

4.1

MECÁNICA DE FLUIDOS

Actos tan cotidianos como tomar una ducha, respirar o beber agua, requieren necesariamente la circulación de fluidos. El estudio de la mecánica de fluidos puede ayudarnos tanto para comprender la complejidad del medio natural, como para mejorar el mundo que hemos creado. Si bien la mecánica de fluidos está siempre presente en nuestra vida cotidiana, lo que nos falta conocer es como se expresa esta información en términos cuantitativos, o la manera en que se diseñan sistemas con base en este conocimiento, mismos que se utilizarán para otros fines.

El proyecto analizará principios de hidrostática y de la hidrodinámica.

El conocer y entender los principios básicos de la mecánica de fluidos es esencial en el análisis y diseño de cualquier y sistema en el cual el fluido es el elemento de trabajo.

Es bastante común realizar estudios en modelo reducido para determinar las fuerzas aerodinámicas y estudiar el flujo alrededor de edificios, puentes y otras estructuras complejas. El diseño de turbo maquinarias como bombas, hélices y turbinas de todo tipo requieren claramente de conocimientos de mecánica de fluidos. La lubricación es también un área de aplicaciones importantes. Los sistemas de calefacción y de ventilación, tanto de viviendas e industrias como de construcciones subterráneas, túneles y otros, así como el diseño de sistemas de cañerías son ejemplos en los cuales las técnicas de diseño están basadas en la mecánica de fluidos. Incluso el sistema de circulación del cuerpo humano es un sistema fluido; de ahí que se dé el diseño de corazones artificiales, máquinas de diálisis, ayudas respiratorias y otros aparatos de este tipo estén basados en los principios de la mecánica de fluidos. Esto ha dado origen a la aerodinámica y la hidráulica dos ramas importantes de la mecánica de fluidos.

4.1.1.- INTRODUCCIÓN.

Mecánica de fluidos, es la parte de la física que se ocupa de la acción de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos de ingeniería que utilizan fluidos.

La mecánica de fluidos puede subdividirse en dos campos principales: la estática de fluidos, o hidrostática, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la dinámica de fluidos, que trata de los fluidos en movimiento. El término de hidrodinámica se aplica al flujo de líquidos o al flujo de los gases baja velocidad, en el que puede considerarse que el gas es esencialmente incompresible. La aerodinámica, o dinámica de gases, se ocupa del

comportamiento de los gases cuando los cambios de velocidad y presión son lo suficientemente grandes para que sea necesario incluir los efectos de la compresibilidad.

4.1.2. PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.

4.1.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

La mecánica de fluidos podría aparecer solamente como un nombre nuevo para una ciencia antigua en origen y realizaciones, pero es más que eso, corresponde a un enfoque especial para estudiar el comportamiento de los líquidos y los gases.

Los principios básicos del movimiento de los fluidos se desarrollaron lentamente a través de los siglos XVI al XIX como resultado del trabajo de muchos científicos como Da Vinci, Galileo, Torricelli, Pascal, Bernoulli, Euler, Navier, Stokes, Kelvin, Reynolds y otros que hicieron interesantes aportes teóricos a lo que se denomina hidrodinámica. También en el campo de hidráulica experimental hicieron importantes contribuciones Chezy, Ventura, Hagen, Manning, Pouseuille, Darcy, Froude y otros, fundamentalmente durante el siglo XIX.

Hacia finales del siglo XIX la hidrodinámica y la hidráulica experimental presentaban una cierta rivalidad. Por una parte, la hidrodinámica clásica aplicaba con rigurosidad principios matemáticos para modelar el comportamiento de los fluidos, para lo cual debía recurrir a simplificar las propiedades de estos. Así se hablaba de un fluido real. Esto hizo que los resultados no fueran siempre aplicables a casos reales. Por otra parte, la hidráulica experimental acumulaba antecedentes sobre el comportamiento de fluidos reales sin dar importancia a la formulación de una teoría rigurosa.

La Mecánica de Fluidos moderna aparece a principios del siglo XX como un esfuerzo para unir estas dos tendencias: experimental y científica. Generalmente se reconoce como fundador de la mecánica de fluidos moderna al alemán L. Prandtl (1875-1953). Esta es una ciencia relativamente joven a la cual aun hoy se están haciendo importantes contribuciones.

La referencia que da **el autor Vernard J.K** acerca de los antecedentes de la mecánica de fluidos como un estudio científico datan según sus investigaciones de la antigua Grecia en el año 420 a.C. hechos por Tales de Mileto y Anaxímenes; que después continuarían los romanos y se siguiera continuando el estudio hasta el siglo XVII.

4.1.2.2 CONCEPTOS BÁSICOS.

4.1.2.2.1 DEFINICIÓN DE FLUIDO.

Para clasificar a los materiales que se encuentran en la naturaleza se pueden utilizar diversos criterios. Desde el punto de vista de la ingeniería y de la construcción, uno de los más interesantes lo constituye aquel que considera el comportamiento de los elementos frente

a situaciones especiales. De acuerdo a ello se definen los estados básicos de sólido, plástico, fluidos y plasma. De aquí la de definición que nos interesa es la de fluidos, la cual se clasifica en líquidos y gases.

La clasificación de fluidos mencionada depende fundamentalmente del estado y no del material en sí. De esta forma lo que define al fluido es su comportamiento y no su composición.

Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a un esfuerzo de corte o tangencial se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos.

Con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando está sometido a un esfuerzo de corte o tangencial". De esta definición se desprende que un fluido en reposo no soporta ningún esfuerzo de corte.

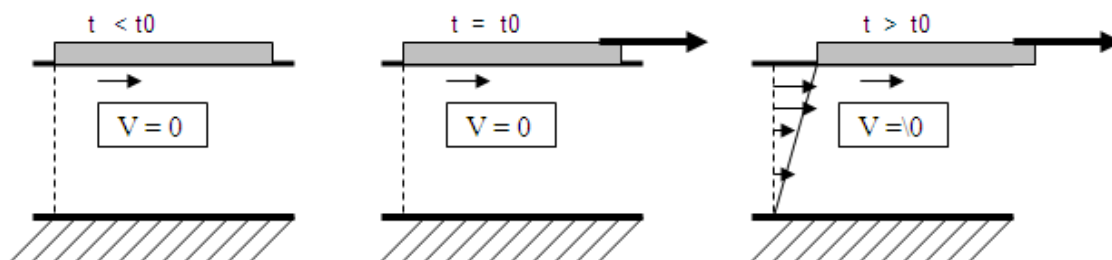


Figura 4.1.1-Comportamiento de un fluido sometido a una fuerza de corte o tangencial.

4.1.2.2.2 SISTEMA DE UNIDADES.

En ingeniería es necesario cuantificar los fenómenos que ocurren y para ello se requiere expresar las cantidades en unidades convencionales. Los sistemas de unidades utilizados están basados en ciertas dimensiones básicas, o primarias, apartar de las cuales es posible definir cualquier otra utilizando para ello leyes físicas, dimensionalmente homogéneas que las relacionan. Las dimensiones básicas más usadas son: longitud, tiempo, masa y temperatura. La forma en que se seleccionan las dimensiones básicas apartar de las se pueden definir las restantes, y las unidades que se les asignan, da origen a diferentes sistemas de unidades. Desde 1971 se ha intentado universalizar el uso del denominado Sistema Internacional de Unidades, SI el cual corresponde a la extensión y el mejoramiento del tradicional sistema MKS.

Magnitud física que se toma como fundamental	Unidad básica o fundamental	Símbolo
Longitud (L)	metro	m
Masa (M)	kilogramo	kg
Tiempo (t)	segundo	s
Intensidad de corriente eléctrica (I)	amperio	A- amp
Temperatura (T)	kelvin	K
Cantidad de sustancia (N)	mol	mol
Intensidad luminosa (I_v)	candela	cd

Figura 4.1.2- Sistema Internacional de Unidades

4.1.2.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.

Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos de otros. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras son típicas de todas las sustancias. Características como la viscosidad, tensión superficial y presión de vapor solo se pueden definir en los líquidos y gases. Sin embargo la masa específica, el peso específico y la densidad son atributos de cualquier materia.

4.1.2.3.1 MASA ESPECÍFICA, PESO ESPECÍFICO Y DENSIDAD.

Se denomina masa específica a la cantidad de materia por unidad de volumen de una sustancia. Se designa por P y se define: $P = \lim_{v \rightarrow 0} (m/v)$

$$v \rightarrow 0$$

[4.1.1]

El peso específico corresponde a la fuerza con que la tierra atrae a una unidad de volumen. Se designa por β . La masa y el peso específico están relacionados por:

$$\beta = g P$$

[4.1.2]

Donde g representa la intensidad del campo gravitacional.

Se denomina densidad a la relación que exista entre la masa específica de una sustancia cualquiera y una sustancia de referencia. Para los líquidos se utiliza la masa específica del agua a 4°C como referencia, que corresponde a 1g/cm³ y para los gases se utiliza al aire con masa específica a 20°C 1,013 bar de presión es 1,204 kg/m³.

4.1.2.3.2 VISCOSIDAD.

La viscosidad es una propiedad distintiva de los fluidos. Está ligada a la resistencia que opone un fluido a deformarse continuamente cuando se le somete a un esfuerzo de corte.

Esta propiedad es utilizada para distinguir el comportamiento entre fluidos y sólidos. Además los fluidos pueden ser en general clasificados de acuerdo a la relación que exista entre el esfuerzo de corte aplicado y la velocidad de deformación.

Supóngase que se tiene un fluido entre dos placas paralelas separada a una distancia pequeña entre ellas, una de las cuales se mueve con respecto de la otra. Esto es lo que ocurre aproximadamente en un descanso lubricado. Para que la placa superior se mantenga en movimiento con respecto a la inferior, con una diferencia de velocidades V , es necesario aplicar una fuerza F , que por unidad se traduce en un esfuerzo de corte, $\eta = F / A$, siendo A el área de la placa en contacto con el fluido. Se puede constatar además que el fluido en contacto con la placa inferior, que está en reposo, se mantiene adherido a ella y por lo tanto no se mueve. Por otra parte, el fluido en contacto con la placa superior se mueve a la misma velocidad que ella. Si el espesor del fluido entre ambas placas es pequeño, se puede suponer que la variación de velocidades en su interior es lineal, de modo que se mantiene la proporción:

$$dv / dy = V/y \quad [4.1.3]$$

4.1.2.3.3 COMPRESIBILIDAD.

La compresibilidad representa la relación entre los cambios de volumen y los cambios de presión a que está sometido un fluido. Las variaciones de volumen pueden relacionarse directamente con variaciones de la masa específica si la cantidad de masa permanece constante. En general se sabe que en los fluidos la masa específica depende tanto de la presión como de la temperatura de acuerdo a la ecuación de estado.

4.1.2.3.4 PRESIÓN DE VAPOR.

Las sustancias puras pueden pasar por las cuatro fases, desde sólido a plasma, según las condiciones de presión y temperatura a que estén sometidas. Se acostumbra designar líquidos a aquellos materias que bajo las condiciones normales de presión y temperatura en que se encuentran en la naturaleza están en esa fase.

Cuando un líquido se le disminuye la presión a la que está sometido hasta llegar a un nivel en el que comienza a bullir, se dice que alcanzado la presión de vapor. Esta presión depende de la temperatura. Así por ejemplo, para el agua a 100°C, la presión es de aproximadamente de 1 bar, que equivale a una atmósfera normal. La presión de vapor y la temperatura de ebullición están relacionadas y definen una línea que separa y el líquido de una misma sustancia en un gráfico de presión y temperatura.

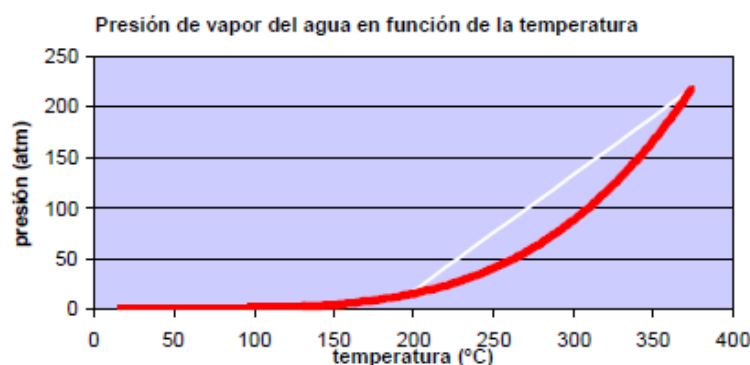


Figura 4.1.3.- Presión de vapor y temperatura de ebullición para el caso del agua.

4.1.2.3.5 TENSION SUPERFICIAL.

Se ha observado que entre la interfase de dos fluidos que no se mezclan se comportan como si fuera una membrana tensa. La tensión superficial es la fuerza que se requiere para mantener en equilibrio una longitud unitaria de esta película. El valor de ella dependerá de los fluidos en contacto y de la temperatura. Los efectos de la superficial solo apreciables en fenómenos de pequeñas dimensiones, como es el caso de tubos capilares, burbujas, gotas y situaciones similares.

Según Bonifacio Fernández L. Las propiedades de los fluidos se dividen en extensivas y mecánicas; de las cuales se derivan otras tomando en cuenta diversos factores.

