modelos matemáticos para aproximar estos datos clásicos. En general, un factor de concentración de esfuerzos se aplica al esfuerzo calculado para la sección transversal neta o más pequeña. Los valores de  $K_t$  para varios tipos de elevadores de esfuerzo, que se encuentran con frecuencia en el diseño, están disponibles en libros de texto y en manuales preparados para este propósito. En el Anexo 2, se presentan los factores de concentración de esfuerzo para algunas formas geométricas y tipos de carga.

## 2. CONSIDERACIONES REFERENTE A LA RIGIDEZ Y LA DEFORMACIÓN

### 2.1. Introducción

Un elemento mecánico se considera rígido cuando no se deforma, no se flexiona y no se tuerce demasiado al aplicársele exteriormente una carga. Los términos rigidez y flexibilidad son expresiones cualitativas que dependen del caso.

En el diseño de máquinas, el análisis de la deformación se aplica de diferentes maneras:

- Un retenedor o anillo de retención debe ser lo suficientemente flexible para montarlo sin que sufra deformación permanente y debe ser lo suficientemente rígido para mantener unidas las piezas ensambladas.
- En una caja de velocidad de un tractor, los engranajes deben estar sostenidos por ejes rígidos; si fueran flexibles los dientes no engranarían adecuadamente, produciendo ruido, desgaste o fallas antes de lo previsto.
- Los dientes de un vibrocultivador deben ser lo suficientemente flexibles para vencer los obstáculos que se encuentran en el terreno.

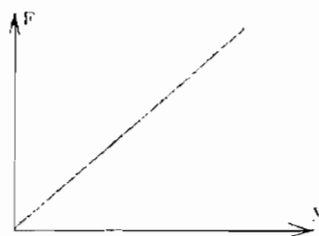
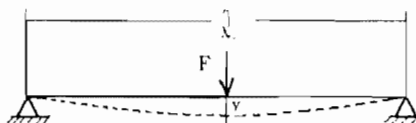
- La silla del tractorista debe diseñarse de tal manera que se adapte a todas las condiciones del terreno, pues la comodidad del cuerpo humano se obtiene únicamente dentro de un intervalo limitado de frecuencias.

## 2.2. Módulos y constantes de resortes

**Elasticidad:** propiedad de un material que le permite recobrar su configuración original después de haber sufrido una deformación.

**Resorte:** es un elemento mecánico que puede ejercer una fuerza después de ser deformado.

En la viga simplemente apoyada de la figura 11, la flexión  $y$  está relacionada con la fuerza  $F$  en tanto no exceda el límite de elasticidad del material. La viga se considera como un resorte lineal.



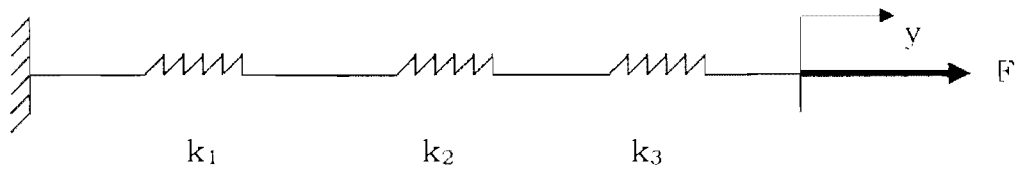
Resorte Lineal

Figura 11. Resorte Lineal

En la mayoría de los casos que se tratarán aquí  $F$  y  $y$  son lineales y  $k$  es una constante que se conoce como constante de resorte y se escribe:

$$k = \frac{F}{y} \quad (2.27)$$

Para el caso de resortes en serie:



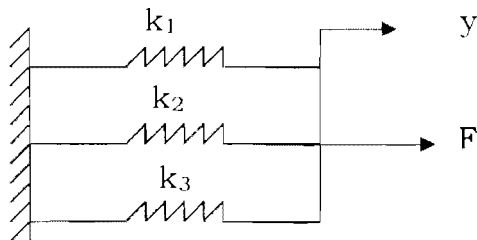
$$y = \frac{F}{k} = \frac{F}{k_1} + \frac{F}{k_2} + \frac{F}{k_3}$$

F se moverá a una distancia igual a la suma de la deformación de cada resorte.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3}} \quad (2.28)$$

Resortes en paralelo:



Todos los resortes tienen la misma deformación, por lo tanto:

$$F = k_1 y + k_2 y + k_3 y$$

$$F = k y$$

$$k = k_1 + k_2 + k_3 \quad (2.29)$$

### 2.3. Tensión, compresión y torsión

La deformación total de una barra (sección transversal uniforme)

cargada a tensión:  $\delta = \frac{F\ell}{AE}$ ; si  $k = \frac{F}{\delta}$ , entonces:

$$k = \frac{AE}{l} \left[ \frac{\text{kg}}{\text{cm}}, \frac{\text{lb}}{\text{pul}}, \frac{\text{N}}{\text{m}} \right] \quad (\text{No se aplica a barras largas}) \quad (2.30)$$

La deformación angular o distorsión de una barra de sección circular uniforme, sometida a un momento torsionante T:  $\theta = \frac{Tl}{GJ}$  [Rad]

$$k = \frac{T}{\theta} = \frac{GJ}{l} \left[ \frac{\text{kg.cm}}{\text{rad}}, \frac{\text{lb.pulg}}{\text{rad}}, \frac{\text{N.m}}{\text{rad}} \right] \quad (2.31)$$

#### 2.4. Deformación debida a flexión

Un concepto fundamental para una viga en flexión es:

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2}$$

Donde: M = momento flexionante

x = posición sobre la viga medida a lo largo de su longitud

y = deflexión

Si se crea una ecuación de la forma  $y = f(x)$ , y en función de x, está se relacionaría a los otros factores, como sigue:

$$y = f(x) \quad (2.32)$$

$$\theta = \frac{dy}{dx} \quad (2.33)$$

$$\frac{M}{EI} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (2.34)$$

$$\frac{V}{EI} = \frac{d^3y}{dx^3} \quad (2.35)$$

$$\frac{q}{EI} = \frac{d^4y}{dx^4} \quad (2.36)$$

q = término general para la distribución de la carga en la viga.

Cantidades que serán positivas si tienen la misma dirección de  $y \rightarrow +$

## 2.5. Cálculo de deflexiones

Ya se tienen manuales y tablas que no sólo indican los valores para las deflexiones de diferentes tipos de vigas, sino también los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante. Las tablas son modelos comunes muy utilizados. En el Anexo 3, se presentan las más comúnmente utilizadas en este texto.

Hay casos que no aparecen listados y es necesario emplear uno de los siguientes métodos:

- i. Método del momento del área
- ii. Por funciones de singularidad
- iii. Método gráfico de integración
- iv. Método de superposición
- v. Por integración numérica
- vi. Utilizando el TEOREMA DE CASTIGLIANO

Aquí se recordaran algunos de estos métodos

## 2.6. Energía de deformación

La energía potencial almacenada en un elemento deformado elásticamente una distancia  $y$  es:

$$U = \frac{F}{2} * y ; k = \frac{F}{y} \Rightarrow y = \frac{F}{k} ; \text{por tanto:}$$

$$U = \frac{F^2}{2k} \quad (\text{ecuaciones general: } F \text{ puede ser un momento torsionante o flexionante)}$$

(2.37)

Para una barra a tensión o compresión:  $k = \frac{AE}{\ell}$

$$U = \frac{F^2 \ell}{2AE} \quad (2.38)$$

Para deformación angular  $k = \frac{GJ}{\ell}$  ;  $U = \frac{T^2 \ell}{2GJ} \Rightarrow$  torsión

(2.39)

La energía de deformación debida a cortante directo:

$$U = \frac{F^2 \ell}{2AG} \quad (2.40)$$

La deformación por cortante se puede obtener utilizando:

$$U = \int \frac{CV^2 dx}{2AG} \Rightarrow \text{Corte por flexión} \quad (2.41)$$

Los valores de C dependen de la sección transversal, para sección rectangular tiene un valor de 1.50, circular de 1.33, tubular redonda 2.0 y perfil estructural 1.0.

Para flexión pura:

$$U = \int \frac{M^2 dx}{2EI} \quad (2.42)$$

## 2.7. Teorema de Castigliano

Se puede expresar como: cuando actúan fuerzas sobre sistemas elásticos sujetos a pequeños desplazamientos, el desplazamiento correspondiente en un punto particular a una de ellas ( $\delta$ ), colineal con la fuerza, es igual a la derivada parcial de la energía de deformación total con respecto a esa fuerza:

$$\delta_i = \frac{\partial U}{\partial F_i} \quad (2.43)$$

Se puede aplicar para obtener la deflexión en un punto, aunque ahí no actúe ninguna fuerza o momento flexionante. Para esto se sigue el siguiente procedimiento:

1. Se formula la ecuación de la energía de deformación total U, incluyendo la energía de una fuerza o momento ficticio Q que actúa en el punto cuya deflexión se determinará.
2. Se obtiene una expresión para la deflexión deseada

$$\delta i = \frac{\partial U}{\partial Q_i} \quad (2.44)$$

3. Como  $Q_i$  es ficticia, en la expresión de  $\delta i$  se hace  $Q_i = 0$

## 2.8. Problemas estáticamente indeterminados

Procedimiento:

1. Se escoge la reacción redundante (F o M)
2. Se escriben y se resuelven las ecuaciones de equilibrio estático para las reacciones restantes en términos de la reacción redundante.
3. Se escribe la ecuación de la energía de deformación total U.
4. Se obtiene una expresión para la reacción redundante calculando:
 
$$\frac{\partial U}{\partial R} = 0$$

5. Se despeja R de la expresión resultante.

## 2.9. Elementos sometidos a compresión (Columnas)

El término columna es usado para todos los elementos, excepto aquellos en los que la falla se considera por compresión simple o pura y se dividen en:

1. Columnas largas con carga central
2. Columnas de longitud intermedia con carga central
3. Columnas con carga excéntrica
4. Puntales o columnas cortas con carga excéntricas

## 2.10. Columnas largas con carga central

La relación entre carga crítica, el material y su geometría se muestra en la Figura 12.

COLUMNAS LARGAS CON CARGA CENTRAL

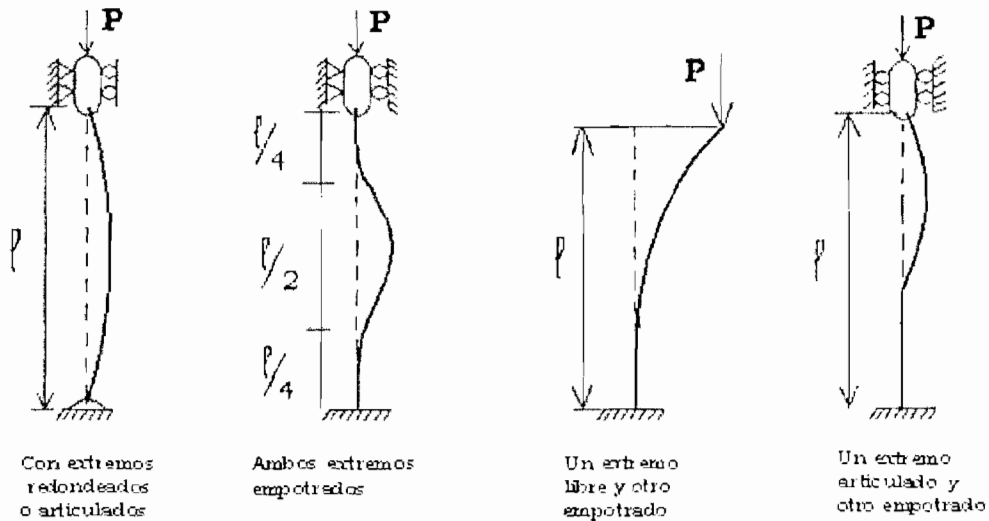


Figura 12. Relación carga crítica y geometría en una columna larga con carga central.

La fórmula de Euler para columnas con extremos redondeados a articulados es bien conocida:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \tag{2.45}$$

$I = Ak^2$ , donde  $A$  = Area de la sección y  $k$  = radio de giro de la sección.

entonces:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{l}{k}\right)^2}; \quad l/k = \text{relación de la esbeltez de la columna} \tag{2.46}$$

$P_{cr}/A \rightarrow$  Carga por unidad de área que se necesita para colocar la columna en una condición de equilibrio inestable. Esto es: cualquier pequeña encorvadura del elemento o un ligero movimiento de apoyo o carga, hará que la columna colapse.

Para las otras condiciones de los extremos, se tiene:

Ambos extremos empotrados:  $P_{cr} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2}$  (2.47)

Un extremo libre y otro empotrado:  $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4l^2}$  (2.48)

Un extremo empotrado y otro articulado:  $P_{cr} = \frac{2\pi^2 EI}{l^2}$  (2.49)

En general:  $P_{cr} = \frac{C\pi^2 EI}{l^2}$ ; (2.50)

ó  $\frac{P_{cr}}{A} = \frac{C\pi^2 E}{(l/k)^2}$  (2.51)

C: Constante de condiciones de los extremos y tiene uno de los siguientes valores teóricos: 1/4, 1, 2, 4.

En la Figura 13, se presenta la curva de Euler, utilizando la ecuación (2-51)

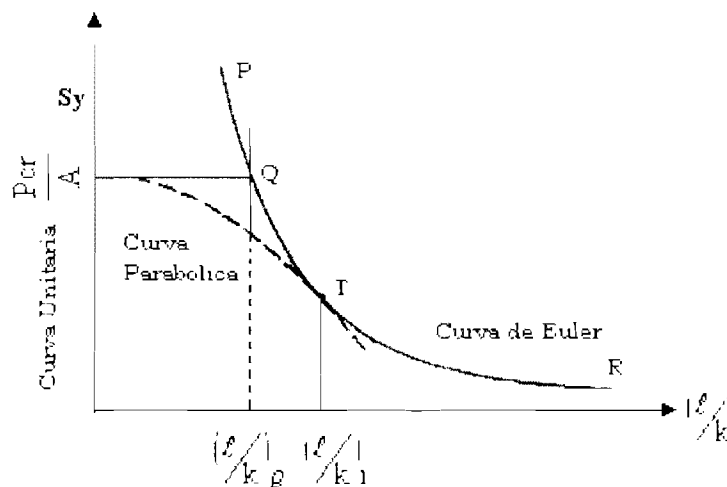


Figura 13. Gráfica de la curva de Euler con  $C = 1$

La falla de una columna es siempre repentina, total e inesperada y en consecuencia peligrosa. Valores alrededor del punto  $(l/k)_Q$  no se deben aplicar los conceptos anteriores. ¿Que se hace?

Se elige un punto T que tiene  $(l/k)_1$  y se utiliza la ecuación de Euler sólo cuando  $(l/k) > (l/k)_1$ . Se recomienda escoger el punto T tal que:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{S_u}{2} \Rightarrow \text{así: } \left(\frac{\ell}{k}\right)_1 = \left(\frac{2\pi^2 CE}{S_y}\right)^{1/2} \quad (2.52)$$

### 2.11 Columnas de longitud intermedia

Se han propuesto varias fórmulas para el intervalo de  $\ell/k$  para el cual no resulta adecuada la fórmula de Euler. La fórmula parabólica o de J. B. Johnson es muy usada:

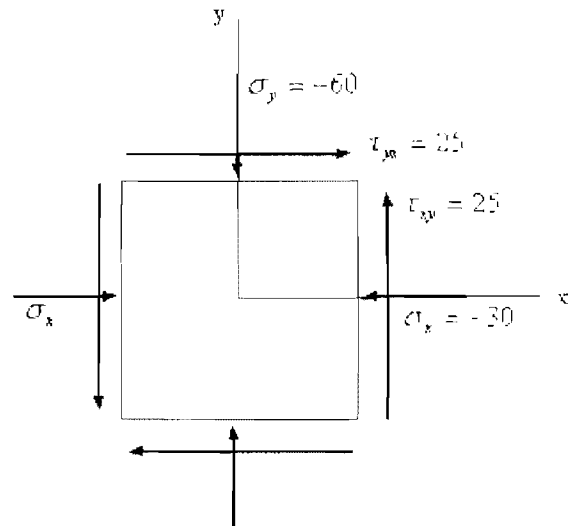
$$\frac{P_{cr}}{A} = a - b \left(\frac{\ell}{k}\right)^2 \quad a = S_y \text{ (ver curva anterior) y } b = \frac{(S_y)^2}{2\pi^2 CE}$$

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \frac{(S_y)^2}{2\pi^2 CE} \left(\frac{\ell}{k}\right)^2 \quad ; \quad \frac{\ell}{k} \leq \left(\frac{\ell}{k}\right)_1 \quad (2.53)$$

### 2.12. Diagrama de flujo para diseño

Dependiendo de la sección transversal, las columnas de Euler-Johnson, generalmente se diseñan sin emplear técnicas de iteración. Para el caso de una columna de sección circular, se pueden seguir los pasos que se resumen en el diagrama de la Figura 14, conociendo  $P_{cr}$ ,  $\ell$ ,  $C, E$  y  $S_y$ .

M  
O  
D  
E  
L  
O  
  
1  
.  
  
U  
n  
  
e



lemento de esfuerzo tiene  $\sigma_x = -30$ ,  $\sigma_y = -60$  y  $\tau_{xy} = 25$  (s.c.r.). Hállense los esfuerzos y las direcciones

principales y dibuje el elemento correspondiente a los esfuerzos principales y el elemento correspondiente al esfuerzo cortante máximo.