Propiedad	Designación	Unidades	Valores	
			Agua	Aire
Masa específica	P	kg/m ³	1.000	1,2
Viscosidad	β	g/ms	1,0	0,02
Calor específico	Cp	J/kg°K	4.200	1.008
Presión de vapor (20°)	Pv	bar	0,023	-
Tensión Superficial	δ	mN/m	72,8	-

Figura 4.1.4- Propiedades de los fluidos

4.1.2.3.6 VALORES TÍPICOS DE LAS PROPIEDADES DE FLUIDOS MÁS USUALES.

Según el autor **Bonifacio Larrañaga Fernández** las propiedades de los fluidos son:

- Peso específico.
- Tensión
- Viscosidad Compresibilidad
- Presión

4.1.2.4 PRINCIPIO DE ARQUIMIDES

El principio de **Arquímedes** afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho cuerpo. Esto explica por qué flota un barco muy cargado; el peso del agua desplazada por el barco equivale a la fuerza hacia arriba que mantiene el barco a flote.

El punto sobre el que puede considerarse que actúan todas las fuerzas que producen el efecto de flotación se llama centro de flotación, y corresponde al centro de gravedad del fluido desplazado. El centro de flotación de un cuerpo que flota está situado exactamente encima de su centro de gravedad. Cuanto mayor sea la distancia entre ambos, mayor es la estabilidad del cuerpo.

El principio de Arquímedes permite determinar la densidad de un objeto cuya forma es tan irregular que su volumen no puede medirse directamente. Si el objeto se pesa primero en el aire y luego en el agua, la diferencia de peso será igual al peso del volumen de agua desplazado, y este volumen es igual al volumen del objeto, si éste está totalmente sumergido. Así puede determinarse fácilmente la densidad del objeto (masa dividida por volumen) Si se requiere una precisión muy elevada, también hay que tener en cuenta el peso del aire desplazado para obtener el volumen y la densidad correctos.

Para el autor **John Muller**, Arquímedes fue el más grande investigador de mecánica de fluidos de todos los tiempos; ya que él fue quien descubrió las propiedades de los fluidos sometidos a diversas circunstancias.

CONCLUSIONES.

Para el autor **Fay A. James** un fluido es una sustancia que escurre o se deforma continuamente, cuando está sometido a un esfuerzo de corte tangencial en reposo solo soporta esfuerzos normales.

La mecánica de los fluidos estudia el comportamiento de estos como un medio continuo, sin considerar lo que ocurre a nivel de sus moléculas. Se definen como propiedades intensivas a las que no dependen de la cantidad de materia comprometida, y extensivas a las que dependen.

Para cuantificar el comportamiento de los fluidos se utilizan ciertas magnitudes de referencia para las dimensiones básicas. Para ello se utiliza el Sistema Internacional de Medidas, el cual se basa en el sistema MKS. Las unidades básicas son: el metro, el segundo, el kilogramo y el grado kelvin. La unidad de fuerza es el newton.

Los fluidos tienen dos propiedades mecánicas: masa específica y peso específico. La propiedad más importante para los fluidos es la viscosidad, además tiene otras propiedades como: la compresibilidad, calor específico y tensión superficial.

CONCLUSION PERSONAL.

El primer capítulo abordó los temas de sistema de unidades, propiedades de los fluidos y valores comunes; todos estos temas son la introducción principal para adentrarnos dentro de la mecánica de fluidos como estudio científico y académico, ya que se comienza con definición de que es lo que vamos a investigar, como se dimensiona, que características tiene y además que es lo que nos puede resultar al hacer cualquier experimento.

4.1.3. ESTÁTICA DE FLUIDOS.

4.1.3.1 INTRODUCCIÓN.

Según el investigador **John Miller**: "La estática de los fluidos estudia las condiciones de equilibrio bajo las cuales un fluido está en reposo", sabiendo que para ello se requiere que todos los elementos que lo forman se muevan a la misma velocidad, es decir que no se desplacen los unos a los otros y por lo tanto no haya escurrimiento. El fluido está entonces detenido o se mueve como si fuera un cuerpo rígido sin deformarse. La ausencia de escurrimiento, y por lo tanto de deformación angular, lleva implícita la ausencia de corte.

Bajo estas condiciones, sobre las superficies que están en contacto con el fluido solo se desarrollan esfuerzos normales. Debido a la ausencia de esfuerzos tangenciales la viscosidad no tiene importancia, de modo que los principios de la hidrostática son aplicables a cualquier tipo de fluido viscoso o real, ideal o perfecto.

4.1.3.2 ESTÁTICA DE FLUIDOS O HIDROSTÁTICA.

Una característica fundamental de cualquier fluido en reposo es que la fuerza ejercida sobre cualquier partícula del fluido es la misma en todas direcciones. Si las fuerzas fueran desiguales, la partícula se desplazaría en la dirección de la fuerza resultante. De ello se deduce que la fuerza por unidad de superficie —la presión— que el fluido ejerce contra las paredes del recipiente que lo contiene, sea cual sea su forma, es perpendicular a la pared en cada punto. Si la presión no fuera perpendicular, la fuerza tendría una componente tangencial no equilibrada y el fluido se movería a lo largo de la pared.

Este concepto fue formulado por primera vez en una forma un poco más amplia por el matemático y filósofo francés **Blaise Pascal** en 1647, y se conoce como principio de Pascal. Dicho principio, que tiene aplicaciones muy importantes en hidráulica, afirma que la presión aplicada sobre un fluido contenido en un recipiente se transmite por igual en todas direcciones y a todas las partes del recipiente, siempre que se puedan despreciar las diferencias de presión debidas al peso del fluido y a la profundidad. Cuando la gravedad es la única fuerza que actúa sobre un líquido contenido en un recipiente abierto, la presión en cualquier punto del líquido es directamente proporcional al peso de la columna vertical de dicho líquido situada sobre ese punto. La presión es a su vez proporcional a la profundidad del punto con respecto a la superficie, y es independiente del tamaño o forma del recipiente. Así, la presión en el fondo de una tubería vertical llena de agua de 1 cm. de diámetro y 15 m de altura es la misma que en el fondo de un lago de 15 m de profundidad. De igual forma, si una tubería de 30 m de longitud se llena de agua y se inclina de modo que la parte superior esté sólo a 15 m en vertical por encima del fondo, el agua ejercerá la misma presión sobre el fondo que en los casos anteriores, aunque la distancia a lo largo de la tubería sea mucho mayor que la altura de la tubería vertical. Veamos otro ejemplo: la masa de una columna de agua dulce de 30 cm. de altura y una sección transversal de 6,5 cm.² es de 195 g, y la fuerza ejercida en el fondo será el peso correspondiente a esa masa. Una columna de la misma altura pero con un diámetro 12 veces superior tendrá un volumen 144 veces mayor, y pesará 144 veces más, pero la presión,

que es la fuerza por unidad de superficie, seguirá siendo la misma, puesto que la superficie también será 144 veces mayor. La presión en el fondo de una columna de mercurio de la misma altura será 13,6 veces superior, ya que el mercurio tiene una densidad 13,6 veces superior a la del agua.

El segundo principio importante de la estática de fluidos fue descubierto por el matemático y filósofo griego Arquímedes. El principio de Arquímedes afirma que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza hacia arriba igual al peso del volumen de fluido desplazado por dicho cuerpo. Esto explica por qué flota un barco muy cargado; el peso del agua desplazada por el barco equivale a la fuerza hacia arriba que mantiene el barco a flote.

El punto sobre el que puede considerarse que actúan todas las fuerzas que producen el efecto de flotación se llama centro de flotación, y corresponde al centro de gravedad del fluido desplazado. El centro de flotación de un cuerpo que flota está situado exactamente encima de su centro de gravedad. Cuanto mayor sea la distancia entre ambos, mayor es la estabilidad del cuerpo.

El principio de **Arquímedes** permite determinar la densidad de un objeto cuya forma es tan irregular que su volumen no puede medirse directamente. Si el objeto se pesa primero en el aire y luego en el agua, la diferencia de peso será igual al peso del volumen de agua desplazado, y este volumen es igual al volumen del objeto, si éste está totalmente sumergido. Así puede determinarse fácilmente la densidad del objeto (masa dividida por volumen) Si se requiere una precisión muy elevada, también hay que tener en cuenta el peso del aire desplazado para obtener el volumen y la densidad correctos.

CONCLUSIONES.

El autor John Muller deduce que: la estática de fluidos postula dos principios fundamentales mediante los cuales describe las características de los fluidos sometidos a diversos fenómenos como la presión atmosférica o la sumersión en líquido y los efectos colaterales que se producen al realizarlos.

4.1.4. DINÁMICA DE FLUIDOS.

4.1.4.1 INTRODUCCIÓN.

Para **el autor Gareth Williams** la dinámica de fluidos se centra principalmente a determinar la fricción que ofrece el mismo dependiendo del grado de viscosidad del mismo. Los fluidos ideales cuya viscosidad es nula o despreciable, en su comportamiento no se observa esfuerzos de corte y por lo tanto no existen fuerzas de fricción con las paredes de los sólidos.

En este capítulo se mencionaran las obras de Euler y Torricelli, quienes fueron los que contribuyeron al desarrollo de la dinámica de fluidos moderna.

4.1.4.2 DINÁMICA DE FLUIDOS O HIDRODINÁMICA.

Esta rama de la mecánica de fluidos se ocupa de las leyes de los fluidos en movimiento; estas leyes son enormemente complejas, y aunque la hidrodinámica tiene una importancia práctica mayor que la hidrostática, sólo podemos tratar aquí algunos conceptos básicos.

El interés por la dinámica de fluidos se remonta a las aplicaciones más antiguas de los fluidos en ingeniería. Arquímedes realizó una de las primeras contribuciones con la invención, que se le atribuye tradicionalmente, del tornillo sin fin. La acción impulsora del tornillo de Arquímedes es similar a la de la pieza semejante a un sacacorchos que tienen las picadoras de carne manuales. Los romanos desarrollaron otras máquinas y mecanismos hidráulicos; no sólo empleaban el tornillo de Arquímedes para bombear agua en agricultura y minería, sino que también construyeron extensos sistemas de acueductos, algunos de los cuales todavía funcionan. En el siglo I a.C., el arquitecto e ingeniero romano Vitrubio inventó la rueda hidráulica horizontal, con lo que revolucionó la técnica de moler grano.

A pesar de estas tempranas aplicaciones de la dinámica de fluidos, apenas se comprendía la teoría básica, por lo que su desarrollo se vio frenado. Después de Arquímedes pasaron más de 1.800 años antes de que se produjera el siguiente avance científico significativo, debido al matemático y físico italiano Evangelista Torricelli, que inventó el barómetro en 1643 y formuló el teorema de Torricelli, que relaciona la velocidad de salida de un líquido a través de un orificio de un recipiente, con la altura del líquido situado por encima de dicho agujero. El siguiente gran avance en el desarrollo de la mecánica de fluidos tuvo que esperar a la formulación de las leyes del movimiento por el matemático y físico inglés Isaac Newton. Estas leyes fueron aplicadas por primera vez a los fluidos por el matemático suizo Leonhard Euler, quien dedujo las ecuaciones básicas para un fluido sin rozamiento (no viscoso).

Euler fue el primero en reconocer que las leyes dinámicas para los fluidos sólo pueden expresarse de forma relativamente sencilla si se supone que el fluido es incompresible e ideal, es decir, si se pueden despreciar los efectos del rozamiento y la viscosidad. Sin embargo, como esto nunca es así en el caso de los fluidos reales en movimiento, para **Gareth Williams** los resultados de dicho análisis sólo pueden servir como estimación para flujos en los que los efectos de la viscosidad son pequeños.

4.1.4.2.1 FLUJOS INCOMPRESIBLES Y SIN ROZAMIENTO .

Estos flujos cumplen el llamado teorema de Bernoulli, enunciado por el matemático y científico suizo Daniel Bernoulli. El teorema afirma que la energía mecánica total de un flujo incompresible y no viscoso (sin rozamiento) es constante a lo largo de una línea de corriente. Las líneas de corriente son líneas de flujo imaginarias que siempre son paralelas a la dirección

del flujo en cada punto, y en el caso de flujo uniforme coinciden con la trayectoria de las partículas individuales de fluido. El teorema de Bernoulli implica una relación entre los efectos de la presión, la velocidad y la gravedad, e indica que la velocidad aumenta cuando la presión disminuye. Para el **autor John Muller**: "Este principio es importante para la medida de flujos, y también puede emplearse para predecir la fuerza de sustentación de un ala en vuelo.

CONCLUSIONES.

En el caso de la dinámica de fluidos, **el autor R.L Street**, menciona que: "las únicas fuerzas de superficie son las provocadas por la presión, que sumadas a las demás fuerzas, o de gravedad, son las responsables del movimiento del fluido". Bajo estas condiciones Newton representó su segunda ley, aplicada a un elemento fluido, o ecuación de cantidad de movimiento, la que se conoce como ecuación de Euler.

CONCLUSION PERSONAL.

La dinámica o hidrodinámica de fluidos ya comprenden cálculos matemáticos mediante fórmulas complejas, las cuales corresponderán a movimientos de flujos sin comprimir. De aquí se deriva una ramificación de la dinámica y así mismo de la mecánica de fluidos: el flujo incompresible y sin rozamiento, el cual es experimentado por la segunda ley de Newton; pero además ya participan mayor número de investigadores acerca del tema (Bernoulli, Evangelista, Torricelli, Pascal, etc).

Al final se deduce que la gravedad junto con otras fuerzas influye para que haya movimiento de un flujo.

4.1.5. ANÁLISIS PUNTUAL DEL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LOS FLUIDOS.

4.1.5.1 INTRODUCCIÓN.

En opinión del autor Fernández Larrañaga: "El análisis puntual está orientado a establecer un modelo matemático del comportamiento del fluido, lo que permita conocer al detalle lo que ocurre en cada punto, para ello se establecen ecuaciones básicas. Con base en ello se podrá conocer la distribución espacial y temporal de las variables que definen el comportamiento del fluido, como son la presión, velocidad, masa específica entre otras".