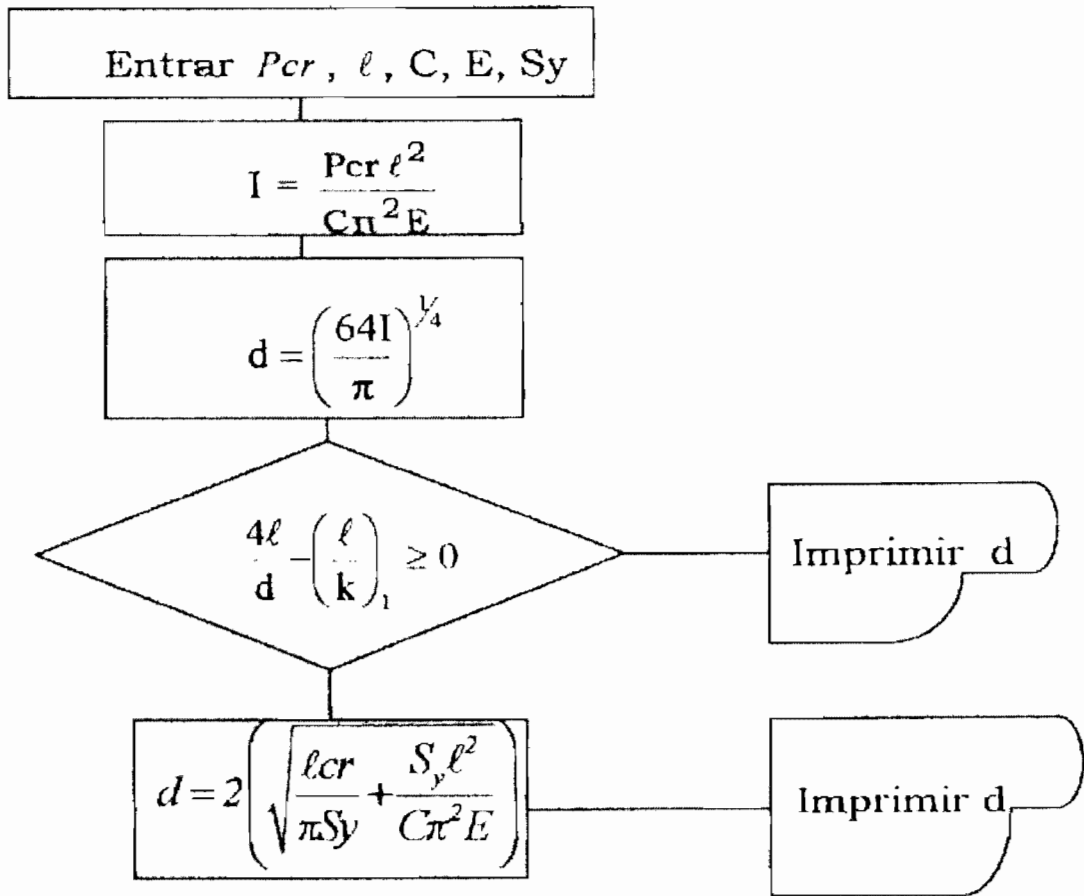
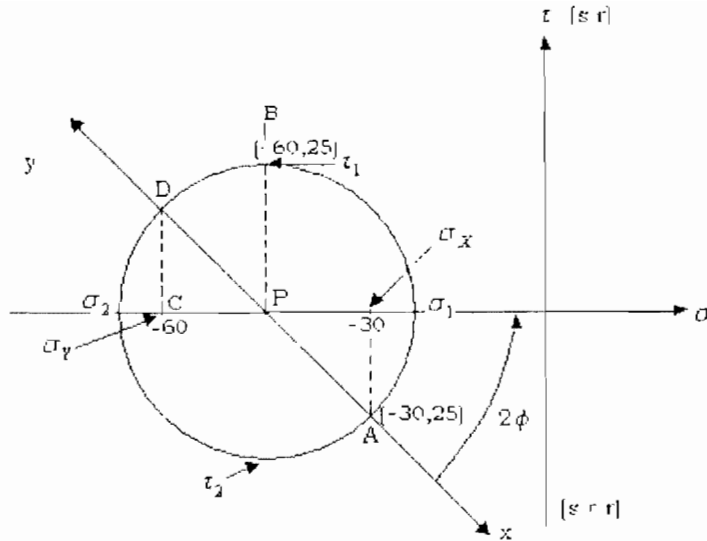


Figura 14. Diagrama de flujo para el diseño de una columna de sección circular tipo Johnson o Euler.



El segmento AD define el diámetro del círculo de Mohr

El eje x es la recta PA

EL eje y es la recta PD

La longitud PA = radio del círculo = PD =  $\tau_1 = \tau_2 = \sqrt{15^2 + 25^2}$

$$\tau_{\text{máx}} = 29.15 \blacklozenge$$

$$\sigma_1 = -30 - 15 + 29.15 = -15.85 \blacklozenge$$

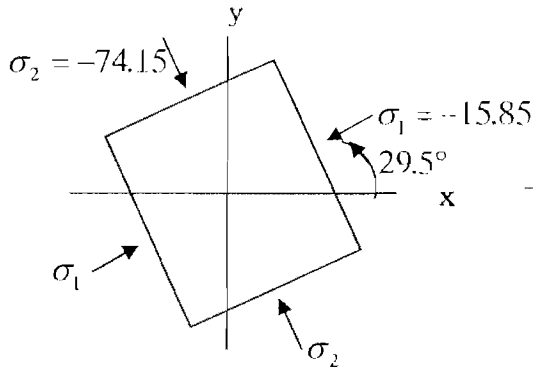
$$\sigma_2 = -30 - 15 - 29.15 = -74.15 \blacklozenge$$

$$\tan 2\phi = \frac{25}{15} = 1.666$$

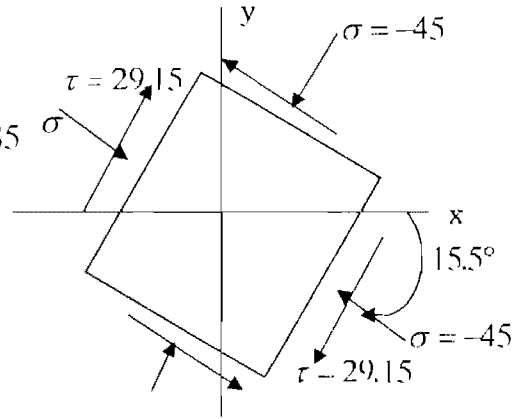
$$2\phi = \tan^{-1} 1.666 = 59^\circ \blacklozenge$$

$$\phi = 29.5 \blacklozenge$$

Elemento correspondiente a los esfuerzos principales

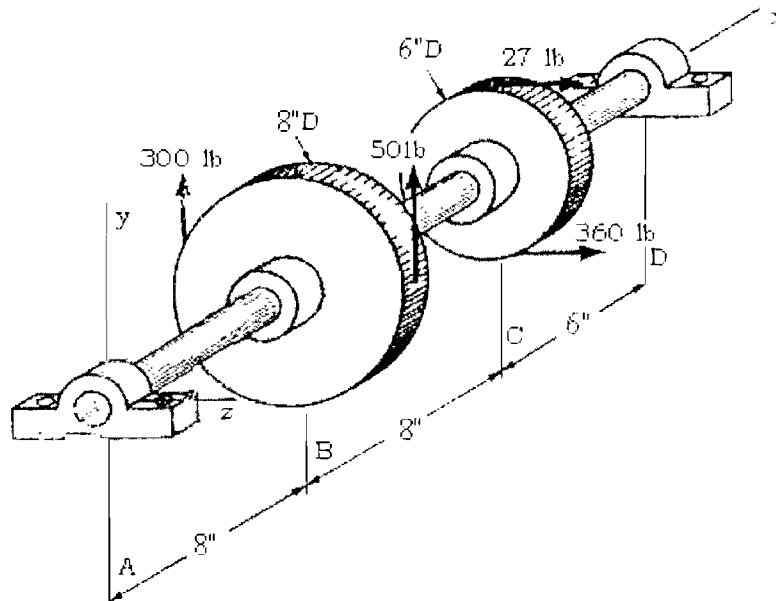


Elemento correspondiente al esfuerzo cortante máximo. El punto C se halla a  $31^\circ$  de  $\tau_2$  en el círculo de Mohr en s.r.



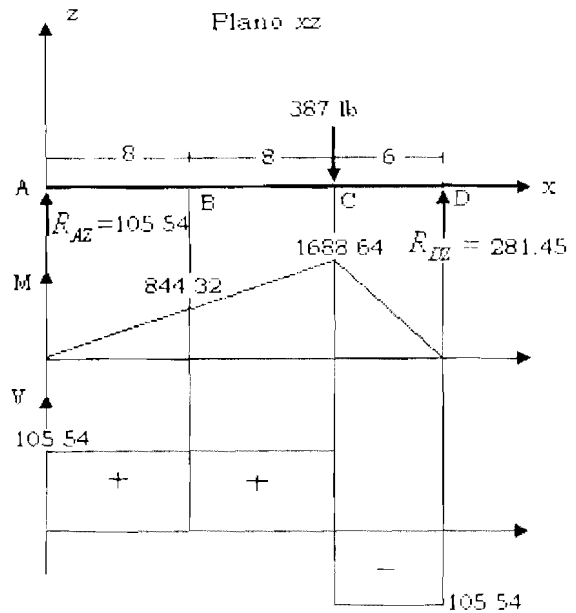
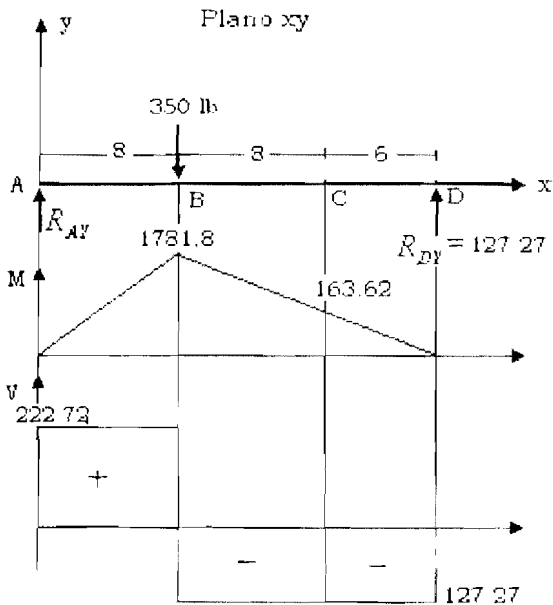
MODELO 2.

La Figura ilustra un eje de transmisión con chumaceras en A y D y poleas en B y C. Las fuerzas que se indican representan las tensiones de las bandas en los lados tirante y flojo de las mismas. Determínese el diámetro apropiado del árbol, tomando como base un esfuerzo normal de 16 kpsi y/o un esfuerzo cortante de 12 kpsi.



$$T_B = (300 - 50) \times 4 = 250 \times 4 = 1000 \text{ lb-pulg}$$

$$T_C = (360 - 27) \times 3 = 999 \text{ lb-pulg}$$



$$\oplus \uparrow \sum M_A = 0$$

$$(-350)8 + 22 R_{DY} = 0$$

$$R_{DY} = 127.27 \text{ lb}$$

$$\oplus \uparrow \sum M_A = 0$$

$$(-387)16 + (R_{DZ})22 = 0$$

$$R_{DZ} = 281.45 \text{ lb}$$

$$\uparrow \sum F_y = 0$$

$$\uparrow \sum F_x = 0$$

$$R_{AY} - 350 + 127.27 = 0$$

$$R_{AY} = 222.72 \text{ m lb}$$

$$R_{AX} - 307 + 281.45 = 0$$

$$R_{AX} = 105.54 \text{ lb}$$

$$M_B = \sqrt{(1781.8)^2 + (844.32)^2} = 1971.72 \text{ lb-pulg}$$

$$M_C = \sqrt{(763.62)^2 + (1688.64)^2} = 1853.27 \text{ lb-pulg}$$

Un punto en B

$$\sigma_x = \frac{M_B}{Z} = \frac{1972}{\pi d^3 / 32} = \frac{20.087 \text{ lb-pul}}{d^3}$$

$$I_{xy} = \frac{T_r}{J} = \frac{1000d/2}{\pi d^4 / 32} = \frac{5093 \text{ lb-pulg}}{d^3}$$

$$\sigma_1 = \overline{0A} + \overline{AB}$$

$$\overline{AB} = R = \sqrt{\frac{(5093)^2}{(d^3)^2} + \frac{(10.0435)^2}{(d^3)^2}} = \frac{11.300}{d^2} = \tau_{\max} ; \sigma_1 = \frac{21343}{d^3}$$

Si  $\sigma_{adm} = 16$  kpsi

$$d = \sqrt[3]{\frac{21343 \text{ lb-pulg}}{16.000 \text{ lb/pulg}^2}} = 1.105 \text{ pulg}$$

Si  $\tau_{adm} = 12$  kpsi, entonces

$$d = \sqrt[3]{\frac{11.3}{2.0}} = 0.98 \text{ pulg}; \text{ por seguridad: } d = 1\frac{1}{8} \text{ pulg}$$

MODELO 3. Empleando un esfuerzo ortante máximo permisible de 8000 psi, determinar el diámetro del eje necesario para transmitir 50 hp cuando a) la velocidad de rotación del eje es de 2000 rpm y b) cuando es de 200 rpm.

a) utilizando la ecuación (2.22):

$$T = \frac{63.000 \times 50 \text{ hp}}{2000 \text{ rpm}} = 1580 \text{ lb-pulg}$$

Con la ecuación (2.21):

$$\tau_{\text{permisible}} = \frac{T \cdot r}{j} = \frac{T(d/2)}{\pi d^4 / 32} = \frac{16T}{\pi d^3}$$

$$d = \left[ \frac{16T}{\pi(\tau_{\text{permisible}})} \right]^{1/3} = \left[ \frac{16(1580)}{\pi(8000)} \right]^{1/3}$$

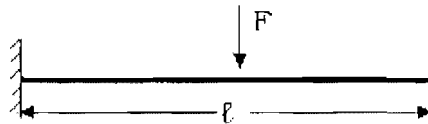
$$\Rightarrow d = 1 \text{ pulg}$$

b) Para  $n = 200 \text{ rpm}$

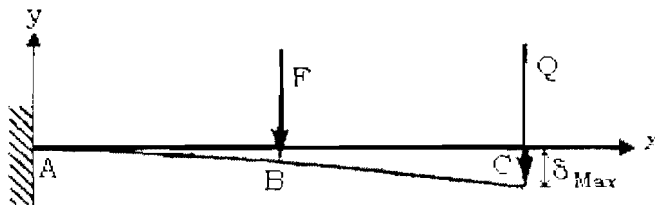
$$T = \frac{63000 \times 50 \text{ hp}}{200 \text{ rpm}} = 15800 \text{ lb-pulg}$$

$$d = \left[ \frac{16(15800)}{\pi(800)} \right]^{1/3} = 2.16 \text{ pulg}$$

MODELO 4. En una manivela en voladizo de longitud  $\ell$ , actúa una fuerza  $F$  en el centro. Despreciando el cortante, calcúlese la deflexión máxima utilizando el teorema de Castigliano.



Se ubica una fuerza ficticia  $Q$  en el punto donde se requiere la deflexión:



$$M_{AB} = F(x - \ell/2) + Q(x - \ell)$$

$$M_{BC} = Q(x - \ell)$$

La energía de deformación total será:

$$U = \int_0^{\ell/2} \frac{M_{AB}^2 dx}{2EI} + \int_{\ell/2}^{\ell} \frac{M_{BC}^2 dx}{2EI}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{\partial U}{\partial Q} = \frac{1}{2EI} \left[ \int_0^{\ell/2} 2M_{AB} \left( \frac{\partial M_{AB}}{\partial Q} \right) dx + \int_{\ell/2}^{\ell} 2M_{BC} \frac{\partial M_{BC}}{\partial Q} dx \right]$$

$$\frac{\partial M_{AB}}{\partial Q} = \frac{\partial M_{BC}}{\partial Q} = x - \ell$$

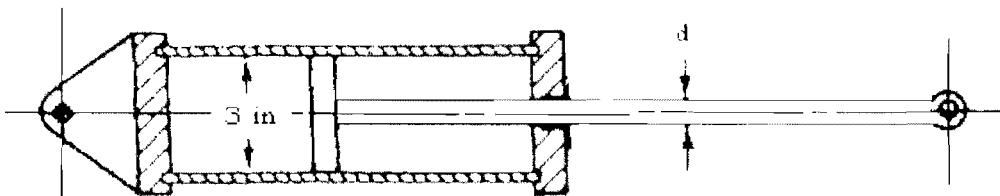
$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{1}{EI} \left\{ \int_0^{\ell/2} \left[ F(x - \ell/2) + Q(x - \ell) \right] (x - \ell) dx + \int_{\ell/2}^{\ell} Q(x - \ell) x dx \right\}$$

Haciendo  $Q = 0$

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{F}{EI} \int_0^{\ell/2} (x - \ell/2)(x - \ell) dx = \frac{5F\ell^3}{48EI}$$

MODELO 5. El cilindro hidrauico que se observa en la figura tiene un diámetro interior de 3 in y operara sometido a una presión de 800 psi. Con el montaje que se muestra, el vástago del pistón debe configurarse como una columna con ambos extremos redondeados para cualquier plano de pandeo. Dicho vástago se hará de acero forjado AISI 1030 sin someterse a tratamiento térmico.

- Utilice un factor de diseño  $n_d = 3$  y seleccione un tamaño preferido para el diámetro del vástago, si la longitud de la columna es de 60 in.
- Repita la parte a) pero para una columna que mida 18 in de largo.
- Que factor de seguridad se aplica realmente a cada uno de los casos anteriores?.



Acero forjado AISI 1030:  $S_y = 50$  kpsi

- para  $\ell = 60$  in

$$P = 800 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \times \pi (1.5)^2 \text{ in}^2$$

$$P = 5.655 \text{ klb}$$



$$P_{\text{real}} = \Rightarrow P_{\text{crit}} = 3 \times 5,655 \text{ klb} = 16,965 \text{ klb}$$

$$I = \frac{P_{\text{crit}} x \ell^2}{C x \pi^2 x E} \Rightarrow I = \frac{16,965 \text{ klb} (60)^2 \text{ in}^2}{1(\pi^2)(30)(10^6) \text{ lb/in}^2} ; I = 0,2063 \text{ in}^4$$

$$d = \left( \frac{64I}{\pi} \right)^{1/4} = \left( \frac{(64) \times 0,2063 \text{ in}^4}{\pi} \right)^{1/4} \Rightarrow d = 1,43 \text{ in}$$

$$\left( \frac{\ell}{k} \right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 C E}{S_y}} \Rightarrow \left( \frac{\ell}{k} \right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 (1)(30)(10^6) \text{ psi}}{50 \text{ kpsi}}} \Rightarrow \left( \frac{\ell}{k} \right)_1 = 108,83$$

$$\frac{\ell}{k} = \frac{\ell}{d} \Rightarrow \frac{\ell}{k} = \frac{60 \text{ in}}{1,43 \text{ in}} \Rightarrow \frac{\ell}{k} = 167,83$$

Es  $\frac{\ell}{k} \geq \left( \frac{\ell}{k} \right)_1$  ; si, por lo tanto el diámetro obtenido es el correspondiente.

b) Para  $\ell = 18 \text{ in}$

$$I = \frac{16,965 \text{ klb} (18)^2 \text{ in}^2}{(1)\pi(30)(10^6) \text{ lb/in}^2}$$

$$I = 0,0186 \text{ in}^4$$

$$d = \frac{(64 \times 0,0186)^{1/4}}{\pi}$$

$$d = 0,7846 \text{ in}$$

$$\left( \frac{\ell}{k} \right)_1 = \sqrt{\frac{2\pi^2 (1)(30)(10^6) \text{ lb/in}^2}{50 \text{ kpsi}}}$$

$$\left( \frac{\ell}{k} \right)_1 = 108,83$$

$$\frac{\ell}{k} = \frac{\ell}{d} = \frac{\ell}{k} = \frac{18 \text{ in}}{0,7846 \text{ in}}$$

$$\frac{\ell}{k} = 9,766$$

Es  $\frac{\ell}{k} \geq \left(\frac{\ell}{k}\right)_1$ . No por lo tanto este diámetro no es el correcto, entonces se calcula así:

$$d = 2\sqrt{\frac{P_{cr}}{\pi_{sv}} + \frac{sy\ell^2}{c\pi^2 E}} \Rightarrow d = 2\sqrt{\frac{16,965\text{klb}}{\pi 50\text{kpsi}} + \frac{50\text{kpsix}(18)^2\text{in}^2}{1x\pi^2 x 30x10^6\text{psi}}} = 0,807\text{ in}$$

c)  $d = 1,43\text{ in}$

$$d = \left(\frac{64I}{\pi}\right)^{1/4} \Rightarrow I = \frac{(1,43)^4(\text{in}^4)(\pi)}{64} \Rightarrow I = 2,205\text{in}^4$$

$$I = \frac{(P_{cr})(\ell^2)}{\pi^2 E} \Rightarrow P_{crit} = \frac{0,2053\text{in}^4 x 1x\pi^2 (30)(10^6)\text{psi}}{(60)^2\text{in}^2} \Rightarrow P_{crit} = 16882,34\text{lb}$$

$$n = \frac{16,88234}{5,655} \Rightarrow n = 2,9854$$

Para:  $d = 0,807\text{in}$

$$I = \frac{d^4\pi}{64} \Rightarrow I = \frac{(0,807)^4\text{in}^4 x \pi}{64} \Rightarrow I = 0,02082\text{in}^4$$

$$P_{crit} = \frac{0,02082\text{in}^4 x 1x\pi^2 x 30x10^6\text{psi}}{(18)^2\text{in}^2} \Rightarrow P_{crit} = 19,026\text{klb}$$

$$n = \frac{P_{cr}}{real} = \frac{19,026}{5,655} \Rightarrow n = 3,364$$

## PROBLEMAS

1. Para cada uno de los estados de esfuerzo que se presentan a continuación, dibuje un diagrama del círculo de Mohr y encuentre los esfuerzos y direcciones principales normales y cortantes.

Dibuje el elemento correspondiente a los esfuerzos principales y el elemento correspondiente al esfuerzo cortante máximo.

- |    |                   |                  |                          |
|----|-------------------|------------------|--------------------------|
| a) | $\sigma_x = 12,$  | $\sigma_y = 6,$  | $\tau_{xy} = 4$ (s.r.)   |
| b) | $\sigma_x = 16,$  | $\sigma_y = 9,$  | $\tau_{xy} = 5$ (s.c.r.) |
| c) | $\sigma_x = 10,$  | $\sigma_y = -4,$ | $\tau_{xy} = 4$ 0        |
| d) | $\sigma_x = 10,$  | $\sigma_y = 0,$  | $\tau_{xy} = 4$ (s.r.)   |
| e) | $\sigma_x = 10,$  | $\sigma_y = 24,$ | $\tau_{xy} = 6$ (s.c.r.) |
| f) | $\sigma_x = -4,$  | $\sigma_y = 12,$ | $\tau_{xy} = 7$ (s.r.)   |
| g) | $\sigma_x = -50,$ | $\sigma_y = 60,$ | $\tau_{xy} = 80$ (s.r.)  |
| h) | $\sigma_x = 6,$   | $\sigma_y = -5,$ | $\tau_{xy} = 8$ (s.r.)   |
| i) | $\sigma_x = -8,$  | $\sigma_y = 7,$  | $\tau_{xy} = 6$ (s.r.)   |
| j) | $\sigma_x = 9,$   | $\sigma_y = -6,$ | $\tau_{xy} = 3$ (s.r.)   |

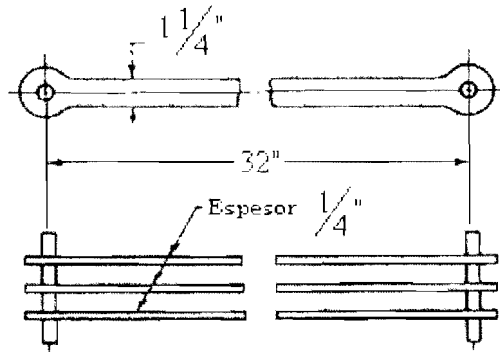
2. En una varilla de acero de 80 mm de largo y 15 mm de diámetro actúa una carga de compresión de 175 kN. El material es acero al carbono. Determine:

- El esfuerzo de compresión
- La deformación (unitaria) axial
- La deformación total
- El aumento en el diámetro de la varilla

3. Una varilla de acero de  $\frac{1}{2}$  pulg de diámetro y 40 pulg de largo soporta una carga de tensión de 30000 lb.

- Evalúe el esfuerzo y el alargamiento de la varilla.
- Si esta varilla de acero ha de ser reemplazada por una de aluminio que deberá experimentar el mismo alargamiento, ¿Cuál deberá ser su diámetro?
- Calcule el esfuerzo en la varilla de aluminio

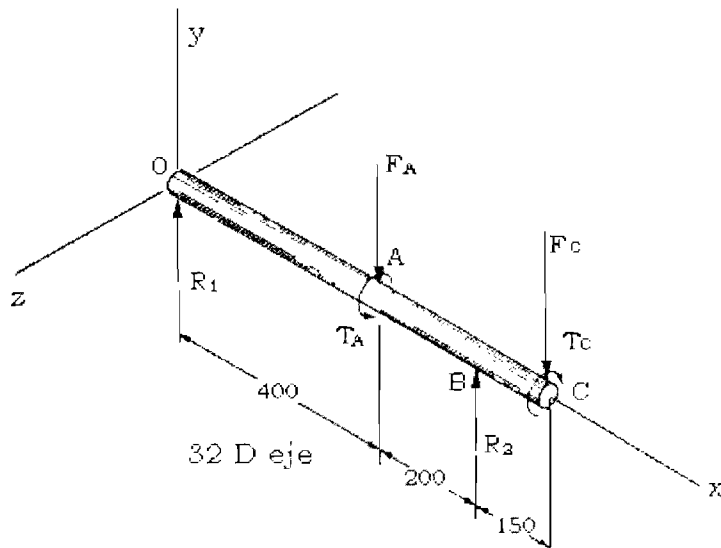
4. Se ha construido una biela con tres barras de acero de  $\frac{1}{4}$  pulg de grueso y  $1 \frac{1}{4}$  pulg de ancho, como se indica. Durante el ensamble se encontró que una de las piezas media sólo 31.997 pulg, entre centros de pasador, en tanto que las otras dos median 32.000 pulg exactamente.



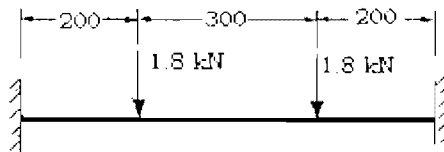
Determinese el esfuerzo producido en cada barra después del montaje pero antes de que se aplique carga externa.

5. La figura representa un diagrama de cuerpo libre de eje de acero, sostenido por cojinetes de 0 y en B, donde actúan las reacciones de apoyo  $R_1$  y  $R_2$ . Sobre la barra eje actúan las cargas  $F_A = 4.5 \text{ kN}$  y  $F_C = 1.8 \text{ kN}$  y también momentos de torsión de igual magnitud y sentido contrario:  $T_A = -T_C = 600 \text{ N} \cdot \text{m}$ .

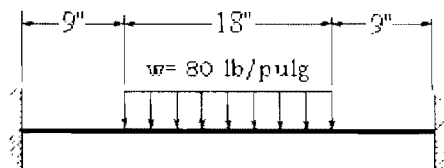
- Trácense los diagramas de fuerza cortante y momento flexionante y calcúlese los valores correspondientes a los puntos, 0, A, B y C.
- Localícese un elemento diferencial en el punto inferior de la sección transversal en A (según la parte negativa del eje y). Encuentre todas las componentes de esfuerzo que actúan en dicho punto, observando el elemento desde debajo de la barra eje.
- A partir del elemento diferencial de (b) trácense el diagrama del círculo de Mohr, determinense los dos esfuerzos principales y márchense las localizaciones de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\tau_{\text{max}}$ , ambos ejes de referencia y el ángulo desde el eje x hasta el eje que contiene a  $\sigma_1$ .
- Dibújese el elemento, incluyendo los esfuerzos principales correctamente orientados desde un eje x horizontal, y señálese en él todos los ángulos, esfuerzos, etc.



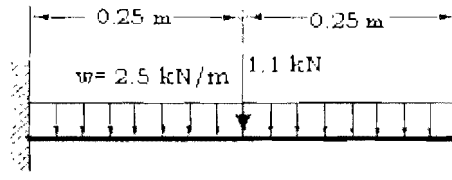
6. Un eje de acero de sección circular está cargado como se indica en la figura. El eje tiene un diámetro de 30 mm y está apoyado sobre cojinetes antifricción (de bolas) precargados, los cuales ocasionan cierta restricción en los extremos. Calcúlese la deflexión en el centro. Primero supóngase que dichos extremos están fijos o empotrados (como se indica) y después que el eje está simplemente apoyado. ¿Cuál es la razón entre las dos deflexiones?



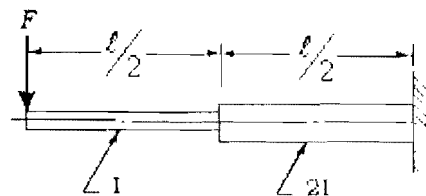
7. Selecciones un perfil angular (o ángulo) estándar de acero, de lados iguales, que soporte la carga indicada en la figura de manera que la deflexión máximo no exceda de 1/16 pulgadas.



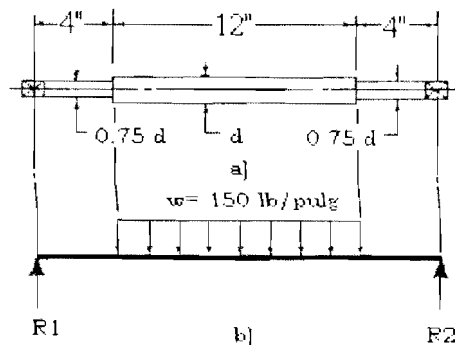
8. Seleccione una barra redonda de acero que soporte la carga indicada, de modo que su deflexión no exceda de 0.40 mm.



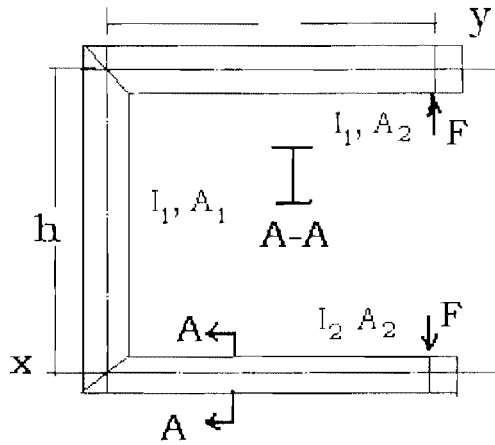
9. Utilizando el teorema de castigliano, encuentrese la deflexión máxima del voladizo que se ilustra. Despréciense el cortante directo.



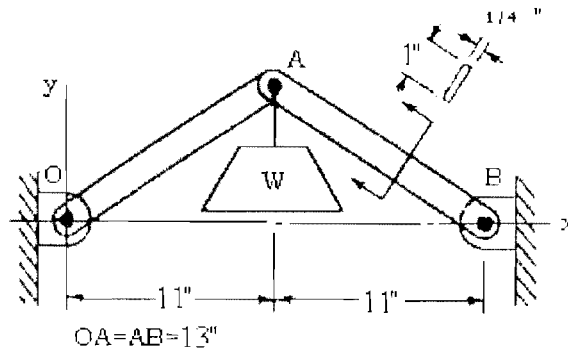
10. En la figura, (a) es el croquis de un eje de transmisión y (b) es su diagrama de carga. Calcúlese el diámetro  $d$  que se necesita para que la deflexión máxima no exceda de 0.010 pulg. El material es un acero de aleación con un módulo de elasticidad igual a 30 Mpsi. Empléese el teorema de Castigliano.



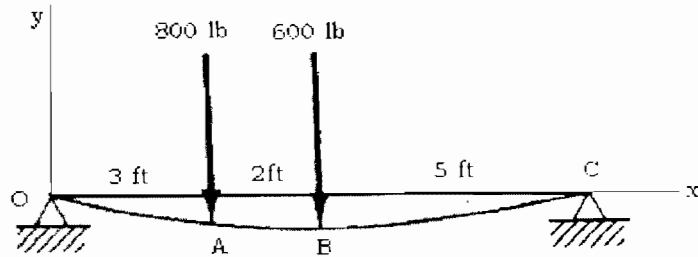
11. El marco rectangular en C se formó con tres tramos soldados de viga de patín ancho. Obténgase una expresión para la deflexión del marco en el punto de aplicación y en la dirección de cada fuerza  $F$ .



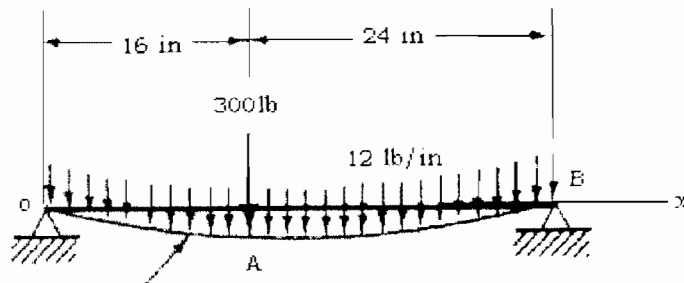
12. Las barras = OA y AB que se muestran en la figura están hechas de acero UNS G10100, laminado en caliente y tienen una sección transversal de 1 x 1/4 pulgada, como se indica. Con base en valores recomendados de las constantes de condición de extremos, ¿que peso W produciría una falla de columna en las barras?



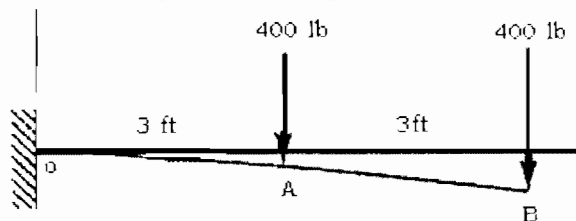
13. En la figura se presenta una viga simplemente apoyada en la que actúan dos fuerzas. Seleccione una pareja de canales de acero estructurales montados en forma adosada (espalda con espalda) para soportar las cargas de manera que la deflexión a la mitad de la viga no exceda 1/16 in y que el esfuerzo máximo no sea mayor que 6 kpsi.



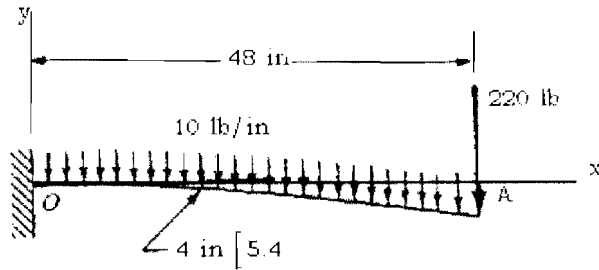
14. Determine la deflexión en A en el eje de acero que se muestra en la figura. Calcule la deflexión a la mitad del eje. ¿En qué porcentaje difieren estos dos valores?



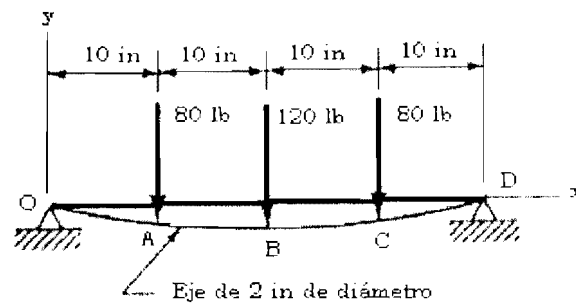
15. La deflexión en B de la viga en voladizo que se observa en la figura puede determinarse sumando la deflexión provocada por la fuerza en A cuando actúa individualmente, a la producida por la fuerza en B cuando también actúa en forma individual. A esto se le conoce como método de superposición; es aplicable siempre que la deflexión esté relacionada de modo lineal con la fuerza. Usando el principio de superposición, obtenga la deflexión de la viga en B si  $I = 13 \text{ in}^4$  y  $E = 30 \text{ Mpsi}$ .



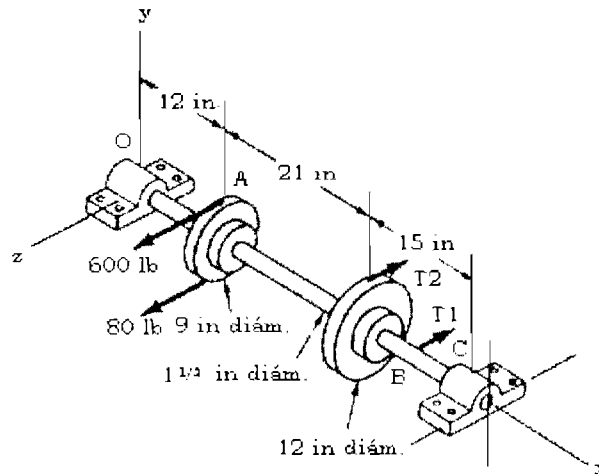
16. La viga en voladizo que se presenta en la figura es un canal de acero estructural de 4 in y 5.4 lb. Aplicando el método de superposición determine la deflexión en A. ¿En donde se debe aplicar la carga para impedir que se tuerza la sección del canal?



17. Determine la deflexión máxima de la viga que se presenta en la figura. El material de la viga es acero al carbono. Utilice dos métodos.



18. En la figura se muestra un contraeje de acero de 1.5 pulgadas de diámetro que sostiene dos poleas. La polea A suministra energía a una máquina y se produce una tensión de 600 lb en el lado tirante de la banda y 80 lb en el lado flojo, según se indica. La polea B recibe energía de un motor. Las tensiones de la banda en la polea B tienen la relación  $T_1 = 0.125T_2$ . Determine la deflexión del eje en la dirección Z en las poleas A y B. Supóngase que los cojinetes constituyen apoyos simples.



19. Un cable hecho de acero tipo arado de  $5/8$  in de diámetro tiene un módulo de elasticidad de cable de  $E_r = 12$  Mpsi y se utiliza para sostener una jaula de 500 lb y una carga de 2000 lb en un montacargas de mina. Si la longitud del cable entre el tambor de malacate y la jaula es de 100 ft, determine el alargamiento que experimentaría el cable cuando se monten en la plataforma de la jaula una vagoneta y su carga. La carga atribuida a la vagoneta con minerales es  $N = 300$  lb. El área de la sección transversal del cable en tensión puede determinarse a partir de  $A_m = 0.4d_r^2$ , donde  $d_r$  es el diámetro nominal del cable.

20. Una columna con ambos extremos redondeados está hecha de acero UNS 10150, laminado en caliente y tiene una sección rectangular de 10 x 25 mm. Encuéntrese la carga crítica de pandeo en kN para las siguientes longitudes de columna: 85, 175, 400 y 600 rprn.

21. Una columna con un extremo empotrado y el otro redondeado está hecha de acero UNS G10100 laminado en caliente. La barra es de sección rectangular de  $1/2 \times 1 \frac{1}{2}$ . Hállese la carga de pandeo para las siguientes longitudes de columna 0.5, 2 y 4 pies.

22. Una columna de Euler con un extremo empotrado y el otro libre está hecha de aluminio aleado. El área transversal de la columna será de  $600 \text{ mm}^2$  y ha de tener una longitud de 2.5m. Determinése la carga de pandeo de la columna, correspondiente a las siguientes formas:

a) Barra maciza redonda

- b) Tubo redondo con 50mm de diámetro exterior
- c) Tubo cuadrado de 50 mm por lado
- d) Barra maciza cuadrada

23. Una columna que tiene un extremo empotrado y el otro articulado y guiado se hará utilizando acero UNS G10100 laminado en caliente, o bien el más costoso acero, UNS G10500 estirado en frío, lo que dependerá de la decisión del diseñador. La carga nominal de la columna es de 1400lb y ha de emplearse un factor de seguridad de 3.25. Si este elemento se selecciona de sección circular, determínese un diámetro de seguridad con valor redondeado al 1/16 pulgadas para longitudes de 40, 20 y 7.5 pulgadas.
24. Se desea construir una columna de pino de 2m de largo, de sección transversal cuadrada y articulada en sus extremos. Si  $E = 12.5 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_{adm} = 12 \text{ MPa}$  para compresión paralela a las fibras, y  $n = 2.5$ . Determinar el tamaño de la sección transversal si la columna debe soportar adecuadamente a) una carga de 100kN b) una carga de 200kN.
25. Calcúlese la carga de compresión de seguridad correspondiente a un ángulo de acero estructural de 4 x 4 x ½ pulg. y de 5 pies de longitud. Usar  $n = 4$ .