El análisis requiere mayor esfuerzo pero entrega más información sobre el comportamiento del fluido.

4.1.5.2 EL TEOREMA DE BERNOULLI.

Una de las leyes fundamentales que rigen el movimiento de los fluidos es el teorema de Bernoulli, que relaciona un aumento en la velocidad de flujo con una disminución de la

presión y viceversa. El teorema de Bernoulli explica, por ejemplo, la fuerza de sustentación que actúa sobre el ala de un avión en vuelo. Un ala —o plano aerodinámico— está diseñada de forma que el aire fluya más rápidamente sobre la superficie superior que sobre la inferior, lo que provoca una disminución de presión en la superficie de arriba con respecto a la de abajo. Esta diferencia de presiones proporciona la fuerza de sustentación que mantiene el avión en vuelo. Los coches de carrera son muy bajos con el fin de que el aire se desplace a gran velocidad por el estrecho espacio entre la carrocería y el suelo. Esto reduce la presión debajo del vehículo y lo aprieta con fuerza hacia abajo, lo que mejora el agarre. Estos coches también llevan en su parte trasera un plano aerodinámico con forma de ala invertida para aumentar la fuerza contra el suelo. La vela de un balandro en movimiento también constituye un plano aerodinámico. Otro aspecto importante de la aerodinámica es la resistencia al avance que experimentan los objetos sólidos que se mueven a través del aire. Por ejemplo, las fuerzas de resistencia que ejerce el aire que fluye sobre un avión deben ser superadas por el empuje del reactor o de las hélices. La resistencia al avance puede reducirse significativamente empleando formas aerodinámicas. Según el autor James A. Fay: "Cuando el objeto no es totalmente aerodinámico, la resistencia aumenta de forma aproximadamente proporcional al cuadrado de su velocidad con respecto al aire". Por ejemplo, la potencia necesaria para propulsar un coche que avanza de forma uniforme a velocidades medias o altas se emplea fundamentalmente en superar la resistencia del aire.

4.1.5.3 FLUJOS VISCOSOS: MOVIMIENTO LAMINAR Y TURBULENTO.

Los primeros experimentos cuidadosamente documentados del rozamiento en flujos de baja velocidad a través de tuberías fueron realizados independientemente en 1839 por el fisiólogo francés Jean Louis Marie Poiseuille, que estaba interesado por las características del flujo de la sangre, y en 1840 por el ingeniero hidráulico alemán Gotthilf Heinrich Ludwig Hagen. El primer intento de incluir los efectos de la viscosidad en las ecuaciones matemáticas se debió al ingeniero francés Claude Louis Marie Navier en 1827 e, independientemente, al matemático británico George Gabriel Stokes, quien en 1845 perfeccionó las ecuaciones básicas para los fluidos viscosos incompresibles. Actualmente se las conoce como ecuaciones de Navier-Stokes, y son tan complejas que sólo se pueden aplicar a flujos sencillos. Uno de ellos es el de un fluido real que circula a través de una tubería recta. El teorema de Bernoulli no se puede aplicar aquí, porque parte de la energía mecánica total se disipa como consecuencia del rozamiento viscoso, lo que provoca una caída de presión a lo largo de la tubería. Las ecuaciones sugieren que, dados una tubería y un fluido determinados, esta caída de presión debería ser proporcional a la velocidad de flujo. Los experimentos realizados por primera vez a mediados del siglo XIX demostraron que esto sólo era cierto para velocidades bajas; para velocidades mayores, la caída de presión era más bien proporcional al cuadrado de la velocidad. Este problema no se resolvió hasta 1883, cuando el ingeniero británico Osborne Reynolds demostró la existencia de dos tipos de flujo viscoso en tuberías. A velocidades bajas, las partículas del fluido siguen las líneas de corriente (flujo laminar), y los resultados experimentales coinciden con las predicciones analíticas. A velocidades más elevadas, surgen fluctuaciones en la velocidad del flujo, o remolinos (flujo turbulento), en una forma que ni siquiera en la actualidad se puede predecir completamente. Reynolds también determinó que la transición del flujo laminar al turbulento era función de un único parámetro, que desde entonces se conoce como número de Reynolds. Si el número de Reynolds —que carece de dimensiones y es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido— es menor de 2.100, el flujo a través de la tubería es

siempre laminar; cuando los valores son más elevados suele ser turbulento. El concepto de número de Reynolds es esencial para gran parte de la moderna mecánica de fluidos.

Según James A. Fay: "Los flujos turbulentos no se pueden evaluar exclusivamente a partir de las predicciones calculadas, y su análisis depende de una combinación de datos experimentales y modelos matemáticos"; gran parte de la investigación moderna en mecánica de fluidos está dedicada a una mejor formulación de la turbulencia. Puede observarse la transición del flujo laminar al turbulento y la complejidad del flujo turbulento cuando el humo de un cigarrillo asciende en aire muy tranquilo. Al principio, sube con un movimiento laminar a lo largo de líneas de corriente, pero al cabo de cierta distancia se hace inestable y se forma un sistema de remolinos entrelazados.

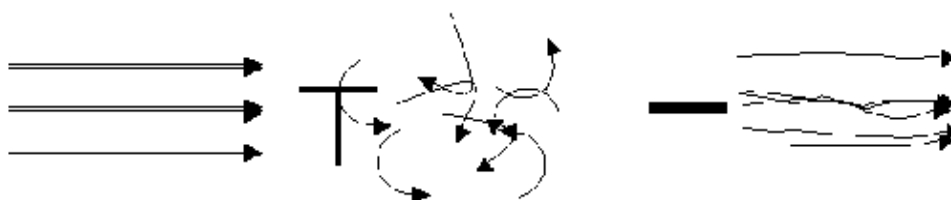


Figura 4.1.5.-Flujo principal Remolinos Flujo turbulento.

4.1.5.3.1 FLUJOS DE LA CAPA LÍMITE.

Antes de 1860, aproximadamente, el interés de la ingeniería por la mecánica de fluidos se limitaba casi exclusivamente al flujo del agua. El desarrollo de la industria química durante la última parte del siglo XIX dirigió la atención a otros líquidos y a los gases. El interés por la aerodinámica comenzó con los estudios del ingeniero aeronáutico alemán Otto Lilienthal en la última década del siglo XIX, y produjo avances importantes tras el primer vuelo con motor logrado por los inventores estadounidenses Orville y Wilbur Wright en 1903.

La complejidad de los flujos viscosos, y en particular de los flujos turbulentos, restringió en gran medida los avances en la dinámica de fluidos hasta que el ingeniero alemán Ludwig Prandtl observó en 1904 que muchos flujos pueden separarse en dos regiones principales. La región próxima a la superficie está formada por una delgada capa límite donde se concentran los efectos viscosos y en la que puede simplificarse mucho el modelo matemático. Fuera de esta capa límite, se pueden despreciar los efectos de la viscosidad, y pueden emplearse las ecuaciones matemáticas más sencillas para flujos no viscosos. Para el **autor J.K Vernard**: "La teoría de la capa límite ha hecho posible gran parte del desarrollo de las alas de los aviones modernos y del diseño de turbinas de gas y compresores". El modelo de la capa límite no sólo permitió una formulación mucho más simplificada de las ecuaciones de Navier-Stokes en la región próxima a la superficie del cuerpo, sino que llevó a nuevos avances en la teoría del flujo de fluidos no viscosos, que pueden aplicarse fuera de la capa límite. Gran parte del desarrollo moderno de la mecánica de fluidos, posibilitado por el concepto de capa límite, se ha debido a investigadores como el ingeniero aeronáutico estadounidense de origen húngaro Theodore von Kármán, el matemático alemán Richard von Mises y el físico y meteorólogo británico Geoffrey Ingram Taylor.

4.1.5.3.2 FLUJOS COMPRESIBLES.

El interés por los flujos compresibles comenzó con el desarrollo de las turbinas de vapor por el inventor británico Charles Algernon Parsons y el ingeniero sueco Carl Gustaf Patrik de Laval durante la década de 1880. En esos mecanismos se descubrió por primera vez el flujo rápido de vapor a través de tubos, y la necesidad de un diseño eficiente de turbinas llevó a una mejora del análisis de los flujos compresibles. Pero los avances modernos tuvieron que esperar al estímulo que supuso el desarrollo de la turbina de combustión y la propulsión a chorro en la década de 1930. El interés por los flujos de alta velocidad sobre superficies surgió de forma temprana en los estudios de balística, donde se necesitaba comprender el movimiento de los proyectiles. Los avances más importantes comenzaron hacia el final del siglo XIX, con Prandtl y sus discípulos, entre otros, y crecieron con la introducción de los aviones de alta velocidad y los cohetes en la II Guerra Mundial.

El autor Gareth Williams lo fundamental de flujos compresibles lo deduce: Uno de los principios básicos del flujo compresible es que la densidad de un gas cambia cuando el gas se ve sometido a grandes cambios de velocidad y presión. Al mismo tiempo, su temperatura también cambia, lo que lleva a problemas de análisis más complejos. El comportamiento de flujo de un gas compresible depende de si la velocidad de flujo es mayor o menor que la velocidad del sonido. El sonido es la propagación de una pequeña perturbación, u onda de presión, dentro de un fluido. Para un gas, la velocidad del sonido es proporcional a la raíz cuadrada de su temperatura absoluta. La velocidad del sonido en el aire a 20 °C (293 kelvin en la escala absoluta), es de unos 344 metros por segundo. Si la velocidad de flujo es menor que la velocidad del sonido (flujo subsónico), las ondas de presión pueden transmitirse a través de todo el fluido y así adaptar el flujo que se dirige hacia un objeto. Por tanto, el flujo subsónico que se dirige hacia el ala de un avión se ajustará con cierta distancia de antelación para fluir suavemente sobre la superficie. En el flujo supersónico, las ondas de presión no pueden viajar corriente arriba para adaptar el flujo. Por ello, el aire que se dirige hacia el ala de un avión en vuelo supersónico no está preparado para la perturbación que va a causar el ala y tiene que cambiar de dirección repentinamente en la proximidad del ala, lo que conlleva una compresión intensa u onda de choque. El ruido asociado con el paso de esta onda de choque sobre los observadores situados en tierra constituye el estampido sónico de los aviones supersónicos. Frecuentemente se identifican los flujos supersónicos por su número de Mach, que es el cociente entre la velocidad de flujo y la velocidad del sonido. Por tanto, los flujos supersónicos tienen un número de Mach superior a 1.

CONCLUSIONES.

La aplicación de las ecuaciones de Euler en régimen permanente se simplifica si se integran. Con el objeto de establecer claramente las condiciones bajo las cuales esta ecuación es aplicable, se procedió a su deducción por dos caminos: el uso de coordenadas naturales y cartesianas.

El teorema de Bernoulli explica la relación existente entre el aumento de velocidad en un flujo con una disminución de la presión y viceversa, locuaz proporciona una diferencia de presiones.

El flujo turbulento es un escurrimiento desordenado que se produce al aumentar el número de Reynolds.

Del flujo compresible se deduce que la densidad de un gas cambia cuando el gas está sometido a grandes cambios de velocidad y presión.

CONCLUSION PERSONAL.

Para poder llevar a cabo cálculos acerca de la mecánica de fluidos es necesario analizar la situación de la cual se quieren realizar dichos cálculos. El análisis consta de leyes, procedimientos y conceptos que se tienen que conocer para realizar una estimación acertada de los cálculos a realizar. En este capítulo se mencionaron de cuatro términos fundamentales para llevar a cabo dicho análisis:

El teorema de Bernoulli.

Es la ley fundamental que rige el movimiento de los fluidos, relacionada con la velocidad y la presión del mismo.

Flujos Viscosos.

Por medio de experimentación se deduce las dos características del flujo viscoso: el movimiento laminar, que depende de las corrientes de flujo y el movimiento turbulento que se da por la velocidad del flujo.

Flujos de capa límite

Propiedad de los fluidos descubierta por el alemán Ludwig Prandtl que menciona que los flujos pueden separarse en dos regiones principales.

Flujos compresibles

Principio relacionado a los gases y sus propiedades como densidad, velocidad y presión.

4.1.6. APLICACIONES Y RAMAS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.

4.1.6.1 INTRODUCCIÓN.

La mecánica de fluidos se ha dividido en diferentes ramas que cubren diferentes aspectos de la ingeniería, la física, las matemáticas, etc. Están destinadas a solucionar problemas de la vida cotidiana así como para desarrollar nueva tecnología y descubrir nuevos campos de la ciencia.

Para Vernard J.K. las aplicaciones de la mecánica de fluidos se pueden en un número infinito, ya que todo depende de los fluidos, directa e indirectamente. Un ejemplo palpable para demostrar tal afirmación es el suponer que la tierra está conformada de un 75% de agua.

4.1.6.2 AERODINÁMICA.

Rama de la mecánica de fluidos que se ocupa del movimiento del aire y otros fluidos gaseosos, y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos que se mueven en dichos fluidos. Algunos ejemplos del ámbito de la aerodinámica son el movimiento de un avión a través del aire, las fuerzas que el viento ejerce sobre una estructura o el funcionamiento de un molino de viento.

Todos los temas que se mencionaron anteriormente y que se relacionan con la aerodinámica, son las ramas que se derivan de la misma y que se deben de revisar para lograr un estudio amplio y completo de los fenómenos aerodinámicos ; y por lo tanto ,lograr englobar todos estos conceptos y sus aplicaciones ,enfocados hacia la mecánica de fluidos.