### **CAPITULO III. MATERIALES MAS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE MAQUINARIA AGRÍCOLA**

#### 1. Introducción

Un primer paso para diseñar un componente de una máquina, es buscar que la resistencia del mecanismo, comparada con los esfuerzos a la que va a estar sometido, conduzca a un factor de seguridad mayor que uno.

Para encontrar esta meta el diseñador debe conocer las propiedades de los materiales a usar. Los ingenieros de diseño están íntimamente ligados con los materiales de que disponen, por lo tanto deben conocer a fondo las propiedades y las características de comportamiento, pues para su selección deberán tomar en cuenta propiedades tales como ductilidad, maquinabilidad, estabilidad mecánica, conductibilidad térmica y eléctrica, punto de fusión, duración química y alteraciones por radiaciones, así como el importante factor de costo. Las pruebas sobre un diseño particular pueden proveer unos datos útiles y precisos. Pruebas de laboratorio pueden indicar si el material de un diseño tuvo el correcto tratamiento térmico, la superficie terminada, el tamaño y la forma para tener seguridad bajo condiciones de campo. Lo ideal es que el ingeniero de diseño esté familiarizado con las técnicas de tratamiento térmico y los métodos de fabricación y consultar con un Ingeniero Mecánico o un Ingeniero metalúrgico para asegurar la mejor posible selección técnica de construcción.

La selección de un material para un mecanismo o elemento estructural es uno de los primeros pasos que debe realizar un ingeniero en el diseño de una máquina. Esta decisión debe tomarse antes que se determinen las dimensiones de la pieza. Después de elegir el material, el diseñador elegirá las dimensiones del elemento en estudio, de modo que los esfuerzos y deformaciones a que está sometido el mecanismo, tengan valores razonables en relación a las propiedades del mismo.

Para datos específicos de un material del diseño, se debe consultar los códigos y normas de las organizaciones que más interesan para la construcción de equipos del sector, como son: American Society Testing and Materials (ASTM), Internacional Standards

Organization (ISO), Society of Automotive Engineers (SAE), American Society of Agricultural Engineers (ASAE) y a otras listas de estándares que presentan las organizaciones referenciadas a través del texto.

El énfasis en la conservación de la energía durante la década de los años 70 afectó grandemente la composición de los materiales usados en la fabricación de los vehículos automotores. Los materiales ligeros tales como los plásticos y el aluminio están convirtiéndose en los de mayor consumo y ya son tenidos en cuenta en la construcción de maquinaria del sector agropecuario.(Figura 15).

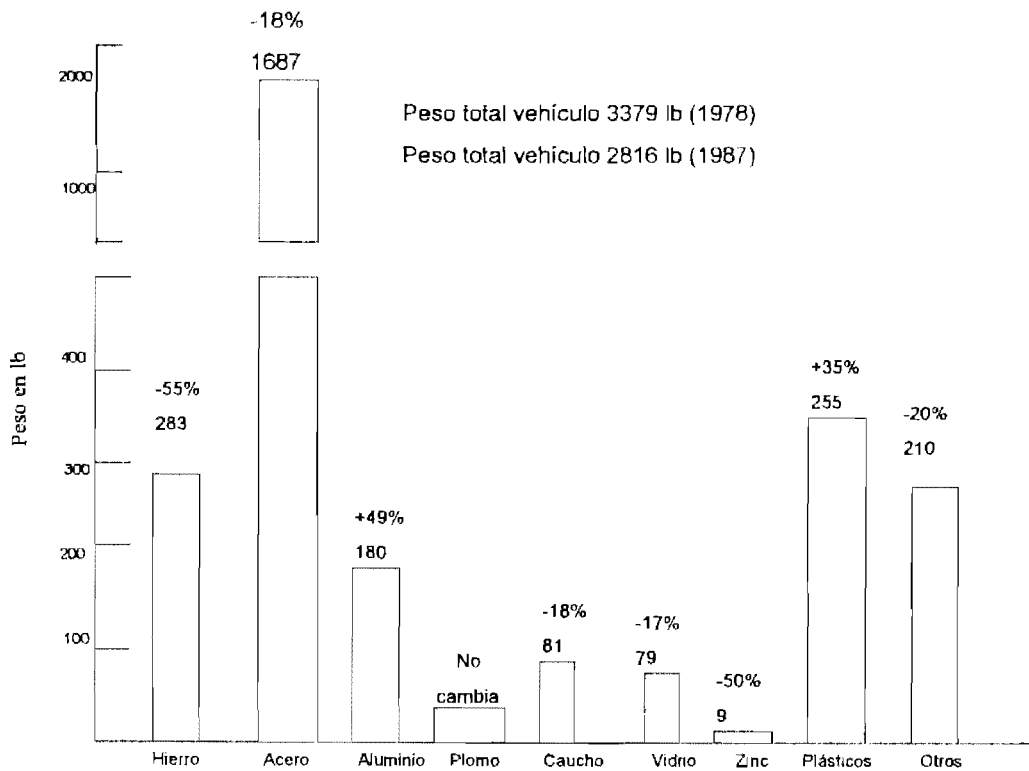


Figura 15. Tendencia de los materiales usados en la composición de un vehículo automotor. SAE, 1997.

La consideración más importante para la selección del material es que las condiciones de operación deben estar bien definidas, esto es: temperatura, medio, esfuerzo, impurezas, costo y cualquier limitación para el ciclo de vida, como el flujo plástico o la fatiga.

Aquí se pretende mostrar el conocimiento básico de los materiales más comúnmente utilizados en la construcción de maquinaria agrícola. Es necesario señalar que en ocasiones la elección adecuada de materiales, exige un intenso y costoso trabajo de investigación, generalmente realizado por los fabricantes de los equipos del sector. El proceso de manufactura usado para la fabricación de un determinado componente influirá también en el tipo de material que puede ser usado.

## 2. Clasificación de los materiales

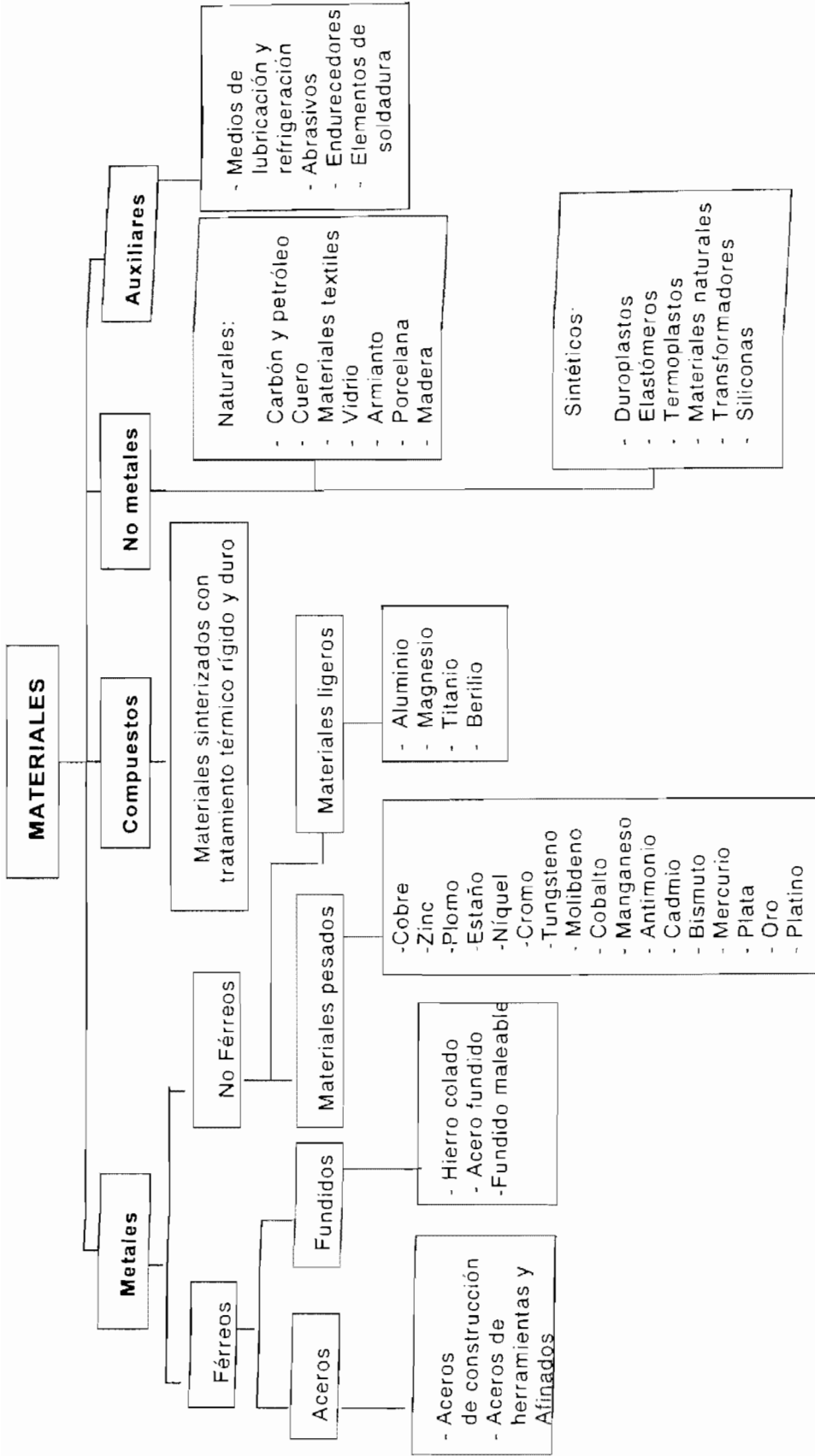
En la Figura 16 se presenta la clasificación de los materiales de ingeniería divididos en cuatro clases principales, pues se consideran los materiales auxiliares como aquella clase de elementos que se emplean en la fabricación y trabajo de los materiales como son los medios lubricantes y refrigerantes, combustibles y medios abrasivos.

## 3. Materiales metálicos

A excepción del mercurio, son sustancias sólidas con estructura cristalina, de forma que sus átomos se encuentran dispuestos según una red regular. Los metales se caracterizan por un enlace metálico en donde se comparten los electrones en un verdadero mar de ellos. Cada núcleo se encuentra rodeado de electrones, pero éstos no están asignados específicamente a algún núcleo en particular. Los metales también se caracterizan por la apariencia de su superficie; por lo general tienen un brillo metálico y pueden pulirse hasta obtener un acabado de espejo. Los metales también son capaces de soportar grandes cargas, son dúctiles y tienen propiedades elásticas reversibles hasta cierto punto. Pueden hacerse aleaciones para modificar sus propiedades tanto físicas como químicas. Cuando un mismo metal puede cristalizar en diferentes redes, una de las formas de cristalización constituye un estado alotrópico que presentará características mecánicas diferentes.

## 4. Metales no férreos

Se clasifican en metales pesados y ligeros. Se consideran como metales pesados aquellos cuya densidad es mayor de  $49 \text{ kN/m}^3$



**FIGURA 16. CLASIFICACIÓN DE LOS MATERIALES DE INGENIERÍA**

(5kg/dm<sup>3</sup>) y como ligeros aquellos que no llegan a esa densidad. Los principales metales pesados son cobre, cinc, estaño, plomo, níquel, cromo, tungsteno, molibdeno, cobalto, manganeso, antimonio, cadmio, bismuto, mercurio, y los metales preciosos plata, oro y platino. Los metales ligeros más frecuentemente empleados son el aluminio, el magnesio, el titanio y el berilio. Las propiedades de los metales puros pueden mejorarse mediante aleación e incluso pueden obtenerse con ello determinadas nuevas propiedades. Mediante la aleación aumentan casi siempre la dureza y la resistencia mientras que en cambio disminuye el alargamiento. La resistencia a la corrosión también empeora generalmente mediante la aleación en los metales no férreos.

Las aleaciones de los metales no férreos se clasifican en aleaciones de fusión o aleaciones de forja. Las aleaciones de fusión poseen para la actual forma de colar, propiedades más favorables para la colada. Se prestan por ello para la fabricación de piezas fundidas. Las aleaciones de forja se pueden deformar (modelar) bien sin recurrir al arranque de viruta, tanto en frío como en caliente. Se pueden hacer con estas aleaciones barras, alambres, chapas, tubos y perfiles.

## 5. Metales pesados no férreos

### Cobre y sus aleaciones

Densidad	(8,9 kg/dm <sup>3</sup> )
Punto de fusión	1070...1093°C(cuanto más puro es el cobre, tanto más elevado el punto de fusión)
Resistencia a la tracción	20... 36 kp/mm <sup>2</sup> , en alambres finos llega a 60 kp/mm <sup>2</sup>

El cobre puro es blando, tenaz y muy dúctil y maleable. La fractura es fibrosa, nervuda, y de brillo sedoso. El cobre posee una elevada conductibilidad para el calor y la electricidad. Es muy resistente a la corrosión y al calor. En contacto del aire se forma sobre él una delgada capa protectora llamada pátina. Por el contacto con el ácido acético se produce el venenoso cardenillo. En la naturaleza se presenta principalmente formando minerales, siendo los principales: pirita de cobre, calcocita, colcosina o cobre vidrioso. El cobre se emplea para conducciones eléctricas, cajas de fuego, soldadores, serpentines de calefacción y refrigeración, objetos de arte y aleaciones.

Aleaciones cobre cinc (latón): son entre todas las aleaciones de metales pesados, las más empleadas. El contenido de cobre es



Densidad	≈ 7,3 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	232°C
Resistencia a la tracción	4...5 kp/mm <sup>2</sup>

Es utilizado en chapa de acero estañada (hojalata), lámina (papel u hojas de estaño) de 0,008 a 0,2 mm de espesor (hoy generalmente se reemplazan estas láminas por las de aluminio), soldadura y aleaciones.

Plomo (Pb) y sus aleaciones. El plomo tiene una buena resistencia frente a la corrosión y también frente a los ácidos. Los compuestos de plomo son muy venenosos, por lo cual se han dictado prescripciones especiales.

Densidad	11,3 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	327°C
Resistencia a la tracción	1,5...2 kp/mm <sup>2</sup>

Es empleado en chapas de acero emplomadas, recipientes resistentes a los ácidos, placas de acumulador, capas envolventes para cables, baños de plomo para templar tubos, fabricación de albayalde, minio de plomo, vidrio de cristal, y vidrio de lentes. Puesto que el plomo no es atravesado por los rayos Roentgen, por los de radio y análogos resulta apropiado para protección contra esas radiaciones. El plomo se alea bien con casi todos los metales.

Níquel (Ni) y sus aleaciones. El níquel brilla con brillo argentado, es tenaz y se deja pulimentar bien. Es sumamente resistente contra la corrosión y es atraído por el imán.

Densidad	8.85 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1450°C
Resistencia a la tracción:	
con recocido de ablandamiento	40...50 kp/mm <sup>2</sup>
con laminación dura	70...80 kp/mm <sup>2</sup>

Es utilizado en recubrimientos galvánicos, para la fabricación de aceros aleados y de aleaciones especiales. Así como para aparatos de la industria química.

Cromo (Cr). El cromo es de color gris acerado y su fractura es de brillo argentado. Es duro y agrio. A causa de su elevada resistencia a la corrosión es muy apropiado para construir recubrimientos antioxidantes (cromo brillante y cromado duro).



Densidad	6.8 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1900°C

Tungsteno (W, de wolframio). El tungsteno se emplea para hilos de incandescencia en lámparas eléctricas (a causa de su elevado punto de fusión), para electrodos de soldadura y como adición en las aleaciones de aceros de herramientas y de construcción, así como en los metales duros. Da a los aceros una gran resistencia en caliente y como consecuencia, buena duración a los fillos.

Densidad	19kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	3370°C
Punto de fusión más alto de los metales	

Molibdeno (Mo). El molibdeno se emplea como componente de aleación en los aceros de gran valor (aceros finos) y para electrodos en los tubos de rayos X.

Densidad	10.3 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	2600°C

Vanadio (V). El vanadio (vanadin) tiene color gris acerado y es muy duro. Se emplea en aceros aleados. Pequeñas cantidades de vanadio (solamente interviene en proporciones superiores al 0,2% en los aceros para resortes y en los aceros para herramientas de muy alta calidad) elevan notablemente la resistencia a la tracción y la tenacidad. El vanadio puro es muy difícil de obtener. Generalmente se tiene en el comercio en forma de ferrovanadio, que es una combinación de hierro y vanadio.

Densidad	5,7 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1715°C

Cobalto (Co). El cobalto tiene propiedades análogas a las del níquel y es muy tenaz. El color varía desde el blanco rojizo hasta el azul acerado. En virtud de su acción endurecedora se emplea como adición en los aceros rápidos y para la obtención de imanes permanentes muy buenos. Es un componente importante de los metales duros.

Densidad	8,6 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1490°C

Manganeso (Mn). El manganeso es un metal duro y frágil. Se emplea principalmente como metal de adición para el acero y

para las aleaciones de cobre. Sirve también como adición en muchas aleaciones de metales ligeros.

Densidad	7,4 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1250°C

Tantalio (Ta). El tantalio es un metal gris y brillante. Cuanto más puro el metal, tanto más blando y dúctil es. Mediante conformación en frío puede variarse la resistencia a la tracción entre los límites 35 y 110 kp/mm<sup>2</sup>. El óxido de tantalio (Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) es frágil y tan duro que con él puede rayarse el vidrio. El tantalio es muy resistente a la corrosión y no es atacado nada más que por el ácido fluorhídrico.

Densidad	16,6 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	3030°C
Resistencia a la tracción de alambres con 1 mmφ	4...5 kp/mm <sup>2</sup>
93 kp/mm <sup>2</sup>	

Titanio (Ti). El titanio es un metal blanco argentado. Es más resistente a la corrosión que el acero inoxidable. El titanio tiene aproximadamente la misma resistencia que un buen acero de construcción y conserva esta hasta temperaturas de incluso aproximadamente los 400°C. El titanio se utiliza principalmente como componente de los metales duros y como adición de aleación en el acero y en el aluminio para la construcción aeronáutica.

Densidad	4,51 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1700°C

Antimonio (Sb). El antimonio es un metal brillante de color argentado, muy frágil y no se emplea más que como metal de adición para aleaciones. Eleva la dureza del plomo duro, del metal blanco, del empleado para letras o tipo de imprenta. Una aleación del 70% de antimonio y 30% de hierro da chispas cuando se le somete a la acción de una lima.

Densidad	6,6 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	630°C

Cadmio (Cd). El cadmio se utiliza mucho para la fabricación de aleaciones de bajo punto de fusión. Hay aleaciones con 10% de cadmio que funden entre los 55° y los 65°C. Los recubrimientos galvánicos de cadmio sobre hierro, acero y aluminio pueden ser muy delgados y ser sin embargo resistentes (cadmiado). Los

recubrimientos de cadmio tienen un brillo mate, de bonito aspecto y se prestan para micrómetros, tambores de medida en las máquinas herramientas, etc. El cadmio se emplea además para metales de cojinetes (construcción de automóviles) y para placas de acumuladores (acumuladores de níquel-cadmio).

Densidad	8,6 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	320°C

Bismuto (Bi). El bismuto es un metal blanco-rojizo fuertemente brillante. La fractura es cristalina de exfoliación en grandes láminas. Al solidificarse se dilata. El bismuto es el principal componente de las aleaciones fácilmente fusibles (fusibles eléctricos). Se emplea además como capa especular en las lámparas reflectoras.

Densidad	9,8 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	270°C

Mercurio (Hg). El mercurio es el único metal que a la temperatura ambiente tiene estado líquido. Por su gran dilatabilidad térmica se emplea para termómetros. Tiene la propiedad de disolver casi todos los metales salvo el hierro, el níquel, el tungsteno y el molibdeno, formando con ellos amalgamas. Estas amalgamas son "amasables" a temperatura ambiente, pero con el tiempo se pueden endurecer (empate de los dientes)

Densidad	13,5 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	-39°C

Metales preciosos. Se llaman metales preciosos los que no son atacables por la mayoría de los productos químicos y que, ni aún bajo acción del calor se combinan con el oxígeno del aire.

Plata (Ag). La plata es el metal que tiene mayor conductibilidad eléctrica. Se utiliza para alambres de cartucho fusibles o cortacircuitos y para contactos. La plata tiene la misma dilatación térmica que el latón. Los mejores espejos para instrumentos ópticos van provistos de un recubrimiento de plata.

Densidad	10,5 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	960°C

Oro (Au). El oro es un metal blando, de color amarillo rojizo.

Su grado de pureza se da en milésimas o en quilates. El oro está compuesto por 1000 partes de oro que corresponden a 24 quilates; una aleación de oro con 585 partes del mismo tiene 14 quilates, y otra con 333 partes de oro tiene 8 quilates. Como el oro es muy blando se utiliza casi siempre aleado con plata, cobre o níquel y con él se hacen objetos de joyería y monedas.

Densidad	19,3 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1063°C

Platino (Pt). El platino es después del osmio (densidad 22,48 kg/dm<sup>3</sup>) y el iridio (densidad 22,44 kg/dm<sup>3</sup>), el metal más pesado. No se oxida ni aun incandescente al blanco y conserva su brillo metálico. Es inatacable por los ácidos con excepción del agua regia (mezcla de 3 partes de ácido clorhídrico y 1 parte de ácido nítrico) y las lejías. El platino tiene buenas propiedades mecánicas y se deja laminar, estirar y prensar bien (láminas hasta 0,0025 mm y alambres hasta 0,015 mm de espesor. El platino se emplea para cápsulas y crisoles de los laboratorios químicos y para contactos en ruptores de corriente, así como para termopares (medición de temperaturas hasta los 1600°C) y en piezas de joyería.

Densidad	21,5 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	1770°C

## 6. Metales ligeros

Aluminio (Al). Propiedades. El aluminio expuesto al aire se recubre de una capa de óxido y con ello se hace muy resistente a la corrosión. Posee buena conductibilidad eléctrica (aproximadamente 2/3 de la del cobre) y es un buen conductor del calor. Es susceptible de ser estirado, prensado, laminado, estampado, colado, soldado, admitiendo también la falsa soldadura, se puede pulverizar y permite trabajarse bien por torneado, fresado, taladro, etc. El aluminio posee una gran facilidad para constituir aleaciones. El material de partida para su producción en plan industrial es la bauxita.

Densidad	2,7 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	658°C
Resistencia a la tracción fundido	9...12 kp/mm <sup>2</sup>
recorrido de ablandamiento	7 kp mm <sup>2</sup>
laminado duro	13....20 kp/mm <sup>2</sup>

Aleaciones de aluminio: el aluminio se alea sobre todo con Mg, Cu, Si, Zn, Pb y Mn. Las aleaciones de aluminio con contenido

de cobre tienen gran resistencia mecánica pero menor resistencia a la corrosión que las aleaciones exentas de cobre.

El aluminio y las aleaciones de aluminio sólo se trabajan bien cuando se mantienen los ángulos de ataque correctos y además se utilizan grandes velocidades de corte y medios de lubricación adecuados.

Magnesio (Mg). El magnesio es sólo débilmente resistente a la corrosión; en forma de viruta y de polvo, así como estado líquido es muy fácilmente inflamable. Por esta razón al fundir y colar el magnesio y sus aleaciones hay que evitar la entrada de oxígeno mediante espolvoreado de azufre.

Los incendios de magnesio tienen que apagarse con arena o con viruta de fundición gris. No deben apagarse nunca con agua (llama muy viva). Las aleaciones de magnesio constituyen los materiales metálicos más ligeros.

Densidad	1,74 kg/dm <sup>3</sup>
Punto de fusión	650°C

## 7. Materiales sinterizados

El sinterizado es un tratamiento térmico de piezas o de semiproductos obtenidos por prensado de polvos metálicos o de óxidos metálicos o de carburos. La compactación del material bajo la influencia de las fuerzas de cohesión entre los gránulos pastosos del polvo es lo que se llama sinterización.

Son ventajas especiales de la técnica de sinterización las siguientes: se pueden unir entre sí mucho más fácilmente que por fusión materiales con puntos de fusión y densidades muy diferentes. Pueden obtenerse materiales que o bien son porosos (filtros mecánicos, materiales para soportes) o bien son compactos (piezas para construcción).

La fabricación de piezas sinterizadas tiene lugar, según sean las propiedades perseguidas, en las siguientes etapas: obtención del polvo, prensado de este polvo para formar piezas de forma, sinterizado de estas piezas, prensado posterior y calibrado de las piezas sinterizadas así como tratamientos por templado, cementado o impregnación con aceite.

Para la producción de polvos metálicos existen diversos procedimientos. La fabricación de polvos se realiza tanto por vía química como por vía electrolítica, pero sobre todo por

pulverización de metales líquidos mediante chorro de aire comprimido o mediante chorro de vapor de agua.

Prensado: el prensado de los polvos se produce en herramientas de presión expresamente construidas para ello y dispuestas en prensas especiales que se accionan hidráulicamente. Los polvos no adquieren al prensarse la misma densidad por todas partes como ocurre en el caso de masas líquidas o pastosas.

La temperatura de sinterización en los polvos de una sola sustancia es de 60 a 80% de la temperatura de fusión de ese material, y en el caso de polvos contruidos por varias sustancias esa temperatura es ligeramente superior a la temperatura de fusión de las sustancia de menor punto de fusión. Las temperaturas de sinterización de algunos de los principales materiales son: bronce porosos 600° a 800°C, hierro y acero sinterizados 1000° a 1300°C, metales duros 1400° a 1600°C y metales de elevado punto de fusión como el tungsteno, el molibdeno y el tantalio, de 2000° a 2900°C.

Según sea la composición de los materiales sinterizados éstos podrán ser tratados posteriormente para mejorar determinadas propiedades. Así, por ejemplo, en el acero sinterizado podrá mejorarse la resistencia a la tracción mediante un enfriamiento brusco y en el hierro sinterizado podrá mejorarse la resistencia al desgaste y a la corrosión mediante revenido en vapor de agua recalentado a 200°C. Tanto el acero como el hierro sinterizados pueden cementarse y templarse superficialmente. Los bronce sinterizados se impregnan con aceite para obtener buenas propiedades de deslizamiento y de marcha en condiciones precarias; el latón sinterizado es apropiado para el tratamiento galvánico de la superficie.

Se distinguen: materiales de filtrado altamente porosos, materiales porosos, para cojinetes, materiales sinterizados para piezas de precisión, ordenados según material básico, grado de relleno del espacio y densidad, así como materiales sinterizados impregnados.

## 1. Materiales no metálicos

Los materiales no metálicos, se les clasifica como naturales y sintéticos, siendo la madera el tradicionalmente utilizado en la fabricación de partes de maquinaria agrícola y los plásticos los que hoy más se están utilizando. Dentro de los materiales plásticos se distinguen los términos termoestables o termofraguables, para señalar aquel material para el cual el

termino de polimerización, termina en una prensa de moldeo en caliente, donde el material se derrite a presión, esto es que experimentan un endurecimiento cuando se aumenta la temperatura. Se destacan dentro de este grupo, los epóxicos, siliconas y los fenólicos con elevada resistencia y fáciles de mecanizar y utilizados en juntas, correas, engranajes, aisladores, tubos y chapas estructurales.

El término termoplástico se utiliza para aquel material plástico que se suaviza o se reblandece o es moldeable cuando se aplica calor. Dentro de este grupo vale la pena resaltar el policloruro de vinilo, polietileno, el poliestireno, el teflón y el nylon, que generalmente son utilizados en elementos no resistentes como carcasas y recipientes en general.

La variedad de características y de propiedades obtenibles con los plásticos es muy amplia y se deben considerar la influencia de muchos factores como la moldeabilidad, coeficiente de fricción, influencia de los agentes atmosféricos, resistencia al impacto, refuerzos y el costo. Los fabricantes proporcionan en sus catálogos información valiosa para una acertada selección de los materiales plásticos.

## 2. Aleaciones metálicas

Definida como la mezcla de metales realizados por fusión de los mismos, con disolución parcial o total de los componentes, lográndose una estructura particular que le confiere determinadas propiedades mecánicas que dependen de las proporciones de la mezcla y del proceso de enfriamiento utilizado.

A una determinada presión, los metales poseen un punto de fusión determinado mientras las aleaciones en su cambio de estado no mantienen su temperatura constante, modificándose no solamente sus propiedades, sino también su estructura.

Las aleaciones están basadas principalmente en la mezcla de hierro (aleaciones férricas) como las aleaciones hierro-carbono y aquellas que se generan con metales que no son el hierro (aleaciones no térmicas) que utilizan otros elementos como el cobre, aluminio, níquel, estaño, plomo, zinc, manganeso y titanio.

### 9.1. Aleaciones hierro-carbono

Las propiedades mecánicas y la capacidad de conformación de

las aleaciones hierro-carbono, se modifican según el porcentaje de carbono en su composición y el procesamiento llevado a cabo para su obtención. Es por esto que en estas aleaciones se distinguen:

- ✓ El hierro dulce o forjado, es esencialmente un acero con bajo contenido de carbono inferior a 0.1% y con inclusiones de escoria entre el 1-3%. Es un material blando y dúctil que se suelda sin dificultad, que comparado con el acero ofrece alta resistencia a la corrosión.
- ✓ El acero: es una aleación de hierro y carbono, o de hierro, carbono y otros elementos de aleación, con un contenido de carbono inferior al 2%. Son las aleaciones más empleadas por su resistencia y capacidad de conformación. Cuando el carbono representa el único elemento de aleación en el acero, a este se le conoce como acero al carbono ordinario. El carbono es un elemento significativo y poderoso de aleación, de tal manera que cualquier cambio en el porcentaje de este elemento puede conducir a amplias variaciones en la resistencia y dureza. Cuando se requiere mejorar alguna característica en particular como la densidad, dureza, resistencia a la corrosión y otras, se suele alear el hierro-carbono con otros metales como el níquel, cromo, vanadio, manganeso o molibdeno.
- ✓ Las fundiciones son aleaciones con un contenido de carbono que oscila entre 2 y 6.7%, aunque comercialmente se encuentren entre 2,5 a 4.5%. Dependiendo del sistema de enfriamiento utilizado en su obtención, se distinguen:
  - ✓ La fundición gris o hierro colado gris, donde predomina el efecto del alto contenido de silicio, que es causa de que el carbono, al enfriarse, se separe en forma de grafito. Presenta bajos porcentajes de azufre, manganeso y fósforo. Llega a las fundiciones en forma de lingotes y se sigue trabajando en ellas para hacer la fundición de molde. Debido a su relativo bajo costo, a su facilidad para ser fundido o colado en grandes cantidades, a su alta resistencia y a su fácil maquinado, es el que más se emplea. Se utiliza para la construcción de los bloques de los motores, engranajes, etc. Este material no se suelda con facilidad debido a que puede agrietarse, defecto que puede aminorarse si la pieza es precalentada con cuidado.
  - La fundición blanca o hierro colado blanco, en donde el hierro está en la forma de cementita y perlita sin que haya grafito, resultando en una estructura blanca. Es de alta

dureza, muy frágil, duro para el maquinado, pero resistente al desgaste. Utilizado en la construcción de rejas, arados y llantas.

- La fundición maleable, se obtiene partiendo del hierro bruto especial, chatarra y otras adiciones en los hornos eléctricos o en cubilotes. Es un material mecanizable utilizado en la construcción de chapas.
- La fundición nodular, que reúne las ventajas de la fundición gris y blanca, como es su alta dureza, ductibilidad y fácil maquinado.

## 9.2. Otras aleaciones

Aleaciones de cobre, han sido ampliamente empleadas por características como su resistencia a la corrosión, maleabilidad, conformabilidad, ductilidad resistencia mecánica, moldeabilidad etc. Las aleaciones más universalmente utilizadas son:

Latón, es una aleación entre cobre y zinc. Según su porcentaje de cobre y zinc presentan denominaciones y propiedades diferentes: latón rojo (5-20% Zn), latón amarillo (20-33% se Zn), latón naval (60% Cu, 39, 25% Zn, 075 % Sn).

Bronce, es una aleación entre cobre y estaño. Permite su aleación con un tercer metal denominándose: bronce al aluminio, bronce al silicio, bronce fosforado.

Aleaciones de aluminio: son aleaciones extraordinariamente resistentes a la corrosión, poseen muy baja densidad, pero presentan también muy baja resistencia mecánica. Su maleabilidad hace que su utilización en láminas sea generalizada. Posee elevada capacidad de conducción del calor y electricidad

## 10. Tratamiento térmico.

Procedimiento que propone modificar la estructura de los materiales metálicos mediante calentamiento y dar con ello otras propiedades.

Las herramientas y las piezas de las máquinas tienen que tener una dureza, una permanencia de poder cortante y una resistencia adecuadas a la utilización que han de tener. Por ejemplo, el filo de un cincel ha de estar enteramente templado. Los dientes de una rueda dentada, por el contrario, deben tener

capas exteriores duras y con ello resistentes al desgaste. Los núcleos de los dientes, sin embargo, tienen que permanecer tenaces con objeto de que puedan responder elásticamente a choques y a la flexión. Estas propiedades sólo se obtienen mediante una buena elección del material apropiado y de un conveniente tratamiento térmico.

10.1. Componentes de la estructura y transformación de un acero no aleado: el contenido de carbono es decisivo para las variaciones de las propiedades en el acero no aleado. Según sea el contenido de carbono se distinguen tres grupos principales de los aceros no aleados:

Acero con un 0.86% de contenido de carbono: tiene una cantidad equilibrada de ferrita y carburo de hierro y forma por esta causa cristales homogéneos. Estos cristales se llaman perlita, a causa de su aspecto perlado cuando se obtiene una micrografía metalográfica.

Acero con menos de 0.86% de carbono: su bajo contenido de carbono hace que su estructura, además de perlita, tenga ferrita sobrante. Son estructuras no equilibradas que se designan como ferrita-perlita. Los cristales de hierro puro (Fe) se llaman ferrita.

Aceros con más de 0.86% de carbono: contiene tanto carbono que después de la formación de perlita queda todavía un sobrante de carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , cementita). Es una estructura no equilibrada y se designa con el nombre de perlita-cementita. La cementita es el componente más duro de la estructura del acero.

10.2. Recocido: se entiende por recocer la acción de calentar lentamente a una determinada temperatura, la detención a esa temperatura y el lento enfriamiento subsiguiente. Se distingue entre recocido para eliminar tensiones, recocido para ablandar y recocido de normalización.

En el recocido para eliminar tensiones se disminuyen las tensiones aparecidas por la colada, el cilindrado, la forja, la soldadura o por una conformación con fuerte arranque de viruta. Para ello se calientan las piezas de una a dos horas y a continuación se enfrían muy lentamente. Las temperaturas para aceros sin alear están comprendidas entre los 550 y los 600°C; para aceros de baja aleación la temperatura se encuentra entre los 650 y 700°C.

10.3. Temple: el templado del acero se realiza en tres escalones; calentamiento a temperatura de temple, detención a esta temperatura y enfriamiento rápido. El acero hay que calentarlo primeramente con lentitud y después llevarlo rápidamente a la temperatura de temple. Para impedir un calentamiento demasiado rápido e irregular de las partes salientes y delgadas, y por lo tanto delicadas, de las piezas, lo que se hace es emplear cubrimiento protectores, como las tiras de amianto, pinturas y pastas protectoras.

En el enfriamiento rápido, la substracción de calor evita la regresión de la estructura. La dureza conseguida depende no solamente de la composición de los aceros, sino también de la rapidez del enfriamiento.

10.4. Revenido: Es volver a calentar después del temple. Tiene por objeto suprimir las tensiones y la gran fragilidad de las piezas. Según sea la temperatura de revenido, se elevan con ella la tenacidad del acero, pero disminuye correlativamente la dureza. Al recocer aparecen sobre una superficie brillante de acero los llamados colores de revenido, de los cuales cada uno corresponde a una temperatura determinada. Mediante envejecimiento (almacenaje) las piezas pierden las tensiones internas formadas en el tratamiento térmico, sin que ello disminuya su dureza.

10.5 Tratamiento térmico de los aceros de herramienta: los aceros de herramienta no aleados, los de aleación baja y los fuertemente aleados, exigen a causa de su diferente composición también un diferente tratamiento térmico. Por esta razón es necesario conocer exactamente la clase de acero antes de proceder al tratamiento térmico.

Los aceros de herramienta sin alear son aceros al carbono puros con 0.6 a 1.5% de carbono. Se calientan a temperaturas de 760 a 850°C y se enfrían bruscamente en agua de 20°C (temple al agua). En el enfriamiento tiene decisiva importancia la forma y la clase, así como la manera de sujetar la pieza al sumergirla y el movimiento dentro del líquido empleado para el enfriamiento. Al sumergir la pieza en el líquido de templar hay que hacerlo con la masa por delante, para facilitar la salida de burbujas y de vapor. La pieza hay que moverla constantemente cuando se está templando. El revenido debe seguir, lo más inmediatamente posible al temple y se reviene a temperaturas de 220 a 320°C, con refrigeración subsiguiente en agua. Con esto se aumenta la tenacidad, transformando la dureza vítrea en dureza corriente para el uso.

Los aceros de herramienta de baja aleación contienen de 0.8 hasta 1.7% de carbono, en total menos de 5% de cromo, tungsteno, níquel, molibdeno y vanadio. Según sea su composición se llevan a una temperatura de 780 a 850°C. Se templean en aceite o en agua. Templean totalmente y tienen una estructura de rotura aterciopelada. Adquirida la temperatura, se exponen al aire, sin corrientes, para enfriarlas a temperatura ambiente. Las temperaturas de revenido son de 220 a 320°C. Todo el tratamiento térmico es parecido al de los aceros sin alear.