El investigador Fernández Larrañaga dice: "La aerodinámica es la principal aplicación de la mecánica de fluidos inducidos hacia el campo de los flujos con rozamiento, con gases específicamente".

4.1.6.3 SUPERSÓNICA.

La supersónica, una rama importante de la aerodinámica, se ocupa de los fenómenos que tienen lugar cuando la velocidad de un sólido supera la velocidad del sonido en el medio —generalmente aire— en que se desplaza.

La velocidad del sonido en la atmósfera varía según la humedad, la temperatura y la presión. Como la velocidad del sonido es un factor crucial en las ecuaciones aerodinámicas y no es constante, suele emplearse el número de Mach, así llamado en honor del físico y filósofo austriaco Ernst Mach, un pionero en el estudio de la balística. El número de Mach es la velocidad respecto a la atmósfera del proyectil o el avión dividida entre la velocidad del sonido en el mismo medio y con las mismas condiciones. Así, al nivel del mar, en condiciones normales de humedad y temperatura, una velocidad de 1.220 km/h representa un número de Mach de 1. En la estratosfera, debido a las diferencias de densidad, presión y temperatura, esta misma velocidad correspondería a un número de Mach de 1,16. Expresando las velocidades por su número de Mach, en vez de en kilómetros por hora, puede obtenerse una representación más exacta de las condiciones que se dan realmente durante el vuelo.

4.1.6.4 ONDAS DE CHOQUE.

Los estudios mediante observaciones ópticas de proyectiles de artillería revelan la naturaleza de las perturbaciones atmosféricas encontradas durante el vuelo. A velocidades subsónicas, por debajo de Mach 0,85, la única perturbación atmosférica es una turbulencia en la estela del proyectil. En la zona transónica, entre Mach 0,85 y Mach 1,3, aparecen ondas de

choque a medida que aumenta la velocidad; en el rango más bajo de esa zona de velocidades, las ondas de choque surgen de cualquier protuberancia abrupta en el contorno suave del proyectil. Cuando la velocidad supera Mach 1, las ondas de choque surgen de la parte delantera y la cola y se propagan en forma de cono desde el proyectil. El ángulo del cono es tanto menor cuanto mayor es la velocidad del proyectil. Así, a Mach 1, la onda es esencialmente un plano; a Mach 1,4 (1.712 Km. /h al nivel del mar), el ángulo del cono es de aproximadamente 90°; a Mach 2,48 (unos 3.030 Km. /h), la onda de choque procedente del proyectil tiene un ángulo cónico ligeramente menor de 50°. La investigación en este campo ha permitido el diseño de los modernos aviones de gran velocidad, en los que las alas se inclinan hacia atrás formando ángulos de hasta 60° para evitar la onda de choque procedente de la parte delantera del avión.

Las ondas de choque son el principal campo de estudio del el **autor Jerry D. Wilson** dentro de la mecánica de fluidos, ya que según el autor es donde tiene mayor implicación con la tecnología aeronáutica moderna y toda la tecnología que conlleva el estudio de su realización.

4.1.6.5 MAXIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA.

Entre otros factores estudiados por la investigación sobre proyectiles de artillería supersónicos figuran la forma ideal de los proyectiles y el comportamiento de un gas que fluye a altas velocidades. La llamada forma de gota, que es la forma aerodinámica ideal para velocidades subsónicas, es muy poco eficaz en la zona supersónica debido a su gran superficie frontal, que comprime el aire y da lugar a ondas de choque de gran amplitud que absorben mucha energía.

Cuando un gas fluye por un tubo estrechado, como la tobera de un cohete, a velocidades subsónicas, la velocidad de flujo aumenta y la presión disminuye en el cuello del estrechamiento. A velocidades supersónicas se produce el fenómeno inverso, y la velocidad de flujo aumenta en un tubo divergente. Así, los gases de escape de un cohete, al acelerarse en la tobera hasta la velocidad del sonido, aumentan aún más su velocidad, y por tanto su empuje, en el ensanchamiento divergente de la tobera, con lo que se multiplica la eficiencia del cohete. Otro factor que los diseñadores de cohetes conocen desde hace tiempo es la influencia directa de la presión atmosférica reinante sobre la eficiencia del vuelo a velocidades supersónicas. Cuanto más próximo esté el medio circundante a un vacío perfecto, más eficiente es el motor del avión o el cohete. El rango de velocidades de un avión supersónico también puede aumentarse reduciendo la superficie, o sección transversal, que presenta al aire. En los aviones que operan a velocidades supersónicas es imprescindible aumentar el peso del aparato aumentando su longitud, hacerlo más esbelto y dotarlo de un frente en forma de aguja. En los años posteriores a la II Guerra Mundial, los centros de investigación en aerodinámica construyeron túneles de viento donde se podían probar maquetas o piezas de aviones en corrientes de aire supersónicas.

4.1.6.6 REGLA DE LAS SUPERFÍCIES.

Un importante avance en la aeronáutica, gracias a las investigaciones en túneles de viento, se debió al físico estadounidense **Richard Travis Whitcomb**, que descubrió la regla



de las superficies para el diseño de aviones supersónicos. Según este principio, el aumento abrupto en la resistencia al avance que se produce a velocidades transónicas se debe a la distribución de la superficie total de la sección transversal en cada punto del avión. Estrechando el fuselaje en la zona donde está unido a las alas, la reducción en la sección transversal total del fuselaje y las alas disminuye la resistencia al avance del aparato. El diseño de Whitcomb, llamado de talle de avispa, hizo posible un aumento del 25% en el rango de velocidades supersónicas sin necesidad de una mayor potencia en los motores.

En el pasado se utilizaba el término supersónica en un sentido más amplio, e incluía la rama de la física ahora conocida como ultrasónica, que se ocupa de las ondas de sonido de alta frecuencia, generalmente por encima de los 20.000 hercios (Hz).

4.2

COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MATERIALES.

4.2.1. INTRODUCCIÓN.

Los diseñadores de máquinas, vehículos y estructuras deben conseguir niveles aceptables de prestaciones y economía, y al mismo tiempo garantizar la seguridad y durabilidad del producto. Para asegurar prestaciones, seguridad y durabilidad, es necesario evitar deformaciones excesivas en los componentes. Además, debe evitarse por completo el agrietamiento de componentes, o limitarse estrictamente de forma que no progrese hasta la fractura completa.

El estudio de la deformación y el agrietamiento en materiales se denomina comportamiento mecánico de materiales. Los conocimientos en esta área son la base que permite evitar estos tipos de fallos en las aplicaciones ingenieriles. Un aspecto concreto es el ensayo físico de muestras de material mediante la aplicación de fuerzas y deformaciones. Una vez se conoce cuantitativamente el comportamiento del material, a partir de los ensayos, se podrá evaluar su aplicación a un diseño concreto.

En las últimas décadas se ha experimentado un desarrollo tecnológico espectacular. La introducción de nuevos materiales, el aumento de velocidades de funcionamiento, las temperaturas de operaciones más altas, la tendencia a reducción de peso o volumen, la necesidad de aumentar la vida del producto, la reducción de coste obligada por la competencia, etc., han impulsado el desarrollo y aplicación de mejores técnicas de diseño. Estas condiciones han impulsado el estudio más preciso del comportamiento de los materiales, de forma que se pueda modelar con mayor precisión los múltiples modos de fallo mecánico. La necesidad de compatibilizar mayor capacidad, menor tamaño y coste pueden conseguirse bien desarrollando nuevos materiales más fuertes y rígidos o bien utilizando eficientemente la resistencia y rigidez de los actualmente disponibles. La primera alternativa concierne a los científicos y especialistas en materiales. La segunda es responsabilidad del diseñador, que deberá utilizar procedimientos refinados de análisis para evitar en lo posible la incertidumbre asociada a procedimientos simplificados.

Como criterios de diseño importantes hay que considerar, dejando aparte los tradicionales asociados al peso o volumen, criterios muy importantes como son la fiabilidad, inspeccionabilidad, mantenibilidad o disponibilidad. En cierto sentido, el diseño perfecto sería aquel en el que la máquina completa (todos sus componentes) fallara a una vida

predefinida. Si fuera posible producir este diseño perfecto, requeriría un análisis altamente refinado, un desarrollo experimental extenso, un conocimiento preciso de propiedades de los materiales, una definición muy fiable de las condiciones de funcionamiento, y un equipo de diseñadores meticulosamente coordinado. Este planteamiento es evidentemente muy costoso, tanto en tiempo como en dinero, y en general no es competitivo. De esta forma, en general, se buscará el mejorar prestaciones, extender la vida, reducir el peso y el volumen, etc., manteniendo la competitividad del producto.

4.2.2. TIPOS DE FALLOS.

Un elemento, componente, sistema o máquina falla cuando se vuelve incapaz de realizar satisfactoriamente la función para la cual se ha diseñado.

Los tipos de fallo mecánico de material pueden clasificarse, de forma simplificada en los siguientes apartados:

- fallo por deformación: es el cambio en la forma o el tamaño de un componente.
- fallo por fractura: el componente se separa en dos o más partes.
- fallo por corrosión: es la pérdida de material debido a la acción química.
- fallo por desgaste: es la pérdida de material superficial debida a la abrasión o rayado entre superficies en contacto. Si el desgaste está causado por un fluido (gas o líquido) se denomina erosión, que es esencialmente similar si el fluido contiene partículas duras.

Aunque la corrosión y el desgaste son también de gran importancia, consideraremos fundamentalmente los fallos por deformación y fractura por ser los que deben considerarse más frecuentes en diseño de máquinas.

4.2.2.1 FALLOS POR DEFORMACIÓN.

Los fallos por deformación se pueden clasificar en función de su dependencia con el tiempo en:

Independiente del tiempo

- * Elástica
- * Plástica

Dependiente del tiempo

- * Creep

4.2.2.1.1 DEFORMACIONES INDEPENDIENTES DEL TIEMPO.

La deformación que aparece inmediatamente con la carga se puede clasificar en elástica y plástica. La deformación elástica se recupera inmediatamente al eliminar la carga. Cuando sólo está presente este tipo de deformación, las tensiones y deformaciones son

usualmente proporcionales, aunque esto no es siempre cierto.

Como ejemplo de este tipo de fallo puede considerarse la deformación elástica excesiva de ejes y árboles. Debido a esta deflexión puede impedirse el correcto funcionamiento de engranajes montados sobre el eje y alterar el funcionamiento de cojinetes y rodamientos.

La deformación plástica no se recupera con la descarga y por lo tanto es permanente. Una vez que empieza la deformación plástica, un pequeño incremento de tensión provoca usualmente una deformación adicional relativamente grande. Este proceso se denomina fluencia, y el valor de la tensión en el que comienza a ser importante este comportamiento se denomina límite de fluencia, S_y .

Los materiales que son capaces de soportar deformación plástica se comportan de manera dúctil, y aquellos en los que la fractura se alcanza sin deformación plástica significativa se comportan de manera frágil. Muchos metales, como los aceros de baja resistencia, cobre, y plomo, y algunos plásticos, como el polietileno, tienen comportamiento dúctil. Los vidrios, plásticos acrílicos, y algunos metales, como los aceros de alta resistencia, tienen comportamiento frágil.

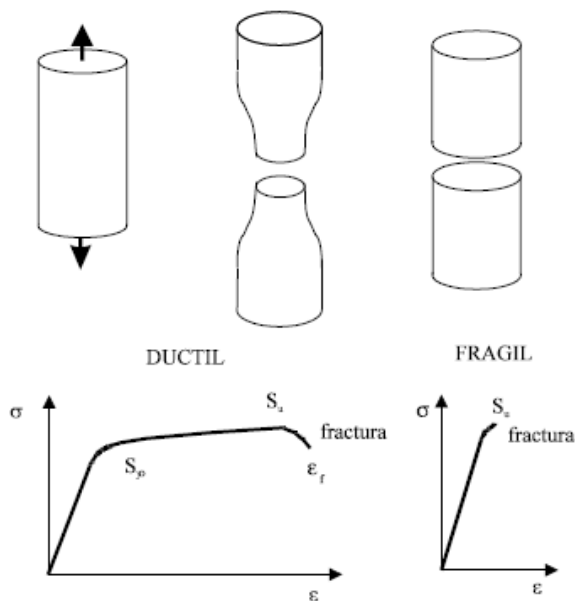


Figura 4.2.1.- Ensayo de tracción: comportamiento dúctil y frágil.

El ensayo de tracción se utiliza frecuentemente para conocer la resistencia y ductilidad de los materiales. En este ensayo se tracciona lentamente una probeta hasta la rotura. Se obtiene el límite de fluencia, el límite de rotura, S_u , que es la máxima tensión alcanzada antes de la rotura y la deformación de fractura, ϵ_f , que es una medida de la ductilidad y se expresa habitualmente como porcentaje de deformación.

No es necesaria una gran cantidad de deformación plástica para que exista el fallo. Por ejemplo, en un eje, una ligera deformación plástica de flexión puede provocar el desequilibrio suficiente como para que las vibraciones originadas provoquen el mal funcionamiento del componente, el fallo prematuro de los cojinetes de soporte del eje, etc. En un resorte, la deformación plástica puede impedir que el componente no pueda realizar la función para la que ha sido diseñado.

El pandeo (inestabilidad elástica) debido a tensiones de compresión puede originar grandes deformaciones en columnas o placas, llegando incluso al colapso, y el comportamiento puede estar dominado por deformación elástica y/o plástica.