Los aceros de herramienta de fuerte aleación tienen más del 5% en componentes de la aleación. Su contenido de carbono está comprendido entre un 0.3 y un 2.2%; contiene hasta un 18% de tungsteno, hasta un 11% de cobalto, así como adiciones de molibdeno, cromo y vanadio. La temperatura de temple está comprendida entre 950 y 1200°C y se templean en aceite, baño caliente o con un chorro de aire caliente a presión (temple al aire). Se enfría a continuación hasta la temperatura ambiente exponiendo la pieza al aire sin corrientes. Los aceros fuertemente aleados se templean completamente y se deforman poco. El recocido se realiza según sea su composición y el tratamiento de temple se hace entre 100 y 600°C. A diferencia de lo que ocurre con los aceros no aleados o los de baja aleación, no presenta reducción de dureza, sino que esta aumenta (revenido con aumento de dureza).

Tratamiento térmico de los aceros de construcción: se distingue entre el tratamiento superficial (obtención de dureza en la superficie) y mejorado o afino.

El templado superficial: se emplea cuando la pieza a tratar haya de tener una superficie dura, resistente al desgaste y un núcleo tenaz, como es el flanco de los dientes de las ruedas dentadas. El endurecimiento superficial se puede dar por aportación de carbono o nitrógeno en las zonas a endurecer en un acero no templeable y el endurecimiento de la capa exterior en un acero templeable. Al primer procedimiento pertenecen el endurecimiento por cementación o temple de cementación y el endurecimiento por nitruración. El segundo proceso puede realizarse por los sistemas de temple por flameado, temple por inmersión y temple por inducción.

Para el temple por cementación se usan los aceros pobres en carbono (0.10 a 0.15 % de carbono), así como los aceros de baja aleación. Para endurecer su superficie o capa exterior, hay que

aportarles carbono. Esto se realiza mediante medios (pueden ser sólidos, líquidos y gaseosos) llamados de cementación que cedan carbono, ya sea en cajas de cementación, en baños de cementación o por medio de gases.

El templeado por nitruración es un endurecimiento superficial en el cual penetra nitrógeno por la superficie de la pieza. En la capa marginal se forman combinaciones de hierro y nitrógeno, los conocidos como nitruros, que forman la dureza de la capa sin que sea necesario proceder al súbito enfriamiento del temple, produciendo una dureza que sobrepasa muy ampliamente a la producida en la cementación con carbono. La profundidad de dureza es solamente de algunas décimas de milímetro.

La carbonitruración es un procedimiento mixto. En él se carbura y se nitrura simultáneamente. Es en realidad un procedimiento de templeado o endurecimiento por cementación, en donde la adición de carbono contribuye a que se establezca una buena unión entre la capa nitrurada, y muy dura, con el material de base.

En el temple por flameado se calienta la superficie de la pieza por poco tiempo a la temperatura de temple, mediante llama de gas de alumbrado o de llama oxiacetilénica. Antes de que el calor haya podido penetrar hasta el interior de la pieza se enfría ésta mediante una ducha o regadera, consiguiendo no solamente endurecer la superficie, sino también tener el núcleo blando y tenaz.

En el temple por inmersión se calienta la capa exterior de la pieza a la temperatura de temple mediante inmersión en un baño neutro de sal. El calentamiento se realiza rápidamente, con regularidad y con cierre hermético al aire. Para este procedimiento se emplean los mismos aceros que para el temple por flameado.

En el temple por inducción el calor no se aporta del exterior, sino que se produce eléctricamente mediante corrientes de alta frecuencia, que recorren la capa exterior de la pieza. El calentamiento de la pieza se basa en la resistencia a la constante inversión del magnetismo en los cristales de material de la capa exterior, producida por una espiral que conduce corriente alterna de alta frecuencia. La profundidad del temple es tanto más pequeña cuanto más grande es la frecuencia. Después del calentamiento de la capa exterior se enfría la pieza, sacada del campo inductivo, en baño de agua o aceite. Puesto

que el calor no puede penetrar hasta el núcleo de la pieza, se obtiene una capa exterior dura, mientras el núcleo permanece blando y tenaz.

10.6. Tratamiento térmico de la fundición de hierro. Con el enfriamiento de la pieza de fundición se originan, tensiones que pueden producir en la pieza ya enfriada, o después de su mecanización con arranque de viruta, una deformación o la aparición de grietas. Mediante un largo almacenaje (envejecimiento natural) de las piezas al aire libre antes de ser mecanizadas (6 a 8 meses) las tensiones se relajan a lo largo del tiempo. Las piezas demasiado grandes o voluminosas para el horno pueden distenderse aplicando vibración entre 8 y 25 horas. Para piezas pequeñas, las tensiones pueden desaparecer mediante envejecimiento artificial en horno a temperaturas de hasta 300°C.

Si la fundición de hierro fue colada en molde metálico (coquilla), las piezas obtenidas tienen una superficie más lisa que las que han sido coladas en molde de arena y tienen además una notable mayor exactitud dimensional. Para la disminución del desgaste, puede templarse la fundición de hierro mediante flameado o por el procedimiento de inducción. No se pueden templar sino aquellos tipos de fundición en los que las laminillas de grafito estén embebidas en una estructura de fondo perlítica, con 0.6 a 0.9% de carbono. Con el templado por flameado se obtienen profundidades de 1 a 3 mm.

10.7. Tratamiento térmico de los metales ligeros. Con el tratamiento térmico de los metales ligeros se altera su estructura. Con ello varían también algunas propiedades, sobre todo la resistencia, el límite de elasticidad, el alargamiento y la dureza. El aluminio y las aleaciones de aluminio exigen distinto tratamiento térmico que las aleaciones de magnesio; pueden recibir un recocido de ablandamiento y algunas pueden ser revenidas.

Mediante el recocido de ablandamiento se disminuye la dureza y la resistencia, aumentando por ello el alargamiento; se obtiene por lo tanto una elevada deformabilidad.

Mediante el revenido (temple de segregación) puede elevarse notablemente la resistencia de algunas aleaciones de aluminio. La dureza aumenta con el revenido y el alargamiento disminuye. Las aleaciones de magnesio no se pueden revenir sino solamente ser sometidas al recocido de ablandamiento y deben decaparse inmediatamente después del tratamiento térmico, ya

que son poco resistentes a la corrosión.

## 11. Propiedades de los materiales

Las propiedades particulares de un material son importantes en el diseño de un componente de máquina y un diseño puede requerir más de una propiedad que de otra, dependiendo de la aplicación y la carga. La resistencia, la elasticidad y la ductilidad para los metales y otros tipos de materiales generalmente se determinan de las pruebas de tracción, en la cual la muestra o barra de ensayo (probeta), que ha sido previamente normalizada, se sujeta por ambos extremos en una máquina universal de ensayo. La probeta va provista de cabezas de sujeción cilíndricas, cónicas o provistas de rosca. La probeta se carga progresivamente en la máquina, hasta que rompa; la magnitud de la fuerza sobre la barra y su correspondiente cambio en longitud (deformación), son monitoreadas y registradas continuamente durante la prueba. Como el esfuerzo en la barra es igual a la fuerza aplicada dividida por el área, el esfuerzo es proporcional a la fuerza aplicada. Los datos de la prueba de tracción son mostrados en los diagramas esfuerzo-deformación, tal como lo indican las Figuras para el acero y el aluminio y otros materiales que no poseen punto de fluencia.

11.1. Resistencia última ( $S_u$ ): El pico de la curva esfuerzo deformación es considerado como la resistencia última a la tensión, conocida también como resistencia última o simplemente resistencia a la tensión.

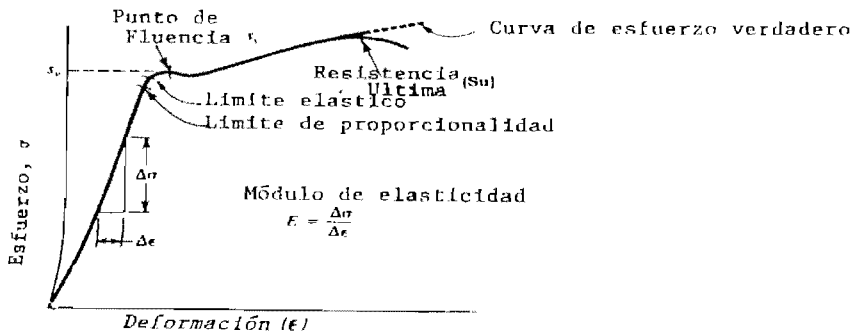


Figura 17. Diagrama típico esfuerzo-deformación para el acero.

Como lo muestran las Figuras (17 y 18) la curva cae después de este pico. Sin embargo, es de anotar que la instrumentación usada para crear los diagramas, dibuja carga-deflexión en lugar de esfuerzo-deformación. El esfuerzo aparente es encontrado dividiendo la carga por el área de la sección transversal original

de la barra. Después de que el pico es alcanzado, hay un decrecimiento en el diámetro de la barra, referenciado como rebaja de cuello. Así, la carga actuando sobre una pequeña área y el esfuerzo actual, continúan aumentando hasta la falla o punto de rotura.

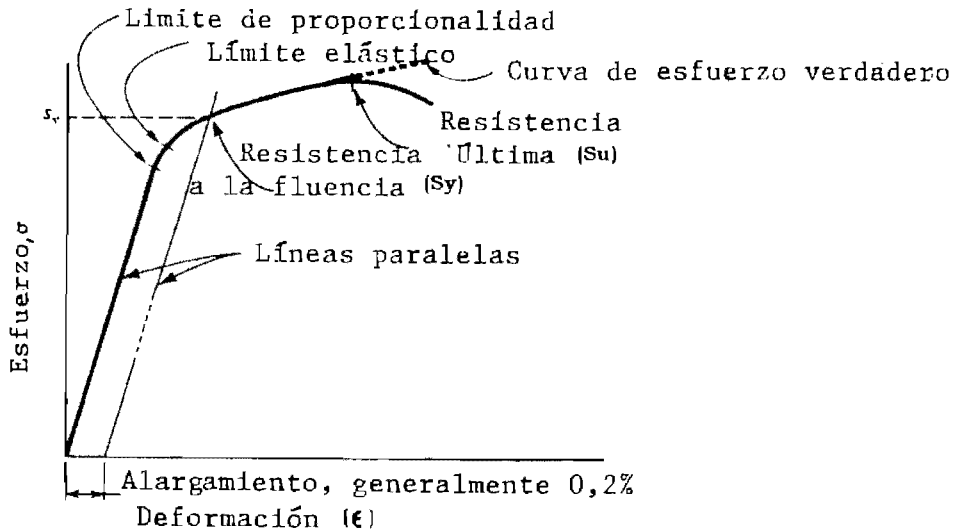


Figura 18. Típico esfuerzo deformación para el aluminio y otros metales con punto de fluencia cero.

11.2. Resistencia a la fluencia ( $S_y$ ): la porción de la curva en el diagrama esfuerzo-deformación, donde para un alto incremento de la deformación hay poco o nulo incremento en el esfuerzo, es conocida como la resistencia a la fluencia. Esta propiedad indica que el material fluye, es decir con esa sollicitación se alarga la probeta sin elevación de carga hasta que la estructura se haya nuevamente consolidado. La curva muestra aquí una clara inflexión. Si el punto de fluencia está completamente definido, la propiedad es llamada punto de fluencia más bien que resistencia a la fluencia. En las curvas típicas para metales no ferrosos como el aluminio o titanio o ciertos aceros de alta resistencia, se observa que no hay un punto de fluencia determinado. Para estos materiales que no tienen un punto de alargamiento claramente señalado, es decir cuando la curva del diagrama esfuerzo-deformación mantenga una marcha continua sin inflexión ninguna, se considera el límite 0.2 como límite de alargamiento. Este es el punto para el cual se produce un alargamiento permanente de 0.2% respecto a la longitud ( $L_0$ ) inicial. Se determina mediante una paralela al trazo recto de la curva en su parte inicial.

11.3. Límite de proporcionalidad: es el punto de la curva esfuerzo-deformación donde esta se desvía de la línea recta. Es decir, por encima de ese valor de esfuerzo, este no es proporcional a la deformación. Por debajo del límite de proporcionalidad se aplica la ley de Hooke. En el diseño mecánico, los esfuerzos en los materiales son raramente usados por encima de este límite.

11.4. Límite elástico: punto de la curva donde el material recobra su longitud primitiva al suprimírsele la carga. A partir de aquí al seguir subiendo la tensión se produce un alargamiento permanente. La dificultad para determinar los dos límites anteriores hace que no sean reportados frecuentemente en pruebas de los materiales.

11.5. Módulo de elasticidad a la tensión (E): para la parte del diagrama esfuerzo-deformación que es recta, el esfuerzo es proporcional a la deformación y el valor de E es la constante de proporcionalidad. El módulo de elasticidad indica la rigidez del material o su resistencia a la deformación.

11.6. Ductilidad: Indica cuanto se puede deformar un material al aplicar una fuerza (a mayor deformación, mayor es la ductilidad del material). La ductilidad es la cantidad de deformación plástica en el punto de ruptura y es expresada como elongación o alargamiento o medida como la reducción de área en el punto de ruptura (restricción):

$$\text{Elongación: } \epsilon = (\text{in/in}) = \frac{L - L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

donde  $L_0$ : la longitud inicial  
 $L$ : la longitud final

Reducción de área (RA) expresada en porcentaje:

$$RA = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100 \quad (3.2)$$

donde  $A_0$ : área de la sección transversal original  
 $A$ : área de la sección transversal final

A mayor ductilidad, mayor deformación en la parte sin fallar y mayor habilidad para resistir cargas de impactos. La medida de la ductilidad es importante porque muestra la propiedad que tiene el material para absorber sobrecargas y además mide la capacidad de un material para ser trabajado en frío (doblar, estirarse y conformarse).

11.7. Dureza: es la resistencia de un material a la penetración

y deformación permanente por una herramienta aguda o con punta (Figura 19). No existe una única medida de dureza y tampoco un ensayo universal aplicable a todos los materiales. Existen actualmente varios tipos de ensayo:

- Resistencia a la indentación.
- Energía absorbida bajo impacto.
- Resistencia al rayado.
- Resistencia a la abrasión.
- Resistencia al corte o al taladro.

Todas estas medidas son función de las fuerzas atómicas. La dureza a pesar que no puede usarse directamente en cálculos de diseño, sirve además: para control de calidad, diseño (indirectamente), desarrollo de aleaciones y selección de materiales.

Dureza Brinell ( $H_B$ ). Estandarizado según la norma ASTM-E10. Es un ensayo por indentación estática con limitaciones:

- No puede determinarse en materiales muy duros
- No puede utilizarse en secciones delgadas (cuchillas de afeitar)
- No se utiliza en capas endurecidas debido a:
  - . Indentación es mayor que las capas.
  - . El núcleo cede e invalida la medición.
  - . Puede producir grietas que conducen a fatiga.

Procedimiento:

- Superficie de muestra bien pulida.
- Carga se aplica con una bola de acero templado. Para materiales duros se utiliza una de carboloy (carburo de tungsteno).
- Se aplica 15s para ferrosos y 30s para no ferrosos.
- Espesor de la muestra: mínimo 10 veces la profundidad de indentación.

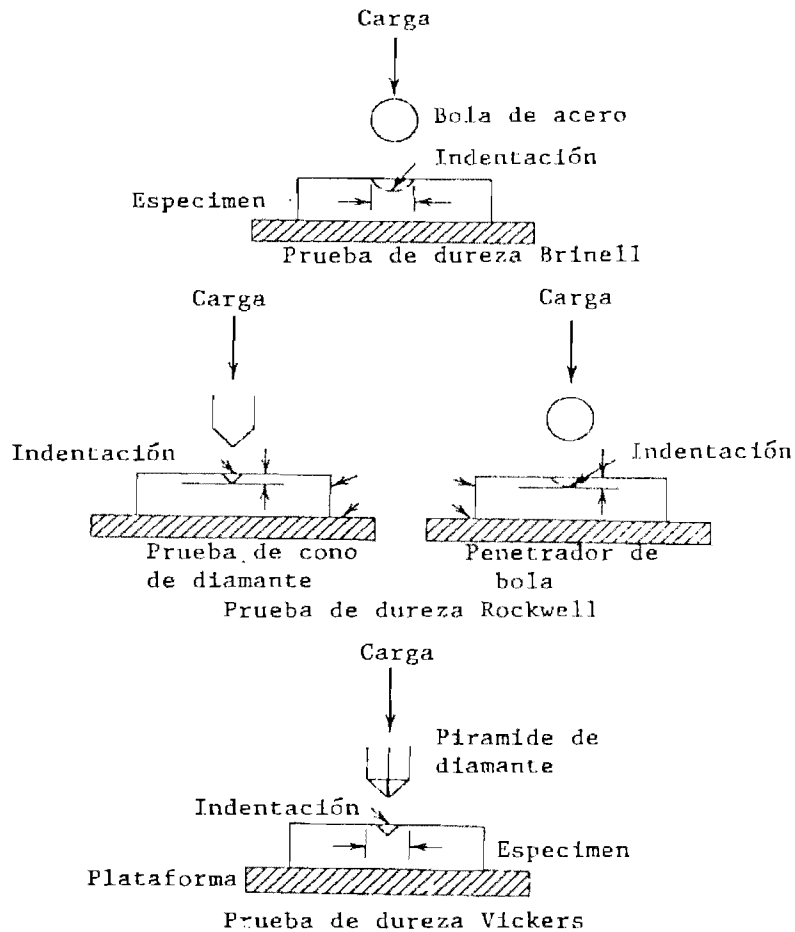


Figura 19. Esquema de dispositivos para la medida de la dureza.

Por definición la dureza Brinell es la presión por unidad de área de la indentación que permanece luego de la carga ser removida.

$$H_B = \frac{\text{Carga en la bola}}{\text{Área de indentación}} = \frac{2P}{\pi D^2 \left\{ 1 - \left[ \frac{d}{D} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}} \quad (3.3)$$

Este ensayo no es recomendable para materiales con dureza superior a 630 H<sub>B</sub>.

Cuando la profundidad de la indentación se mide justo después de retirar la carga aplicada, la dureza Brinell se obtiene de:

$$H_W = \frac{\text{Carga aplicada}}{\text{Área indentada}} = \frac{P}{\pi \cdot D \cdot t} ; P \text{ en kg y } t \text{ en mm} \quad (3.4)$$

Este índice sirve para tener una buena estimación de la resistencia última (S<sub>u</sub>) de un acero:

$$S_u = 0.45 H_B \text{ (kpsi)} \quad (3.5)$$

$$S_u = 3.10 H_B \text{ (MPa)}$$

Dureza Rockwell (ASTM - E-18). Se mide en un ensayo, también con carga estática dada; es más rápido que el Brinell, se utilizan menos carga y huellas más pequeñas. El valor de la dureza es un número arbitrario que está inversamente relacionado con la profundidad de la indentación. El indentador puede ser una bola de acero o un cono de diamante. Se usa una bola de acero de  $\phi = 1/16$  de pulgada con cargas de 60 ó 100 kg y de 150 kg cuando se usa el cono de diamante. Un medidor simple indica directamente el número de dureza.

Escalas (letras prefijos):	A	B	C
Indentador:	Cono	Bola de 1/16"	Cono
Carga principal (kg):	60	100	150
Aplicación típica	- Carburos de cementación - Capas cementadas	- Aleaciones de cobre - Aceros blandos	- Aceros - Fundiciones duras

Dureza Vickers: utiliza una máquina similar a la Brinell en la cual se hace una indentación y el valor de la dureza es determinado por la relación:

$$\frac{P}{A} \begin{cases} P: \text{carga en kg} \\ A: \text{área de indentación en mm}^2 \end{cases}$$

El indentador es de diamante y tiene forma de pirámide con base cuadrada, con ángulos entre caras opuestas de  $136^\circ$  (Figura 19). Permite medir durezas en materiales duros (mayores de 620  $H_B$ , valor límite de la escala Brinell) y se calcula como:

$$HV = \frac{2P \text{sen}(\frac{\alpha}{2})}{D^2} = \frac{1.8544P}{d^2}$$

P: varía entre 1 - 125kg

d: diagonal media

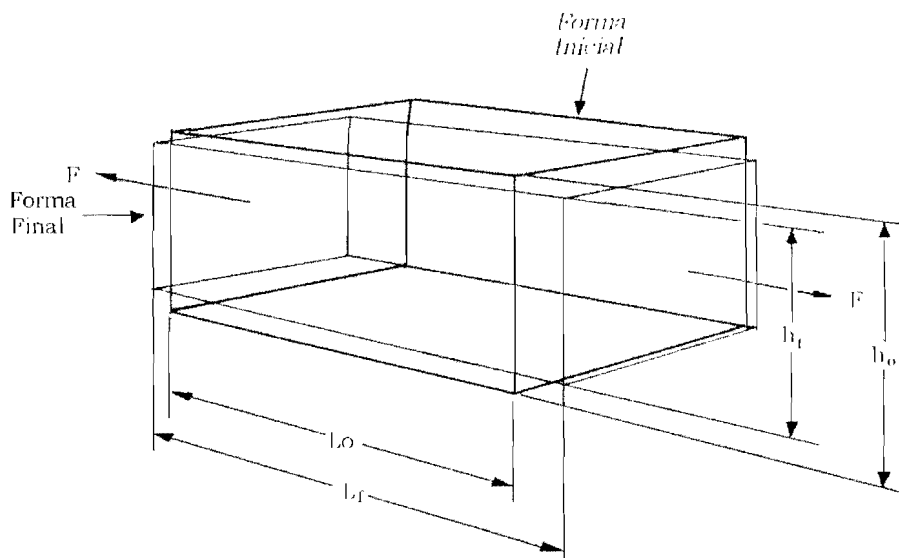
$\alpha$ : Ángulo entre caras ( $136^\circ$ )

11.8. Resistencia de fluencia al cortante ( $S_{sy}$ ) y resistencia última al cortante ( $S_{us}$ ): ambas resistencias son importantes propiedades de los materiales. Desafortunadamente ambos

factores son reportados muy aleatoriamente. Ambos parámetros pueden ser estimados como:

$$S_{sy} = S_y / 2 = 0.50 S_y \quad \text{y} \quad S_{us} = 0.75 S_u \quad (3.6)$$

11.9. Relación de Poisson ( $\nu$ ): La experimentación demuestra que un material sometido a una fuerza de tensión produce un alargamiento o deformación axial y un estrechamiento o deformación lateral, como se muestra en la Figura 20.



$$\begin{aligned} \text{Deformación axial} &= \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \epsilon_a \\ \text{Deformación lateral} &= \frac{h_0 - h_1}{h_0} = \epsilon_l \\ \text{Relación de Poisson} &= \frac{\epsilon_l}{\epsilon_a} = \nu \end{aligned}$$

Figura 20. Ilustración de la relación de Poisson ( $\nu$ ) para un elemento en tensión.

11.10. Módulo de Elasticidad al cortante o angular o módulo de rigidez ( $G$ ): definida como la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación por cortante. Junto con el módulo de elasticidad ( $E$ ) son índices de la rigidez o resistencia a la deformación de los materiales.

11.11. Maquinabilidad: referida a la facilidad con que un material puede ser maquinado para alcanzar una buena

superficie de acabado con razonable vida de servicio. Las tasas de producción son directamente afectadas por la maquinabilidad. Es difícil definir la medida de la propiedad relativa con la maquinabilidad, entonces la maquinabilidad es usualmente reportada en términos comparativos relacionando el desempeño de un dado material con uno estándar.

11.12. Resistencia al impacto: partes sujetas a cargas aplicadas repentinamente, choques o valores requeridos para resistencia al impacto. Una medida de la resistencia al impacto consiste en sujetar una muestra y golpearla rápidamente con una gran masa. La pieza absorbe energía del golpeador cuando ocurre la fractura y la cantidad de energía absorbida es reportada como la resistencia al impacto.

11.13. Resistencia a la fatiga o resistencia bajo cargas repetidas ( $S_f$ ): materiales sometidos a la aplicación de cargas repetidas o a condiciones de esfuerzo que varían con el tiempo miles o millones de ciclos, fallan debido al fenómeno de la fatiga. Los materiales se prueban bajo condiciones de cargas cíclicas controladas para determinar su habilidad para resistir este tipo de cargas. Los resultados se reportan como resistencia a la fatiga y será tema de interés en la asignatura Mecanismos.

11.14. Propiedades físicas. Se resaltan:

La densidad: definida como la masa por unidad de volumen de un material. En el sistema SI ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) y en el sistema inglés ( $\text{lb}/\text{pulg}^3$ ). En algunas aplicaciones, el peso específico o densidad específica, es usada para indicar el peso por unidad de volumen del material. Unidad típica ( $\text{N}/\text{m}^3$ ) en el SI y ( $\text{lb}/\text{pulg}^3$ ) en el sistema inglés donde la libra es tomada como libras-fuerza. El peso específico es designado con la letra ( $\gamma$ ).

Coefficiente de expansión o dilatación térmica ( $\alpha$ ): es una medida del cambio en longitud de un material debido al cambio de la temperatura. Se define como la relación entre la deformación normal ( $\epsilon$ ) y el cambio en temperatura ( $\Delta T$ ). Virtualmente todos los metales y plásticos se expanden con el incremento de la temperatura, pero los diferentes materiales se expanden a diferentes grados de temperatura. Para máquinas y estructuras que contienen partes de más de un material, los diferentes rangos de temperatura pueden tener un significativo efecto en el desempeño del montaje y sobre el esfuerzo producido.

Conductividad térmica: definida como la propiedad de un material que indica su habilidad para transferir calor. Donde

los elementos de máquinas operan en ambiente caliente o donde un significativo calor interno es generado, la habilidad de estos elementos para transferir calor al ambiente, puede afectar el desempeño de las máquinas. Por ejemplo, la reducción de velocidad de los engranajes de tornillo sinfin, típicamente generan calor friccional debido al roce entre el gusano con la rueda o engrane del sinfin. Si no hay una adecuada transferencia, el calor causa que el lubricante pierda su efectividad causando un desgaste rápido de los engranajes.

Resistencia eléctrica: para elementos de máquinas que conducen electricidad mientras soportan cargas, la resistividad eléctrica del material es tan importante como su resistencia. La resistividad eléctrica es una medida de la resistencia ofrecida por un dado espesor de un material y es medido en ohm-centímetros ( $\Omega\text{-cm}$ ). La conductividad eléctrica es una medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica y es a veces usada en vez de la resistividad. Es generalmente reportada como un porcentaje de la conductividad de un material de referencia.

## 12. Sistema de numeración numérica para el acero y el hierro

El sistema de numeración dispuesto por la Sociedad Americana de Ingenieros de automóviles (SAE) y por el Instituto Americano para el Hierro y el Acero (AISI), ayuda a los ingenieros a especificar un acero particular. La SAE, fue la primera organización técnica que reconoció la necesidad de un método de numeración numérica para los aceros y estableció un sistema.

El sistema basado en la composición química del material, incluye cuatro dígitos. Los dos primeros dígitos representan el tipo de aleación, y los dos últimos el contenido de carbono (0.XX%); por ejemplo un acero AISI o SAE 1010 es un acero al carbono simple con 0.10% de contenido de carbono (más o menos un pequeño porcentaje de tolerancia). En algunos casos cuando el contenido de carbono excede el 1%, se usan tres dígitos. La designación antigua AISI 52100 corresponde a un acero al cromo con aproximadamente 100 centésimos porcentuales de carbono.

En el año 1975 la SAE publicó el sistema numérico unificado para metales y aleación (UNS) que emplea un prefijo literal para designar el material: G, para el carbono y los aceros de aleación; A, para las aleaciones de aluminio; C, para aleaciones basándose en cobre; y S, para los aceros inoxidable. Algunos materiales no tienen un sistema de designación numérica por falta de consenso en la industria para su normalización.

La letra va seguida de un número de dos cifras que establecen la codificación de la composición o procesamiento, por ejemplo en el acero:

- G10 Acero al carbono simple
- G11 Acero al carbono con azufre o fósforo
- G 13 Acero al manganeso
- G23 Acero al níquel
- G25 Acero al níquel
- G31 Acero al níquel-cromo
- G33 Acero al níquel-cromo
- G40 Acero al molibdeno
- G41 Acero al cromo-molibdeno
- G43 Acero al níquel-cromo-molibdeno
- G46 Acero al níquel-molibdeno
- G48 Acero al níquel molibdeno
- G50 Acero al cromo
- G51 Acero al cromo
- G52 Acero al cromo-vanadio
- G86 Acero al cromo-níquel-molibdeno
- G87 Acero al níquel molibdeno
- G92 Acero al manganeso-silicio
- G94 Acero al níquel

En el caso de los aceros la designación se completa con un número, generalmente de tres cifras, que indican el tanto por ciento de contenido en carbono en centésimas. Por ejemplo el material G10450, es un acero al carbono simple con un 0,45 % de carbono.

En la Tabla 3.1. Se describen algunas propiedades de los aceros con tratamiento térmico.



TABLA 3.1. Propiedades de algunos aceros con tratamiento térmicos. HR: rolados en caliente. CD: estirados en frío

UNS NÚM	SAE Y/O ASIS NO		RESISTENCIA A ULTIMA (Su) MPa (kpsi)	RESISTENCIA DE FLUENCIA (Sy) MPa (kpsi)	ELONGACION EN 2 In. %	REDUCCIÓN EN AREA %	DUREZA BRINELL
G10060	1006	HR	300(43)	170 (24)	30	55	86
G10100	1010	HR	320(47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370(53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	3010 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

Fuente: 1986 SAE Handbook, p 215.

En el caso de las aleaciones de aluminio el primer número indica el tipo de procesamiento que ha adquirido o el tipo de aleación y el segundo dígito indica el grupo de aleación principal: A0 Aleación fundida,.... ,A9 Aluminio forjado.

Los dos últimos describen la aleación específica o indican los límites de pureza de aleación.

Ax1 Aluminio con pureza de 99,00 %

Ax2 Aluminio aleado con cobre

Ax3 Aluminio aleado con manganeso

Ax4 Aluminio aleado con silicio

Ax5 Aluminio aleado con magnesio

Ax6 Aluminio aleado con magnesio y silicio

Ax7 Aluminio aleado con zinc

### 13. Propiedades mecánicas de algunos materiales

Las propiedades mecánicas varían en gran medida con la composición, forma de obtención y tratamiento posterior de cada material. Las resistencias indicadas en las tablas son orientativas en el proceso de diseño. Siempre habrá que remitirse a las especificaciones de compra de los mismos. En la tabla 3.2 se presentan algunas propiedades de los plásticos termoestables.

TABLA 33. Propiedades de los plásticos termoestables

Material	Modulo de elasticidad E (MPa)	Límite de rotura Su (Mpa)	Resistencia al calor	Resistencia química	Dureza rockwell
Alquílicos	0,05-0,30	3-9	Buena	Aceptable	99M
Alílicos		4-10	Excelente	Excelente	105-120M
Aminos	0,13-0,24	5-8	Excelente	Excelente	110-120M
Epóxicos	0,03-0,30	5-20	Excelente	Excelente	80-120M
Fenólicos	0,10-0,25	5-9	Excelente	Buena	70 95E
Siliconas	44,8	5-6	Excelente	Excelente	80-90M

### 14. Ensayo de materiales

Mediante el ensayo de materiales, o bien se verifican determinadas propiedades de estos o bien se determina su composición química para deducir de ella puntos de referencia respecto a su pureza, resistencia a la corrosión y trabajabilidad. De todo ello pueden deducirse orientaciones para el mejor empleo de los materiales. Mediante procedimientos especiales puede determinarse si existen defectos (grietas, inclusiones de escoria, cavidades, etc.) y en qué sitio están. Una misión importante del ensayo de materiales consiste en determinar la causa de una rotura o una deformación no deseada de una pieza durante el funcionamiento. Las condiciones de la

verificación o ensayo están ampliamente especificadas por las normas ISO o DIN.

Pruebas en el taller: mediante sencillos procedimientos de verificación se posibilita conocer la clase de material que se tiene y sus propiedades, así como formar juicio sobre su comportamiento al ser trabajado. Con estos, no se obtienen resultados numéricos exactos, sino únicamente indicaciones sobre determinadas propiedades.

Ensayo de chispa: el color y la forma de las chispas producidas por un acero al ser esmerilado, puede indicar la clase y composición de ese material. Aunque no se obtienen datos exactos sobre la composición del acero, si se puede deducir en esta prueba, para evitar errores groseros, su aplicación y sobre todo su tratamiento térmico. Existen tablas de colores para la prueba de chispa.

Ensayo de rotura: la superficie de rotura da indicaciones sobre su clase, composición y sobre todo su tratamiento previo y térmico. En el caso del acero, el granulado grueso indica, en general, que se trata de un material de poca resistencia y dureza. El grano fino indica alta resistencia y dureza. El juicio que se emite únicamente basado en la superficie de rotura, es poco seguro. En el caso de piezas templadas que se hayan roto, es posible con buena exactitud, determinar si la rotura ha sido sobrecarga (rotura sana), un enfriamiento demasiado brusco (grieta debida al temple) o un calentamiento demasiado alto (grano muy basto).

Ensayos mecánico: la mayoría de estos ensayos se realizan en la sala de verificación de un taller y son los ensayos con sollicitación progresiva o con sollicitación brusca: ensayo de tracción, ensayo de compresión, ensayo de corte o de cortadura (se determina la resistencia al esfuerzo cortante de materiales metálicos), ensayo de plegado (sirve para la verificación de la facilidad de doblado de un material a temperatura ambiente), el ensayo de flexión al choque en pieza entallada (se verifica la tenacidad del acero y de la fundición de acero), ensayo de chapas ( para juzgar si son apropiadas para la embutición y el doblado), ensayos de fatiga y ensayos de dureza.

Ensayo químico: la investigación química de un material da una idea exacta sobre su composición, esto es: clase y cantidad de los componentes de la aleación. Debe realizarse en el laboratorio con personal técnico preparado.

Análisis espectrográfico: consiste en provocar en el espectroscopio un arco voltaico entre un electrodo y la probeta. Los rayos luminosos radiados con ello se descomponen mediante un prisma de cristal y basándose en el espectro (banda luminosa) así producido, puede conocerse la composición del material. El procedimiento no da datos exactos sobre la composición porcentual de la aleación como los que da el análisis químico, pero la exactitud obtenida es suficiente y el tiempo tan corto utilizado en el ensayo le da ventaja comparativa.

Ensayo sin destrucción de la pieza. Este ensayo sirve para la determinación de defectos en el material (sopladuras, grietas, etc.). Para este ensayo se emplean campo de fuerza magnéticos, eléctricos, ondulaciones supersónicas, así como rayos X.

Los rayos Roentgen o rayos X penetran a través de la mayoría de los materiales. Según sea la resistencia que encuentren en su camino a través de la pieza ennegrecen más o menos intensamente una película dispuesta de aquella o dan sobre una pantalla una imagen sombreada que por, medio de un amplificador y un dispositivo óptico adecuado puede hacerse bien visible. Las cavidades, burbujas gaseosas o grietas se hacen visibles, por la menor densidad del material, mediante un mayor ennegrecimiento de la película o mediante la presencia de sitios claros sobre la pantalla.

Diversos elementos como el radio y muchos isótopos como el cobalto 60 o el iridio 192, emiten rayos invisibles. Una parte de estos rayos son los llamados rayos gamma que se emplean para el ensayo de materiales sin destrucción de la pieza. Estos rayos atraviesan, por ejemplo, la fundición de acero hasta de 200 mm de espesor.

## 15. Corrosión y protección anticorrosiva

Las normas definen la corrosión, como la destrucción de los materiales a consecuencia de procesos y reacciones químicas o electroquímicas con el medio que los rodea. Lo anterior indica que la corrosión no sólo se da en metales sino en cualquier otro material. Este proceso es acelerado por el oxígeno, el agua, los productos químicos o biológicos, la temperatura y el cambio en la composición fisico-química del material. Por otra parte la intensidad de la corrosión depende notablemente de la clase de medio que rodea el material, por lo tanto, depende de que el aire sea más o menos húmedo (corrosión atmosférica), de que este rodeado el material por agua de mar, por ácidos, por lejía, etc.

El costo anual y los daños y gastos producidos por la corrosión son muy altos, por lo tanto se hacen grandes esfuerzos para evitar la corrosión o al menos por mantenerla dentro de límites soportables, y más cuando se trata de materiales metálicos. Si añadimos a ese costo el valor del tiempo improductivo originado en los paros obligatorios de la producción, mientras se realizan trabajos de reparación y pintura, se tendrá una suma exorbitante de dinero gastado en la lucha contra la corrosión. Pero, aunque la corrosión es inevitable, su acción destructiva puede reducirse considerablemente escogiendo los metales y aleaciones más apropiados para el ambiente y condiciones que deben soportar, diseñando de un modo adecuado los objetos y sobre todo con un buen programa de protección. Para la escogencia de un sistema apropiado de protección, es necesario conocer:

- El fenómeno de corrosión y la forma como se presenta.
- Los agentes corrosivos y su agresividad.
- Las normas básicas del diseño de los objetos o piezas para la protección anticorrosiva.
- Las pinturas, sus propiedades, preparación de superficie, usos y aplicación.
- Las normas de seguridad para el manejo, aplicación y almacenamiento de pinturas.

#### 15.1. Clases de corrosión en los metales.

Corrosión química: muchos materiales pueden ser alterados desde la superficie por ataques químicos. En estas reacciones juegan un papel importante el oxígeno y con él la oxidación. En estos procesos ejercen su actividad química no solamente los líquidos (humedad, ácidos, soluciones salinas, etc.), incluso también los gases y vapores. Las altas temperaturas contribuyen a acelerar el proceso de corrosión.

Si con la oxidación se forma una capa densa y consistente, como pasa con el cobre y el aluminio, esa capa actúa como protección contra el progreso de la corrosión. Por el contrario, si en la corrosión química se produce una capa suelta y porosa, como el herrumbre y el orín, no se obtiene con ella protección alguna. Un metal es tanto más noble, cuanto menos susceptible sea de descomposición química, como lo son el oro, el platino y la plata.

Corrosión electroquímica: para que se produzca tiene que existir un líquido conductor de la electricidad, un electrólito y dos metales distintos. Ejemplos de electrólitos son el agua, la humedad de la atmósfera o el sudor de las manos. En el caso de

corrosión electroquímica se producen idénticos procesos que los que tienen lugar en un elemento galvánico.

En la corrosión electroquímica se distinguen la corrosión de contacto, la corrosión intercrystalina, la corrosión transcristalina y la corrosión con tensión mecánica y formación de grietas superficiales.

Corrosión de contacto: si los distintos metales, sin capa aislada intermedia, se ponen en contacto con un electrólito, queda constituido un elemento de corrosión, donde el metal menos noble resulta destruido. Ejemplo: entre el carbono y el cinc, en cubiertas de cinc que están próximas a instalaciones en que haya fuerte producción de hollín, es el caso de la mayoría de las fábricas. Los depósitos de hollín constituyen el polo positivo y el carbono se comporta electroquímicamente como un metal.