4.2.2.1.2 DEFORMACION DEPENDIENTE DEL TIEMPO (CREEP).

Creep es la deformación que se acumula con el tiempo (sin que varíen las fuerzas aplicadas). Dependiendo de la magnitud de las tensiones aplicadas y el tiempo de aplicación, la deformación puede ser lo suficientemente importante como para que un componente no pueda realizar la función para la que se diseñó. Los plásticos y metales con temperatura de fusión baja pueden tener deformación por creep incluso a temperatura ambiente. El creep es normalmente un problema importante cuando la temperatura es elevada (en relación con la temperatura de fusión del material). También puede aparecer el pandeo debido a la deformación creep, de forma dependiente del tiempo. Bajo tensiones constantes, la deformación varía con el tiempo como se muestra en la figura. Existe una deformación elástica inicial, y posteriormente esta deformación se incrementa lentamente con el tiempo a medida que se mantiene la tensión. Si se eliminan las tensiones, la deformación elástica ϵ_e se recupera rápidamente, y solo puede recuperarse una parte de la deformación creep con el tiempo; el resto permanece como deformación permanente.

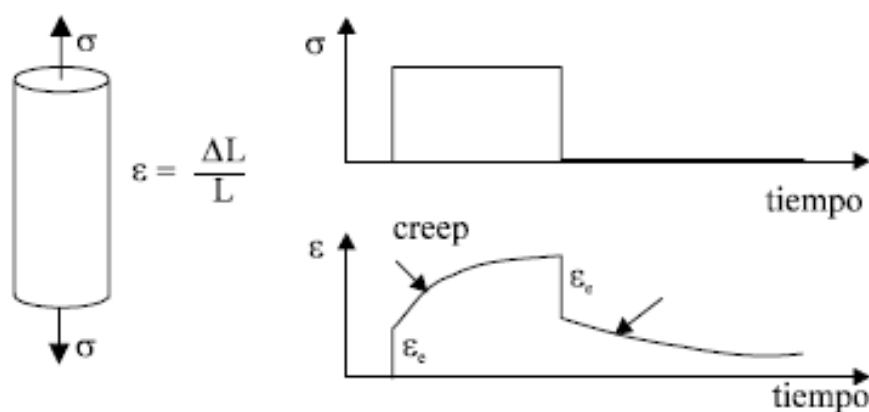


Figura 4.2.2.- Deformación creep

El comportamiento creep en materiales cristalinos es fuertemente dependiente de la temperatura, siendo habitualmente importante su consideración en ingeniería alrededor de 0.3 a 0.6 T_m , siendo T_m la temperatura absoluta de fusión.

El creep es la mayor limitación de la aplicación ingenieril de los polímeros por encima de T_g (temperatura de transición vítrea), que generalmente está en el rango de -100 a 200° para los polímeros comunes.

4.2.2.2 FRACTURA.

El fallo del material por fractura se puede clasificar del siguiente modo:

Carga estática

- * Frágil
- * Dúctil
- * Influencias ambientales
- * Rotura Creep

Carga cíclica : Fatiga

- * Alto ciclo
- * Bajo ciclo
- * Crecimiento de grieta de fatiga
- * Fatiga corrosión

La fractura se caracteriza generalmente por ser dúctil o frágil.

El comportamiento frágil o dúctil de un material generalmente puede depender del estado tensional o las condiciones ambientales. Por ejemplo, un material que normalmente se comporta de manera dúctil puede fallar de forma frágil bajo ciertas circunstancias.

4.2.2.2.1 FRACTURA FRÁGIL.

La fractura frágil se caracteriza por la rápida propagación de una grieta, con pequeña deformación plástica previa. La velocidad a la que se propagan las grietas en comportamiento frágil, después de su iniciación, sube rápidamente de cero a una velocidad límite aproximadamente igual a un tercio de la velocidad del sonido en el material. En materiales policristalinos, la fractura progresa en planos de separación dentro de cada cristal (fractura transcristalina), dando lugar a una superficie granular debida a la diferente orientación de estos planos. La fractura frágil también puede progresar por los contornos de grano, denominándose en este caso intergranular.

Como ya se ha comentado, el comportamiento frágil o dúctil de un material generalmente puede depender del estado tensional o las condiciones ambientales.

La rotura frágil, por lo tanto, puede estar favorecida por diversos factores, entre los que se encuentra:

- **Baja temperatura.** Las temperaturas bajas incrementan la resistencia del material al deslizamiento (deformación plástica) pero no a la rotura.

- **Cargas rápidamente aplicadas o de impacto.** La deformación por deslizamiento es en cierto modo similar a la acción viscosa en un amortiguador. Para conseguir una deformación plástica rápida por deslizamiento es necesario aumentar las tensiones tangenciales, y estas tensiones pueden estar acompañadas de tensiones normales que excedan el límite de rotura del material.
- **Estados tensionales donde las tensiones normales sean grandes comparadas con las tangenciales.** El caso extremo es el correspondiente a tensiones hidrostáticas ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$). Presumiblemente, cualquier material sólido no se deformará plásticamente bajo tensiones hidrostáticas, ya que el fallo dúctil estará muy limitado al no existir tensiones tangenciales.
- **Secciones gruesas.** Los ensayos realizados sobre probetas pequeñas dan ductilidad mayor que los correspondientes a secciones gruesas. Una posible explicación está asociada a la mayor probabilidad de existencia de pequeñas grietas inherentes al material en secciones más grandes.
- **Entallas o concentradores de tensiones.** En concentradores de tensiones se pueden generar estados multiaxiales de tensiones, en los que se incrementen notablemente las tensiones normales, mientras se mantienen las tangenciales.
- **Soldadura.** El material de la región soldada puede ser inherentemente menos dúctil que el material base. Pueden originarse pequeñas grietas, que promuevan estados de tensiones multiaxiales. Pueden aparecer tensiones residuales debido a la soldadura, produciendo tensiones de tracción en ausencia de cargas externas.
- **Radiación nuclear sobre los aceros.**
- **Radiación ultravioleta.** El contenido ultravioleta de la luz solar hace que ciertos plásticos se vuelvan frágiles.

4.2.2.2.2 FRACTURA DÚCTIL.

La fractura dúctil se produce después de una deformación plástica significativa. La fractura dúctil se produce por la propagación lenta de una grieta formada por la coalescencia de cavidades. La superficie de la fractura tiene un aspecto fibroso y mate. Usualmente se observan tres fases en la rotura dúctil de materiales policristalinos:

- 1.- En la probeta se produce un estrechamiento local, y se forman pequeñas cavidades en la región del estrechamiento.
- 2.- Las cavidades se unen para formar una grieta en el centro de la sección

transversal que crece en la dirección perpendicular a las tensiones normales aplicadas.

3.- La grieta alcanza la superficie de la probeta según planos de tensiones tangenciales, orientados aproximadamente a 45° con respecto a la dirección de máxima tensión de tracción. El resultado de esta secuencia es la forma de cono y copa de la superficie de fallo.

4.2.2.2.3 OTRAS CONSIDERACIONES.

La fractura puede producirse como resultado de **combinaciones de tensiones y efectos químicos** (agrietamiento inducido ambientalmente). Los aceros de baja resistencia son susceptibles de agrietarse en ambientes cáusticos (pH básico o alto). Los aceros de alta resistencia pueden agrietarse en presencia de hidrógeno o gas sulfuro de hidrógeno. El término agrietamiento por tensión-corrosión se utiliza para describir este comportamiento, que es apropiado cuando se elimina material por la acción corrosiva, pero que no es correcto en todos los casos.

La deformación por creep puede llegar a la rotura, similar a la rotura dúctil excepto que el proceso es dependiente del tiempo.

Una causa común de fractura es la **fatiga**, que es el fallo debido a la carga repetitiva. En general, se inician en el material una o más pequeñas grietas que crecen hasta que se produce la fractura total. La prevención de la fractura por fatiga es vital en el diseño de máquinas, vehículos y estructuras que están sometidas a cargas repetidas o vibración.

Si el número de repeticiones (ciclos) de la carga es grande (del orden de millones), se denomina **fatiga de alto ciclo**. En **fatiga de bajo ciclo**, sin embargo, el fallo se produce con un número de ciclos bajo (orden de millares de ciclos). La fatiga de bajo ciclo se acompaña usualmente de una deformación plástica significativa, mientras que la fatiga de alto ciclo se asocia a deformaciones relativamente pequeñas, básicamente elásticas. El calentamiento y enfriamiento repetido puede causar tensiones cíclicas debidas a la expansión y contracción térmica diferencial, que produzcan **fatiga térmica**.

Las grietas pueden estar presentes inicialmente en un componente desde su fabricación, o pueden iniciarse en el comienzo de la puesta en servicio. Se debe considerar la gran importancia del posible crecimiento de estas grietas de fatiga, que pueden conducir a una fractura dúctil o frágil cuando las grietas alcanzan un tamaño suficiente. Estas situaciones se identifican con el término crecimiento de grieta de fatiga y puede analizarse mediante mecánica de la fractura.

Dos o más de los tipos de fallos descritos anteriormente pueden actuar conjuntamente para causar efectos mayores de los producidos separadamente, es decir existen efectos sinérgicos.

El creep y la fatiga pueden producir este efecto aumentado cuando existe carga cíclica y alta temperatura. El desgaste debido a pequeños movimientos entre componentes ajustados se puede combinar con la carga cíclica para producir daños superficiales seguidos de agrietamiento, denominándose fatiga-fretting. Esto puede causar el fallo a niveles

sorprendentemente bajos de tensiones para ciertas combinaciones de materiales. Por ejemplo, la fatiga fretting puede ocurrir cuando se ajusta un engranaje a un eje por interferencia. De forma análoga, la fatiga-corrosión es la combinación de carga cíclica y corrosión.

4.2.3. FUENTES FUNDAMENTALES DE FALLO.

4.2.3.1 DEFICIENCIAS EN EL DISEÑO.

4.2.3.1.1 CONCENTRADORES DE TENSIÓN.

La presencia de concentradores de tensión en zonas de tensiones elevadas es una deficiencia de diseño que aparece frecuentemente. La interacción entre dos concentradores de tensión, tal como un radio de acuerdo en un cambio de sección de un eje y un chavetero, es una situación típica que puede conducir al fallo.

Ejemplo: El eje mostrado en la figura, perteneciente a un dispositivo de ensamblado de tubos, está sometido a cargas de flexión. El fallo se produce en un cambio de sección, donde existe una elevación importante de tensiones debido al bajo radio de acuerdo. También se detectó la presencia de una inclusión no metálica que contribuyó a la iniciación de la grieta. El fallo es por fatiga (flexión unidireccional). Acción correctora: aumentar el radio de acuerdo.

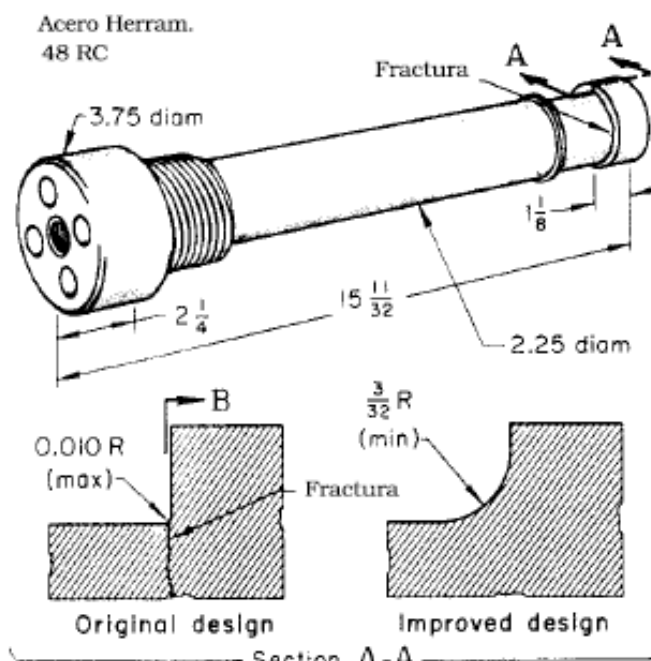


Figura 4.2.3.- Dispositivo de ensamblado sometido a cargas de flexión.

4.2.3.1.2 CAMBIOS EN EL DISEÑO INICIAL.

En ocasiones, se realizan cambios en el diseño sin considerar adecuadamente la elevación de tensiones debida a concentradores de tensiones

Ejemplo: Mangueta de un vehículo militar que falla al coincidir el concentrador de tensiones con la zona más cargada. El agujero interno fue una modificación para aligerar peso. Acción correctora: hacer el agujero más corto.

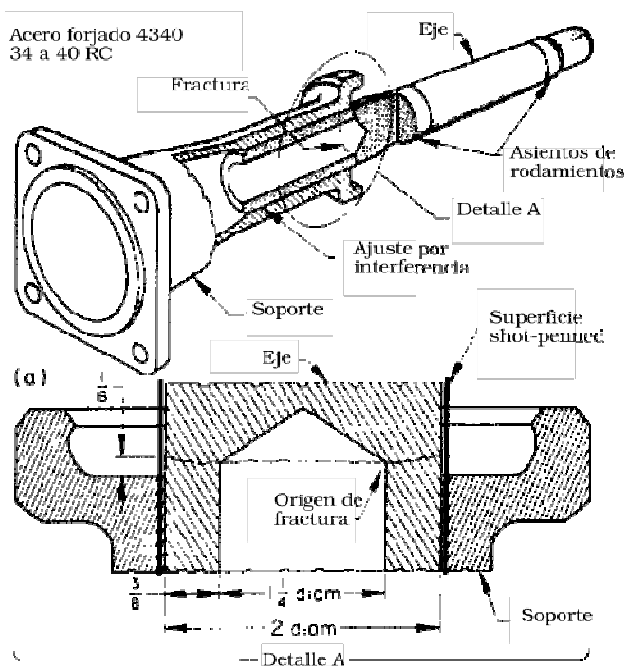


Figura 4.2.4.- Manguito de vehículo. Fallo debido a modificación inadecuada de un diseño previo.