La corrosión intercrystalina o corrosión entre cristales metálicos, se presenta cuando se añade humedad al formarse corriente entre los cristales, como ocurre en un elemento galvánico. Los cristales de polaridad negativa son corroídos, con lo que se destruye la estructura.

La corrosión transcristalina o corrosión dentro de los mismos cristales se da cuando existen grietas que pasan por el interior de los cristales de un material que pueden producir, en caso de sollicitaciones alternadas, tensiones eléctricas entre las partes de cada cristal. Esto conduce a la corrosión dentro de los cristales afectados y es típico en los aceros austeníticos.

Corrosión con formación de grietas existiendo tensión mecánica. La corrosión puede conducir a la formación de pequeñas grietas superficiales y si simultáneamente se presentan sollicitaciones mecánicas del tipo alternas, esas grietas actúan como entalladuras con un elevado peligro de rotura.

15.2. Resistencia a la corrosión de los principales materiales metálicos.

El acero sin alear es poco resistente a la corrosión. Esta constituido por cristales de diferentes clases que en la escala de tensiones se hallan muy distantes entre sí.

El acero aleado presenta menores tensiones eléctricas intercrystalinas y por esto es más resistente a la corrosión que los aceros sin alear.

El acero inoxidable está aleado de tal modo que sus cristales o son uniformes o están muy juntos a otros en la escala de

tensiones. Como el nombre lo indica, los aceros inoxidable son más resistentes a la corrosión y a la oxidación que los aceros simples al carbono y los de más baja aleación. Esta superior resistencia a la corrosión es obtenida de la adición de cromo en porcentajes de 10.5% o superiores. La capacidad protectora de las películas de óxido de cromo puede ser mejorada por incrementos más altos de cromo y la adición de níquel, molibdeno y otros elementos aleantes. Los aceros inoxidable resisten a la corrosión en un amplio rango de condiciones, pero ellos no son inmunes a todos los medios. Los tipos más probable de ataques son: picado (ocurre cuando la capa protectora se rompe en pequeñas áreas aisladas, tal como cuando iones de cloro o sales oxidantes contactan la superficie); la corrosión por hendidura ( resulta de diferencias locales en la concentración de oxígeno asociadas con depósito en la superficie del metal, empaquetaduras, traslape en juntas o hendiduras debajo de las cabezas de pernos o remaches donde pequeñas cantidades del líquido pueden ser colectadas y permanecer estancadas) y corrosión bajo tensión, definida como la acción combinada de esfuerzos estáticos y la corrosión, acción que conduce al agrietamiento o fragilidad de un metal. Sólo esfuerzos de tensión causan este tipo de falla. Prácticamente todos los metales y aleaciones (excepto los metales de alta pureza) están sujetos a corrosión bajo tensión en ciertos medios. Los aceros inoxidable han sido ampliamente usados a temperaturas elevadas, por tanto existe muy buena información acerca de su comportamiento ante la corrosión.

El hierro fundido contiene carbono en forma de grafito y está por esto más expuesto a la corrosión intercrystalina. La superficie sin trabajar es más resistente que las trabajadas a causa de la costra de fundición, que contiene menos grafito.

El cobre, especialmente el cobre electrolítico, tiene cristales uniformes y es muy resistente. Cuando está expuesto al aire se recubre de una capa protectora insoluble al agua conocida como pátina o cobre carbónico. El cobre puede ser atacado por el ácido sulfúrico, el ácido sulfuroso y los cloruros, pues impiden la formación de esa capa protectora. Adiciones de cobre de 0.25% son utilizadas en los aceros al carbono para mejorar su resistencia a la corrosión a la intemperie. Adiciones hasta de 4% se utilizan para mejorar la resistencia mecánica y la resistencia a la corrosión.

Las aleaciones cobre-cinc, son menos resistentes a la corrosión que el cobre.

El aluminio puro, se recubre muy rápidamente con una capa densa de óxido de aluminio, presentando una muy buena resistencia a la corrosión

Las aleaciones de aluminio son poco resistentes a la corrosión, especialmente cuando contienen cobre.

Las aleaciones de magnesio son fácilmente susceptibles a la corrosión y poco resistentes a las acciones químicas.

### 15.3. Protección anticorrosiva de los metales.

La vida y la seguridad de funcionamiento de las piezas y elementos constructivos dependen frecuentemente del grado en que se puedan evitar los procesos de corrosión. Todos los procedimientos de protección anticorrosivo tienden, o bien evitar la formación de elementos galvánicos, o bien a impedir el ataque de sustancias que descompongan químicamente los materiales de construcción.

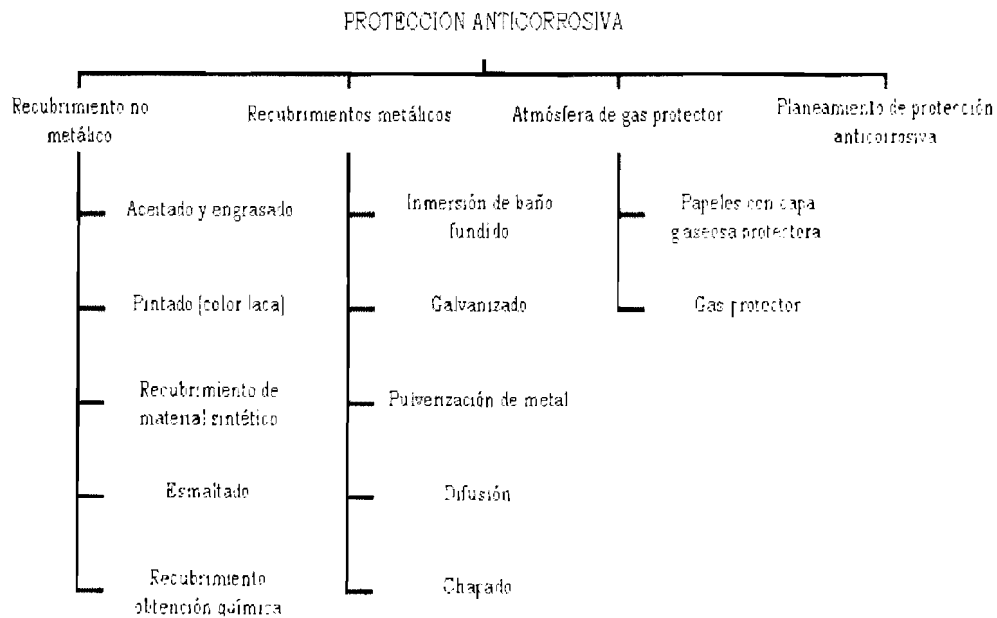


Figura 21. Procedimientos de protección anticorrosiva

15.4. Recubrimientos no metálicos: los recubrimientos no metálicos impiden el contacto de la superficie de las piezas con los agentes que pudieran atacarlas.

Aceitado y engrasado: muchas piezas de acero y de hierro tienen que permanecer brillantes con vistas a su utilización (aparatos de medición, superficies de deslizamiento, roscas, pernos, etc.). Estas piezas se protegen contra la oxidación mediante aceitado o engrasado. Los aceites y las grasas tienen que estar exentos de ácido; no deben atacar al metal. Antes del engrase tienen que estar las piezas metálicamente limpias. Se emplean aceites minerales o grasa mineral (vaselina). Los metales ligeros también pueden protegerse, durante su almacenaje, mediante aceitado o engrasado.

Pinturas: se entiende por pintura una aplicación uniformemente distribuida de materiales colorantes sobre un fondo al cual quedan adheridos después de secarse. Entre los materiales empleados cabe distinguir principalmente las pinturas al aceite, los barnices al aceite y los barnices de resinas sintéticas.

Las pinturas pueden, según el objeto o aplicación y la calidad exigida, estar constituidas por una o por varias capas. Se distingue entre la pintura de fondo y la de cubrimiento, pudiendo ser ambas de varias capas. Es misión de la pintura de fondo constituir un elemento de enlace entre la superficie-base que se trata de proteger y las demás capas que se vayan aplicando. Esa capa de fondo tiene que comportarse como químicamente neutra respecto a la pieza, debe adherirse a ella bien y constituir para las demás capas un buen fondo adhesivo. La capa de cubrimiento toma a su cargo la protección de las capas que se hallan debajo. Tiene que ser tan impermeable al agua como sea posible, resistente a la luz, dura, pero al mismo tiempo elástica y, en circunstancias, resistente al calor y ofrecer buen aspecto.

*De la preparación de la superficie de la pieza depende de modo esencial la calidad de la pintura. Antes de proceder a aplicar la pintura hay que eliminar cuidadosamente de las superficies todo óxido o capas corroídas o de suciedad que pudieran existir. Para la preparación mecánica se emplean cepillos de acero o como medio especialmente eficaz el "chorro de arena". Se emplea arena seca o pequeñas bolas de acero que se lanzan mediante aire a presión contra la superficie de la pieza.*

A los medios químicos para tratamiento previo de las superficies pertenecen, entre otros, el decapado y el desengrasado. El decapado con ácidos diluidos sirve para eliminar capas de cubrimiento o para rascado de fondo con objeto de conseguir una mejor adherencia de la pintura.

Si se quiere que el recubrimiento se adhiera de modo especialmente bueno, hay que desengrasar bien las superficies a proteger.

Dentro de ciertos límites los llamados Wash-Primer, colores de fondo adhesivos para metales, actúan en el sentido de inhibir la corrosión. Los Primer son combinaciones de cromatos, resinas sintéticas y ácidos de fósforo que en virtud de una transformación química actúan sobre el fondo (la superficie de la pieza) como coartadores de la corrosión. Se aplican en capas muy finas y sirven como capa de fondo o de base para elevar la protección anticorrosiva y el poder adherente de las demás capas.

Cuando se emplean pinturas al aceite, la auténtica protección antióxido está constituida por un recubrimiento de fondo con minio u óxido de plomo  $Pb_3O_4$  mezclado con aceite de linaza.

Las pinturas al aceite son flexibles pero no muy duras. Si se trata de pinturas de barniz, lo que se hace es dar una capa de base con barniz. Si se desean superficies muy lisas puede darse a continuación, y para nivelar las pequeñas irregularidades, un emplastecido y después pasar papel de esmeril y agua. Sólo después de esto se aplica la verdadera capa de barniz.

Los barnices constan de las llamadas lacas, que como componente no volátil quedan sobre la pieza, después del secado, a modo de capa o película de barniz, y del solvente volátil que mantiene en disolución a las lacas antes de aplicarse el barniz sobre la pieza y durante la aplicación. Como procedimientos de aplicación de pinturas se emplean el de pulverización, el de brocha, el de laqueado con pistola y campo eléctrico, el de inmersión y otros.

El procedimiento de pulverización suministra un recubrimiento uniforme y ocupa poco tiempo. Para ello se emplean pistolas de pulverizar.

Se distingue entre pulverizado en frío y pulverizado en caliente. En el laqueado por pulverización y campo eléctrico el barniz finamente pulverizado es atraído por la pieza metálica por medio de un intenso campo eléctrico. La ventaja de este procedimiento radica en la económica y uniforme aplicación de la capa incluso en los sitios difícilmente accesibles de la pieza.

En el laqueado por inmersión y campo eléctrico (procedimiento electróforo), se sumerge la pieza en un baño de pintura.

Mediante aplicación de una tensión se obtiene igualmente una aplicación económica y uniforme incluso en los sitios difícilmente accesibles.

Recubrimientos de material sintético: los recubrimientos de material sintético protegen contra la corrosión y aíslan eléctricamente. La aplicación se realiza mediante pulverización por llama, mediante sintetizado por remolinado o electrostáticamente.

Esmaltado: la masa de esmalte consta de polvo de vidrio y sustancias colorantes. Se lleva esta masa sobre la superficie de la pieza por pulverización o por inmersión y se somete en el horno de esmaltar a temperaturas entre los 600 y los 1000°C.

Recubrimiento obtenido químicamente sobre los metales ligeros. Procedimiento Eloxal (el nombre hace referencia a las palabras aluminio oxidado eléctricamente, en otro orden diferente al castellano). En la eloxalización se disponen una pieza de aluminio, o de una aleación de aluminio, como polo positivo (ánodo) y una placa de plomo negativo (cátodo) en un baño con ácido sulfúrico como electrolito. Si pasa durante algún tiempo corriente continua por el dispositivo, se forma sobre la pieza (ánodo), en virtud del oxígeno que se libera, una capa de óxido que es la capa de eloxal. Este procedimiento se llama también de oxidación anódica.

15.5 Recubrimientos metálicos: para obtener una buena protección contra la corrosión mediante recubrimientos metálicos, es importante conocer el comportamiento electroquímico del metal de protección respecto al metal de base. Si en un recubrimiento de cinc sobre acero se deteriora el recubrimiento y existe además humedad, el cinc es de polaridad negativa respecto al metal de base.

En un recubrimiento de níquel sobre acero, el níquel es electroquímicamente más noble que el metal de base, es decir positivo. Al deteriorarse el recubrimiento resultará por ello atacado el metal de base. La corrosión prosigue por debajo del metal de recubrimiento, hasta que la oxidación producida hace con su gran volumen que se desprenda la capa de níquel.

Los principales procedimientos de aplicación de metales son: la inmersión en metal fundido (llamado procedimiento de inmersión en baño fundido o procedimiento de metalizado al fuego), el metalizado galvánico, el pulverizado del metal líquido con pistola, el procedimiento de difusión y el chapeado o chapado.

Procedimiento de inmersión en baño fundido. Las piezas se limpian y se desengrasan primero cuidadosamente en un baño ácido. A continuación se sumergen en metal fundido (por ejemplo estaño o cinc) que se adhiere a la superficie de la pieza en forma de capa delgada.

Metalizado galvánico. Las piezas se sumergen, por ejemplo en el cobreado, en una solución de sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) y agua y se conectan al cátodo (polo negativo) de un manantial de corriente continua. El ánodo (polo positivo) se une a una placa de cobre. Por la acción de la corriente eléctrica pasan los iones  $\text{Cu}$  al electrodo negativo (cátodo) y forman allí un recubrimiento. El grupo ácido  $\text{SO}_4$  va simultáneamente contra la corriente y ocasiona la disolución de más átomos  $\text{Cu}$  de la placa de cobre. De modo análogo se pueden producir sobre piezas metálicas, recubrimientos de níquel, cromo, cadmio, cinc, plata y oro. Como ánodo se emplea siempre una placa del metal protector y como electrolito la disolución acuosa de una sal de este metal.

Pulverizado de metal. El metal de recubrimiento en forma de alambre se aporta a una pistola de metalizar (de pulverizar) y se licua mediante una llama de gas o por vía eléctrica. Se pueden emplear los metales de recubrimiento más variados, como por ejemplo cinc, aluminio, acero aleado.

Procedimiento de difusión (por ejemplo cromado). Este procedimiento se basa en la mezcla automática, superficial de gases o metales provocada por el movimiento que confiere el calor a las moléculas (difusión = mezcla íntima, extendiéndose una sustancia en la otra).

En el cromado se enriquece, se satura, con cromo la superficie exterior de piezas de acero. Con este objeto se calientan las piezas en cámaras cerradas en las cuales se vaporizan a unos  $1000^\circ\text{C}$  sales de cromo (generalmente cloruros). Con esto penetra el cromo en la superficie de las piezas y forma una excelente protección anticorrosiva. Con el cromado se forma una zona parecida en su estructura a la del acero anticorrosible; en esta capa el contenido de cromo disminuye hacia el interior. Los más adecuados para este tratamiento son los aceros con bajo contenido de C y los aceros con titanio.

15.6 Atmósfera gaseosa protectora: los papeles con capa gaseosa protectora se emplean para proteger contra la corrosión en el transporte, en el almacenaje y como capa intermedia durante la fabricación de piezas metálicas.

Los papeles van impregnados con sustancias químicas que desprenden continuamente gases; estos gases forman una envoltura gaseosa protectora.

La eficacia de estos papeles es muy duradera. Se prestan sobre todo para protección de acero y hierro fundido y también de metales no férreos tales como el aluminio y el latón.

El empleo de una atmósfera gaseosa protectora es cada vez más frecuente para fabricar y trabajar materiales con objeto de evitar su oxidación. Este es el caso, por ejemplo, del sinterizado. Planeamiento de una protección anticorrosiva: el constructor tiene ya una considerable influencia sobre la protección anticorrosiva. Él puede elevar la seguridad contra la corrosión mediante construcción correcta a efectos de protección anticorrosiva, mediante empleo de materiales resistentes a la corrosión y mediante un acabado favorecedor de la protección anticorrosiva. Así, por ejemplo, deberá poderse evacuar por sí solo de las cavidades o espacios huecos o vacíos, un eventual electrólito que pudiera formarse (agua de condensación). También carecería de sentido el empleo de un material resistente a la corrosión y simultáneamente disminuir por otro lado la protección anticorrosiva mediante un acabado técnicamente desfavorable en la soldadura.

#### PROBLEMAS

1. Si un material tiene una resistencia a la fluencia  $S_y = 30000$  psi, cual es su dureza?
2. Compare la dureza Rockwell C30 con la dureza Brinell.
3. Defina la resistencia última a la tensión
4. Defina punto de fluencia.
5. Defina la resistencia a la fluencia y describa como es medida.
6. Qué tipo de materiales tienen punto de fluencia?
7. ¿Cuál es la diferencia entre el límite de proporcionalidad y el límite elástico?
8. Defina la ley de Hooke.
9. Que propiedad de un material es una medida de su rigidez?
10. Qué propiedad de un material es una medida de su ductilidad?

11. Defina relación de Poisson.
12. Si un material tiene a tensión un módulo de elasticidad de 114 GPa y una relación de Poisson de 0.33, cuál es el módulo de elasticidad a cortante?
13. Un material tiene una dureza Brinell de 525. ¿Cuál es su dureza aproximada en la escala C Rockwell?
14. Pruebas de laboratorio dan a un acero una dureza Brinell de 450. ¿Cuál es aproximadamente su resistencia a la tensión?
15. Describa dos pruebas usadas para medir la resistencia al impacto.
16. ¿Cuáles son los principales constituyentes de un acero?
17. ¿Cuáles son los principales elementos de aleación del acero AISI 4340?
18. Nombre cuatro materiales comúnmente usados para ejes.
19. ¿Qué tipos de aceros inoxidables son no magnéticos?
20. ¿Cuál es el principal elemento de aleación que da al acero inoxidable resistencia a la corrosión?
21. Describa tres tipos de fundición.
22. Describa tres tipos de usos de las aleaciones de titanio.
23. ¿Cuál es el principal constituyente del bronce?
24. Nombre dos usos del bronce en el diseño de maquinaria agrícola.
25. Describa las diferencias entre los plásticos con endurecimiento por calor y los termoplásticos.
26. Sugiera un material plástico para cada uno de los siguientes usos:
  - Engranajes
  - Cojinetes
  - Tubos
  - Ruedas
  - Ejes

27. Nombre ocho factores sobre las cuales el proyectista tiene control cuando especifica un material compuesto.
28. Defina el término compuesto.
29. Nombre cuatro resinas base usadas para materiales compuestos.
30. Nombre cuatro tipos de fibras de refuerzo usados para materiales compuestos.