4.2.3.1.3 CAMBIOS A CONDICIONES MÁS SEVERAS DE SERVICIO.

Está ocasionado por la utilización de un componente o subconjunto a una nueva aplicación, con condiciones más severas que las que se consideraron en su diseño original. Las razones más comunes de fallo en la nueva aplicación son: especificaciones no válidas de material y tratamientos térmicos para la nueva aplicación, variaciones de campos de tensiones que llegan a ser críticos en la nueva aplicación, concentradores de tensiones que no eran importantes en la aplicación original y resultan ser críticos en la nueva aplicación, etc.

Ejemplo: Cazoleta de retención de un muelle de la válvula de un motor de automóvil de 8 cilindros. Falló en un ensayo previo del motor después de haberse utilizado sin problemas en un motor de menor potencia (falló a las 200h, 4100-4600 r.p.m., 26×10^6 ciclos aproximadamente). El fallo está producido por la carga cíclica, produciendo fatiga y fallo final por rotura frágil. Acción correctora: Se aumenta el radio de acuerdo, ya que es más económico que mejorar el material utilizado.

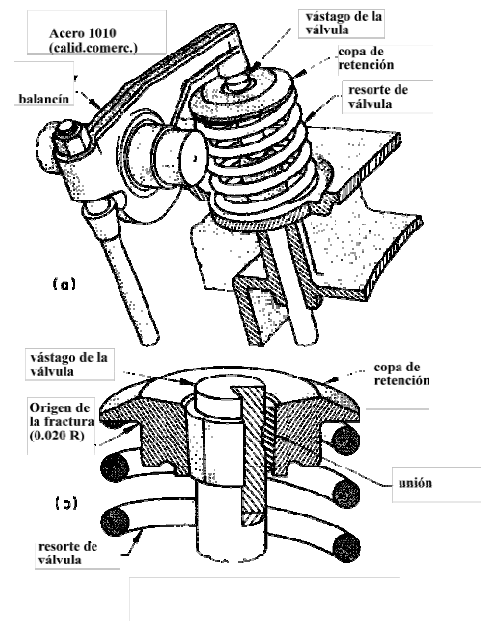


Figura 4.2.5.- Cazoleta de retención de muelle de válvula. Fallo debido a cambio de condiciones de funcionamiento.

4.2.3.1.4 CRITERIOS DE DISEÑO INSUFICIENTES.

Pueden aparecer deficiencias en el diseño debido a la imposibilidad de obtener resultados precisos de tensiones en componentes con geometrías complejas y a la información insuficiente de los tipos y magnitudes de las solicitaciones a las que está sometido.

Ejemplo: Eje ranurado, utilizado en un motor de avión, que falla después de 10.000 horas de vuelo. En operación, el eje soporta una carga compleja (básicamente carga estática radial, carga cíclica torsional y flexión cíclica con inversión). La superficie interna está expuesta a aceite (temperatura de 0 a 80°C). Falló por fatiga-corrosión por aceite contaminado por agua. Acción correctora: mantenimiento para conseguir que el aceite no estuviera contaminado por agua.

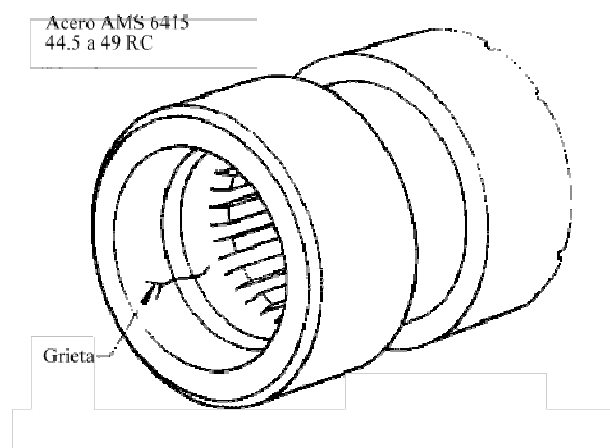


Figura 4.2.6.- Eje ranurado sometido a carga compleja. Fallo por criterio de diseño insuficiente.

4.2.3.2 DEFICIENCIAS EN LA SELECCIÓN DEL MATERIAL.

4.2.3.2.1 INADECUACIÓN DE LOS DATOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN.

Exceptuando los casos en los que la fractura dúctil o la fluencia delimitan las condiciones de fallo, el límite de rotura o la tensión de fluencia pueden ser criterios no adecuados para prevenir el fallo, dando lugar a la selección incorrecta del material. Para cada mecanismo de fallo, existe un número limitado de criterios de importancia real en la selección del material.

4.2.3.3 IMPERFECCIONES EN EL MATERIAL.

Muchos fallos pueden originarse debido a las imperfecciones del material. Las imperfecciones internas y superficiales pueden reducir la resistencia del material, dando zonas de nucleación de grietas o propagación, sirviendo como puntos preferentes para el ataque químico o la corrosión intergranular. En la fundición pueden aparecer inclusiones, poros, cavidades, etc. En el forjado, solapes, capas, contracciones, cavidades, etc.

4.2.3.4 DEFICIENCIAS EN EL PROCESO DE FABRICACIÓN.

El fallo está relacionado en algunas ocasiones con especificaciones del proceso de fabricación no apropiadas, con especificaciones ambiguas o incompletas, modificaciones realizadas sin una evaluación completa, etc.

El conformado en caliente puede producir micro o macrogrietas o pérdidas locales de ductilidad. El mecanizado y rectificado pueden producir tensiones residuales o rugosidades no deseadas. Las marcas de identificación del componente pueden dar lugar a concentradores de tensiones. Los tratamientos térmicos inadecuados o la soldadura pueden modificar localmente la resistencia del componente.

Ejemplo: Piñón espiral en el que se detectaron grietas cuando se desmontó un rodamiento que había fallado. Las grietas tenían aproximadamente 2 cm. La utilización normal produce una flexión cíclica en la base del diente. Este engranaje falló porque la resistencia en los dientes era baja debido a que no se reendureció el material después de mecanizar el chavetero.

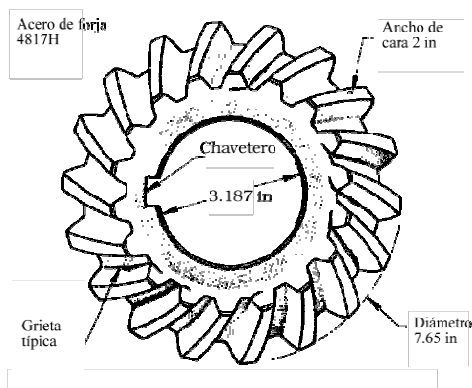


Figura 4.2.7.- Piñón espiral. Fallo por deficiencia en el proceso de fabricación.

Ejemplo: Fractura por fatiga de una rueda iniciada en una marca de fábrica. Acción correctora: Cambiar la marca de fabricación.

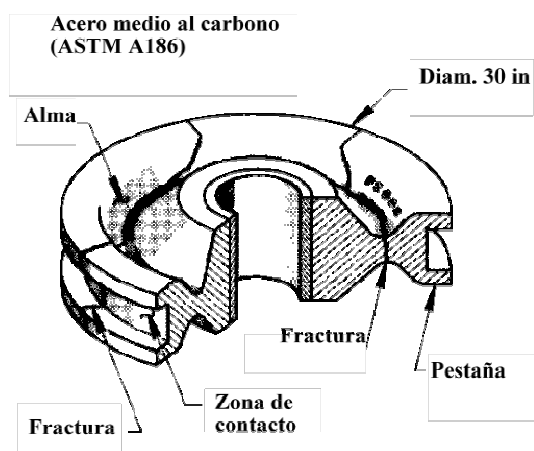


Figura 4.2.8.- Polea. Fallo iniciado en marca de fabricación.

4.2.3.5 ERRORES EN EL ENSAMBLADO.

Este tipo de fallo está asociado generalmente a partes móviles de conjuntos mecánicos, aunque puede aparecer en conjuntos estructurales (como por ejemplo debido a la mala posición en juntas roblonadas). Las deficiencias de este tipo están relacionadas con imprecisiones, especificaciones de ensamblado ambiguas o incompletas, etc., pero ocurren también frecuentemente por errores o negligencia del operador.

4.2.3.5.1 NEGLIGENCIA DEL OPERADOR.

Ejemplo: Rotura de un motor de 4 cilindros que arrastra un compresor. Se rompió un pistón, se dobló la biela, e hizo un agujero en el cárter de 20x7 cm. El fallo se produjo porque el operario no puso una tuerca en uno de los pernos que unen el pie de la biela.

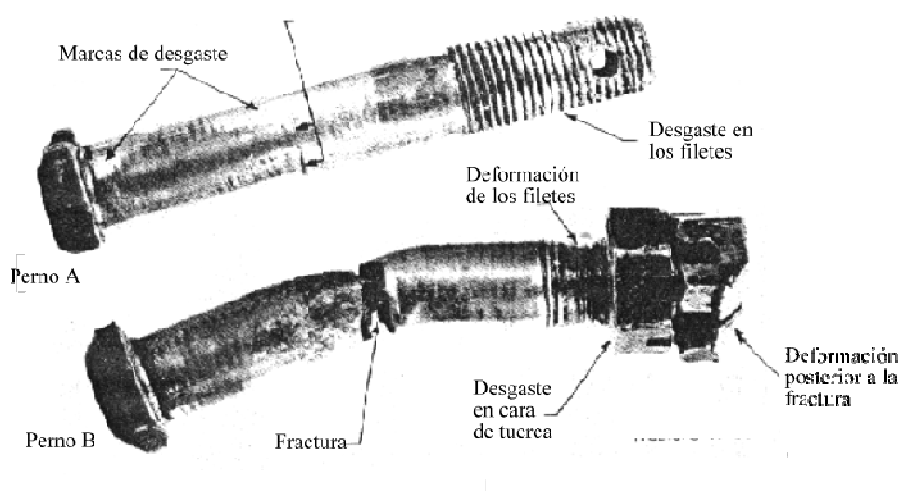


Figura 4.2.9.- Perno de biela. Fallo por negligencia en el montaje.

4.2.3.5.2 ESPECIFICACIONES INADECUADAS DE PROCEDIMIENTO.

Como por ejemplo, especificaciones inadecuadas de los pares de apriete.

4.2.3.5.3 DESALINEAMIENTOS.

Son especialmente importantes en ejes, rodamientos, engranajes, etc.

Ejemplo: Fatiga prematura de un piñón por falta de alineamiento.

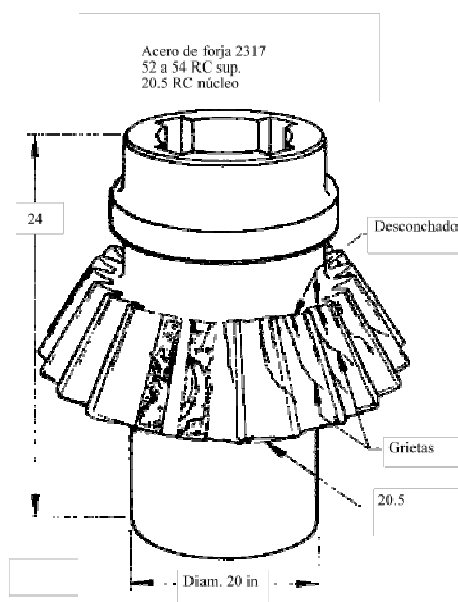


Figura 4.2.10.- Piñón. Fallo por fatiga prematura por desalineamiento.

4.2.3.6 CONDICIONES DE SERVICIO IMPROPIAS.

La operación de un equipo bajo condiciones anormalmente severas de velocidad, carga, temperatura o ambiente químico, o sin mantenimiento regular, inspección o monitorizado son causas importantes de fallo. El mantenimiento o la inspección pueden no tener ningún valor si no están basadas en los mecanismos de fallo que pueden aparecer en la máquina o componente concreto.

4.2.3.6.1 CONDICIONES TRANSITORIAS.

El transitorio debido, por ejemplo, al arranque o la parada puede introducir condiciones de funcionamiento más severas que las que se producen a régimen (paso por una frecuencia natural, transitorios de temperaturas, etc.).

4.2.3.6.2 MANTENIMIENTO INADECUADO.

Ejemplo: Eje ranurado de un generador que falla después de 907 horas de funcionamiento. Se utiliza un lubricante de molibdeno en la instalación inicial del componente. El fallo es debido al desgaste excesivo y al fretting entre el eje ranurado y el cubo. Acción correctora: lubricación cada 300 h de funcionamiento.

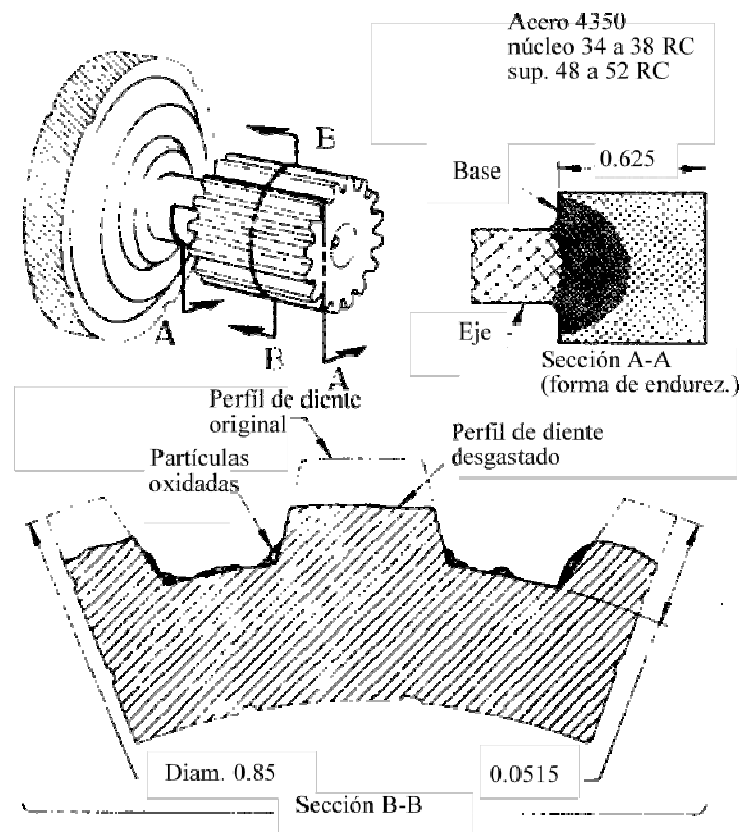


Figura 4.2.11.- Eje ranurado. Fallo por desgaste.

4.2.4. CLASIFICACIÓN DE MATERIALES.

4.2.4.1. CARACTERÍSTICAS BÁSICAS.

En las aplicaciones donde es necesaria la resistencia a la carga mecánica se utiliza una amplia variedad de materiales. Podíamos denominarlos materiales ingenieriles, y se pueden clasificar en primera instancia en:

- metales y aleaciones
- materiales poliméricos
- materiales cerámicos y vidrios
- materiales compuestos

En las tablas adjuntas se muestran ejemplos típicos de cada clase y sus características principales

Metales y aleaciones

- Hierros y aceros
- Aleaciones de aluminio
- Aleaciones de titanio
- Aleaciones de cobre; bronce
- Aleaciones de manganeso
- Superaloac. de base Níquel

Cerámicas y vidrios

- Productos arcillosos
- Cemento
- Alúmina(Al_2O_3)
- Carburo de Tungsteno
- Titanium aluminide (Ti_3Al)
- Cristales de Sílice (SiO_2)

Polímeros

- Polietileno
- Carbuos Cementados Poliestireno (PS)
- Nylons
- Epoxis
- Gomas

Compuestos

- Contrachapado Policloruro de Vinilo (PVC)
- Fibra de vidrio
- Grafito-epoxi
- SiC-aluminium
- Aramidas de aluminio laminadas (ARALL)

Tabla 1. Clases y ejemplos de materiales.

	VENTAJAS	INCONVENIENTES
Metales y aleaciones	<ul style="list-style-type: none"> * resistente, rígido * dúctil * conductor 	<ul style="list-style-type: none"> * fractura * fatiga
Polímeros	<ul style="list-style-type: none"> * bajo coste * peso ligero * resistente a corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> * baja resistencia * baja rigidez
Cerámicos y vidrios	<ul style="list-style-type: none"> * resistente, rígido, duro * resistente a temp. * resistente a corrosión 	<ul style="list-style-type: none"> * fragilidad
Compuestos	<ul style="list-style-type: none"> * resistente, rígido * peso ligero 	<ul style="list-style-type: none"> * coste alto * delaminación

4.3

RESISTENCIA DE MATERIALES

4.3.1.- RESISTENCIA DE MATERIALES.

4.3.1.1. CONCEPTOS.

Las deformaciones de los cuerpos, debida a la acción de cargas, en realidad son pequeñas y en general pueden ser detectadas solamente con instrumentos especiales. Las deformaciones pequeñas no influyen sensiblemente sobre las leyes del equilibrio y del movimiento del sólido, por lo que la Mecánica Teórica prescinde de ellas. Sin embargo, sin el estudio de estas deformaciones sería imposible resolver un problema de gran importancia práctica como es el de determinar las condiciones para las cuales puede tener lugar la falla de una pieza, o aquellas en las que la misma puede servir sin tal peligro.

Las construcciones que el ingeniero encuentre en su práctica tienen, en la mayoría de los casos configuraciones bastante complejas. Los diversos elementos de estas se reducen a los siguientes tipos simples.

a) **Barra:** Es un cuerpo que tiene dos dimensiones pequeñas en comparación con la tercera, como caso particular, pueden ser de sección transversal constante y de eje rectilíneo.



Figura 4.3.1.- Barra de eje curvo

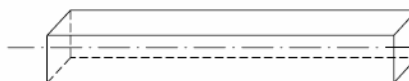


Figura 4.3.2.- Barra de eje recto

La línea que une los centros de gravedad de sus secciones transversales se denomina eje de la barra.

b) **Placa:** Es un cuerpo limitado por dos planos, a distancia pequeña en comparación con las otras dimensiones.

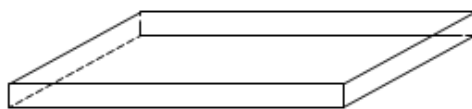


Figura 4.3.3.- Placa

c) Bóveda: Es un cuerpo limitado por dos superficies curvilíneas, a distancia pequeña en comparación con las otras dimensiones

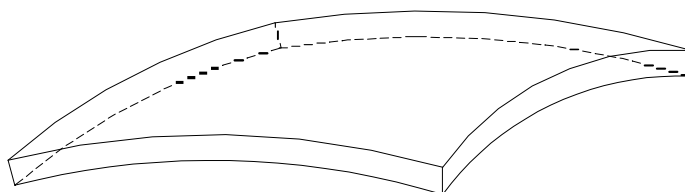


Figura 4.3.4.- Bóveda

d) Bloque: Es un cuerpo cuyas tres dimensiones son del mismo orden.

En la Resistencia de Materiales se estudian principalmente, los casos de barras que tienen sección constante y eje recto.

Entenderemos por falla de una estructura o de determinadas partes de la misma: a la rotura, o sin llegar a ello, a la existencia de un estado inadecuado. Esto último puede ocurrir por varios motivos: deformaciones demasiado grandes, falta de estabilidad de los materiales, fisuraciones, pérdida del equilibrio estático por pandeo, abollamiento o vuelco, etc. En este proyecto limitaremos el estudio a la falla por rotura, deformaciones excesivas o pandeo.

La Resistencia de Materiales es la disciplina que estudia las sollicitaciones internas y las deformaciones que se producen en el cuerpo sometido a cargas exteriores. La diferencia entre la Mecánica Teórica y la Resistencia de Materiales radica en que para ésta lo esencial son las propiedades de los cuerpos deformables, mientras que en general, no tienen importancia para la primera. Feodosiev ha dicho que la Resistencia de Materiales puede considerarse como Mecánica de Los Sólidos Deformables.

La Resistencia de Materiales tiene como finalidad elaborar métodos simples de cálculo, aceptables desde el punto de vista práctico, de los elementos típicos más frecuentes de las estructuras, empleando para ello diversos procedimientos aproximados. La necesidad de obtener resultados concretos al resolver los problemas prácticos nos obliga a recurrir a hipótesis simplificadoras, que pueden ser justificadas comparando los resultados de cálculo con los ensayos, o los obtenidos aplicando teorías más exactas, las cuales son más complicadas y por ende usualmente poco expeditivas.

Los problemas a resolver haciendo uso de esta ciencia son de dos tipos:

- a) Dimensionamiento
- b) Verificación

En el primer caso se trata de encontrar el material, las formas y dimensiones mas adecuadas de una pieza, de manera tal que ésta pueda cumplir su cometido:

- Con seguridad
- En perfecto estado
- Con gastos adecuados

El segundo caso se presenta cuando las dimensiones ya han sido prefijadas y es necesario conocer si son las adecuadas para resistir el estado de sollicitaciones actuantes.

4.3.1.2. HIPÓTESIS FUNDAMENTALES.

a) El material se considera macizo (continuo).

El comportamiento real de los materiales cumple con esta hipótesis aún cuando pueda detectarse la presencia de poros o se considere la discontinuidad de la estructura de la materia, compuesta por átomos que no están en contacto rígido entre sí, ya que existen espacios entre ellos y fuerzas que los mantienen vinculados, formando una red ordenada. Esta hipótesis es la que permite considerar al material dentro del campo de las funciones continuas.

b) El material de la pieza es homogéneo (idénticas propiedades en todos los puntos).

El acero es un material altamente homogéneo; en cambio, la madera, el hormigón y la piedra son bastante heterogéneos. Sin embargo, los experimentos demuestran que los cálculos basados en esta hipótesis son satisfactorios.

c) El material de la pieza es isótropo.

Esto significa que admitimos que el material mantiene idénticas propiedades en todas las direcciones.

d) Las fuerzas interiores, originales, que preceden a las cargas, son nulas.

Las fuerzas interiores entre las partículas del material, cuyas distancias varían, se oponen al cambio de la forma y dimensiones del cuerpo sometido a cargas. Al hablar de fuerzas interiores no consideramos las fuerzas moleculares que existen en sólido no sometido a cargas.

Esta hipótesis no se cumple prácticamente en ninguno de los materiales. En piezas de acero se originan estas fuerzas debido al enfriamiento, en la madera por el secamiento y en el hormigón durante el fraguado. Si estos efectos son importantes debe hacerse un estudio especial.

e) Es válido el principio de superposición de efectos.

Al tratarse de sólidos deformables este principio es válido cuando:

Los desplazamientos de los puntos de aplicación de las fuerzas son pequeños en comparación con las dimensiones del sólido.

Los desplazamientos que acompañan a las deformaciones del sólido dependen linealmente de las cargas. Estos sólidos se denominan “sólidos linealmente deformables”.

Por otro lado, siendo que las deformaciones son pequeñas, las ecuaciones de equilibrio correspondiente a un cuerpo cargado pueden plantearse sobre su configuración inicial, es decir, sin deformaciones.

Lo que hemos enunciado en este último párrafo es válido en la mayoría de los casos, no obstante, cuando analicemos el problema del pandeo de una barra elástica veremos que este criterio no puede ser aplicado.

f) Es aplicable el principio de Saint – Venant.

Este principio establece que el valor de las fuerzas interiores en los puntos de un sólido, situados suficientemente lejos de los lugares de aplicación de las cargas, depende muy poco del modo concreto de aplicación de las mismas. A este principio en muchos casos podremos sustituir un sistema de fuerzas por otro estáticamente equivalente, lo que puede conducir a la simplificación del cálculo.

g) Las cargas son estáticas o cuasi-estáticas.

Las cargas se dicen que son estáticas cuando demoran un tiempo infinito en aplicarse, mientras que se denominan cuasi-estáticas cuando el tiempo de aplicación es suficientemente prolongado. Las cargas que se aplican en un tiempo muy reducido se denominan dinámicas, y las sollicitaciones internas que producen son sensiblemente mayores que si fuesen estáticas o cuasi-estáticas.

4.3.1.3. MÉTODO.

Al realizarse el estudio de un objeto o sistema real se debe comenzar por la elección de un esquema de cálculo.

Para realizar el cálculo de una estructura se debe, ante todo, separar lo importante de lo que carece de importancia, es decir, se debe esquematizar la estructura prescindiendo de todos aquellos factores que no influyen significativamente sobre el comportamiento del sistema como tal. Este tipo de simplificación es en todos los casos absolutamente necesario, puesto que la solución del problema que considere todas las propiedades de la estructura es imposible debido a que, en general éstas son inagotables.

Supongamos, por ejemplo, que deseamos calcular la resistencia del cable de un

ascensor. Debemos considerar ante todo el peso de la cabina, su aceleración y, en el caso de que se eleve a gran altura, el peso del cable. Simultáneamente, podremos dejar de lado algunos factores de poca importancia como la resistencia aerodinámica que ofrece al ascensor, la presión barométrica a distintas alturas, la variación de la temperatura con la altura, etc.

Un mismo cuerpo puede tener esquemas de cálculo diferentes, según la exactitud pretendida y según el aspecto del fenómeno que interesa analizar. Por otro lado, un hecho muy importante a tener en cuenta es que a un mismo esquema de cálculo pueden corresponderle muchos objetos reales.

Esto reviste gran importancia, pues al estudiar teóricamente cierto esquema de cálculo se puede obtener la solución de toda una serie de problemas reales comunes al esquema dado.

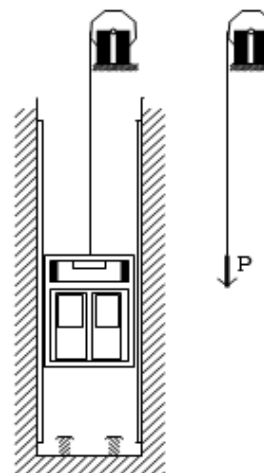


Figura 4.3.5.- Ascensor

Al escogerse el esquema de cálculo se introducen ciertas simplificaciones en:

- a)** La geometría del objeto. Así un sólido muy alargado se puede idealizar con una barra.
- b)** Los vínculos. Usualmente se consideran ideales.
- c)** Los sistemas de fuerzas aplicadas: es conocido por ejemplo, que las cargas concentradas prácticamente no existen en la realidad, sino que son las resultantes de fuertes presiones localizadas en zonas pequeñas.
- d)** Las propiedades de los materiales.

El paso siguiente a la elaboración del esquema de cálculo corresponde a la resolución numérica del problema, para lo cual, las bases fundamentales de la Resistencia de Materiales se apoyan en la Estática, la que resulta sumamente importante en la determinación de las solicitaciones internas y de las deformaciones.

Aún cuando a partir del encauzamiento del estudio por la vía de las operaciones matemáticas pareciera que el trabajo ha concluido, debemos dejar bien en claro que el cálculo no consiste solamente en el empleo de fórmulas. En efecto, debemos tener muy presente que lo que se ha resuelto no es el sistema real sino un modelo matemático. Esto significa que los resultados deben ser adecuadamente interpretados, y eventualmente corregidos para acercarse lo más próximo posible a la solución real.

Finalmente, y a título de resumen, podemos decir que el método de la Resistencia de Materiales, que no es sino el de la Mecánica Aplicada puede enunciarse de la siguiente manera:

- 1) Elección de un esquema de cálculo (elaboración de un modelo matemático).
- 2) Resolución matemática del problema.
- 3) Interpretación de los resultados en función del sistema físico real.

4.3.2. CONCEPTOS DE TENSIÓN Y DE DEFORMACIONES ESPECÍFICAS.

Como introducción al tema observemos la máquina de la figura 4.3.6 la función de esta prensa es la de ensayar muestras de materiales sometidos a esfuerzos de compresión. Para ello se coloca la muestra sobre el piso de la base y se aprieta el extremo del tornillo contra ella haciendo girar el volante del extremo superior. Esta acción somete así a la porción inferior del tornillo a compresión axial y a las barras laterales a tracción axial. Se observa también que la cruceta de cabeza está sometida a flexión y corte, y la parte superior del tornillo a torsión.

Si consideramos los componentes de prensa, vemos que los mismos están sometidos a diferentes tipos de solicitaciones, las que generan esfuerzos internos. Por ejemplo, podríamos trazar los diagramas característicos correspondientes a momentos flectores y corte en la cruceta de cabeza.

Si tomamos ahora una de las barras laterales y le realizamos un corte como el a-a indicado, veremos que para que la parte superior se encuentre en equilibrio (ver figura 4.3.6), en esta sección debe aparecer una fuerza F que en realidad representa la acción de la otra parte eliminada. Ahora bien ¿debemos suponer que en la sección indicada aparece en realidad una fuerza concentrada F ? La intuición nos dice que eso no parece lógico, lo razonable es que aparezcan solicitaciones en cada punto de la sección considerada, que no son otra cosa que los esfuerzos que actúan en cada partícula manteniendo la continuidad del cuerpo. La ley matemática que podría corresponderle a estas solicitaciones podría ser la que se indica en la figura 1.6 aunque no lo podemos afirmar rigurosamente si no hacemos un buen estudio del problema.

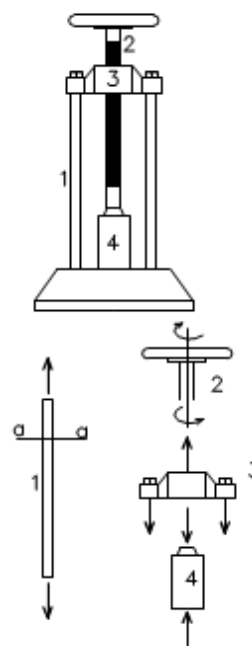


Figura 4.3.6.- Máquina de prensa

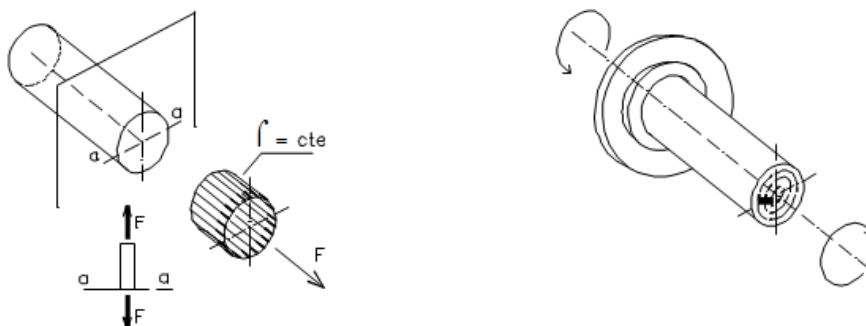


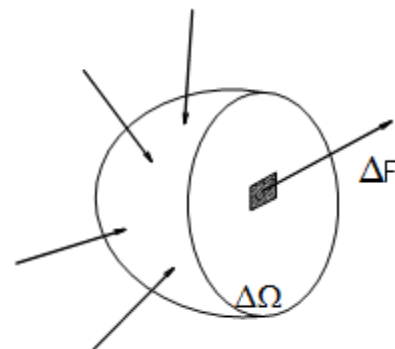
Figura 4.3.6.- Sección de las barras

Observemos a continuación el tornillo 2, vemos que en la sección indicada aparece un momento torsor. Nuevamente, es de suponer que este esfuerzo es en realidad el resultante de un conjunto de sollicitaciones que actúan punto a punto, y con una ley semejante a la indicada en la figura

También podemos observar que en este caso las sollicitaciones no son similares a las anteriores, ya que antes teníamos fuerzas distribuidas uniformemente y perpendiculares a la sección, mientras que ahora las fuerzas son yacentes en la sección, con intensidades y sentido cambiantes.

A partir de todas las consideraciones anteriores podemos formular una hipótesis: “Los esfuerzos internos en una sección cualquiera de un cuerpo se desarrollan punto a punto”. Esta hipótesis será de gran importancia y pueden demostrarse experimentalmente.

Si consideramos un cuerpo sometido a cargas exteriores en equilibrio, y lo dividimos en dos partes mediante la intersección con un plano cualquiera, sabemos que en la sección originada aparecerán fuerzas que mantienen el equilibrio de la porción. Si en la sección tomamos un punto P y un entorno de área $\Delta\Omega$, sobre dicha área existirá una fuerza elemental ΔF .



Haciendo el cociente de $\Delta F / \Delta\Omega$, con $\Delta\Omega$ tendiendo a cero, definiremos como “vector tensión total o tensión resultante en el punto P, al siguiente límite.

$$\sigma = \lim_{\Delta\Omega \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta\Omega}$$

Figura 4.3.7.- Cuerpo con cargas en equilibrio

[4.3.1]

La tensión es una magnitud vectorial, por lo tanto queda definida mediante tres parámetros: intensidad, dirección y sentido. Por otro lado, la dimensión que tiene es la de una fuerza por unidad de área, y puede medírsela, por ejemplo, en Kg/cm² (KN/cm²)

Sistema Internacional de Unidades		
Fuerza	Newton	1 N \approx 0,1 Kgf
Momento	Newton \times metro	N.m
Presión	Pascal	Pa = N / m ²

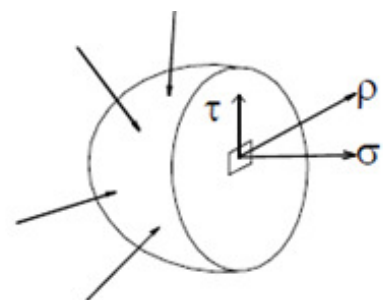


Figura 4.3.8.- Tabla de unidades

Figura 4.3.9.-Cuerpo con cargas en equilibrio

El vector tensión total puede descomponerse según dos direcciones, una normal al plano de la sección y otra contenida en el mismo, obteniéndose así dos componentes de tensión denominadas tensión normal (σ) y tensión tangencial (τ). Ver figura 4.3.9.

Volviendo nuevamente al caso de la barra lateral de la prensa, cuando más gira el volante superior mayor es la fuerza que debe absorber la barra. Se observa así mismo que la barra se estira ligeramente de modo que para cada valor de F se produce un pequeño alargamiento δ .

Como el esfuerzo F es constante en toda la barra, todas las fibras longitudinales están estiradas uniformemente. Podemos entonces establecer el cociente entre el desplazamiento δ y la longitud L de la barra cuando está descargada, a este cociente lo denominamos “deformación unitaria o específica”

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad [4.3.2]$$

Observamos que ésta no tiene unidades, es decir, es una magnitud adimensional. Ahora bien, si todas las fibras se han alargado igual, cada punto del cuerpo está caracterizado por tener la misma deformación específica, aunque en otros casos esto podría no ser así, con lo que cada punto tendría un valor distinto de ϵ .

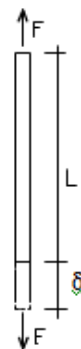


Figura 4.3.10

De las consideraciones anteriores podemos deducir que cada punto de la barra tiene una tensión y una deformación.

Supongamos ahora que quisiéramos graficar la variación Carga – Desplazamiento ($F - \delta$):

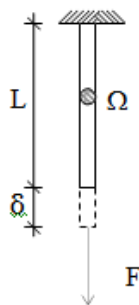
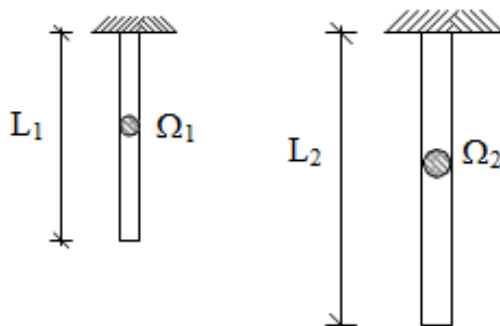


Figura 4.3.11

Para nuestro análisis, consideremos la posibilidad de combinar las variables sección y longitud; manteniendo las características del material constante.



Dónde:
 $\Omega_2 > \Omega_1$
 $L_1 > L_2$

Figura 4.3.12

Aún cuando se trata del mismo material, la representación Carga – Desplazamiento va a variar si tomamos en cuenta la sección o la longitud de la barra

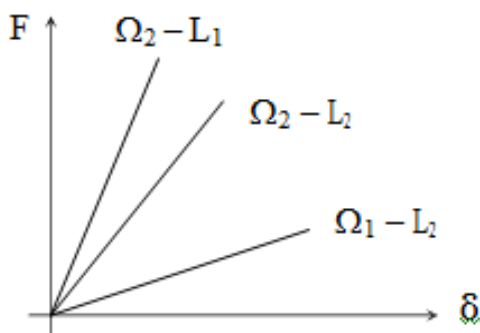


Figura 4.3.13

4.3.3. ALGUNAS PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

4.3.3.1. ELASTICIDAD Y PLASTICIDAD.

Si retomamos nuevamente el ejemplo de la barra traccionada, podemos ver que si la fuerza F cesa, el alargamiento δ desaparece completa o parcialmente, es decir, la barra tiende a recuperar su longitud original L . Esta propiedad que posee un material de volver parcial o completamente a su forma inicial una vez que desaparece la carga es lo que se llama “elasticidad”. Si la barra recupera completamente su longitud inicial, se dice que el material es “perfectamente elástico”; de lo contrario se dice que es “parcialmente elástico”.

La “plasticidad” es una propiedad opuesta, un material es “perfectamente plástico” cuando al dejar de actuar la carga que lo deforma mantiene su configuración deformada.

En la realidad ningún material resulta perfectamente elástico o perfectamente plástico. Algunos materiales como el acero, aluminio, goma e incluso la madera y el hormigón pueden ser considerados como perfectamente elásticos dentro de ciertos límites, es decir, si no están excesivamente cargados. Otros materiales como la arcilla y la masilla pueden considerarse como perfectamente plásticos.

4.3.3.2. LEY DE HOOKE.

La denominada Ley de Hooke constituye la base de la Resistencia de Materiales y es válida dentro de lo que se denomina régimen lineal elástico. Esta ley establece que si la tensión normal σ se mantiene por debajo de un cierto valor σ_p , llamado tensión de proporcionalidad, las deformaciones específicas y las tensiones son directamente proporcionales.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

[4.3.3]

E: Recibe el nombre de Módulo de Elasticidad Longitudinal, o módulo de Young. El valor de E es una característica de cada material

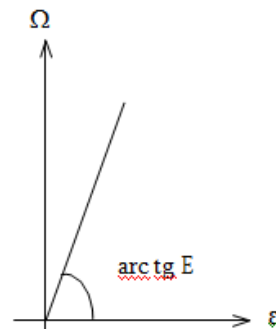


Figura 4.3.14- Diagrama: Modulo Elasticidad

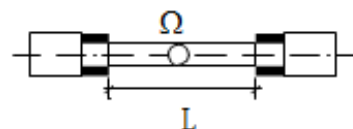
4.3.3.3. DIAGRAMA TENSIÓN - DEFORMACIÓN (Ω - E) DEL ACERO COMÚN.

Al resolver los problemas de la Resistencia de Materiales nos encontramos con la necesidad de tener ciertos datos experimentales previos sobre los cuales se pueda basar la teoría. Por ejemplo, para poder establecer la ley de Hooke se hace necesario conocer el módulo E, el cual debe determinarse experimentalmente.¹

Para obtener los datos antes mencionados se pueden realizar distintos tipos de ensayo, de los cuales uno muy difundido es el de tracción. Para este ensayo usualmente se emplean probetas especiales, que consisten en barras de sección circular, las cuales son estiradas en una máquina especialmente diseñada para el ensayo. Como veremos en el próximo capítulo, cuando una barra está sometido a un esfuerzo axial P, aparecen internamente tensiones normales σ calculables a través de la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{P}{\Omega}$$

[4.3.4]



Dónde Ω es el área de la sección transversal de la barra. Sabemos también que se originan desplazamientos δ . Si entonces se miden los valores (P ; δ) para cada escalón de carga, se pueden graficar los valores (σ ; ε), que se evalúan mediante las expresiones ya conocidas.

Para el caso del acero común, también llamado acero dulce, que es de bajo contenido de carbono, el diagrama tension-deformación resulta como el de la figura siguiente

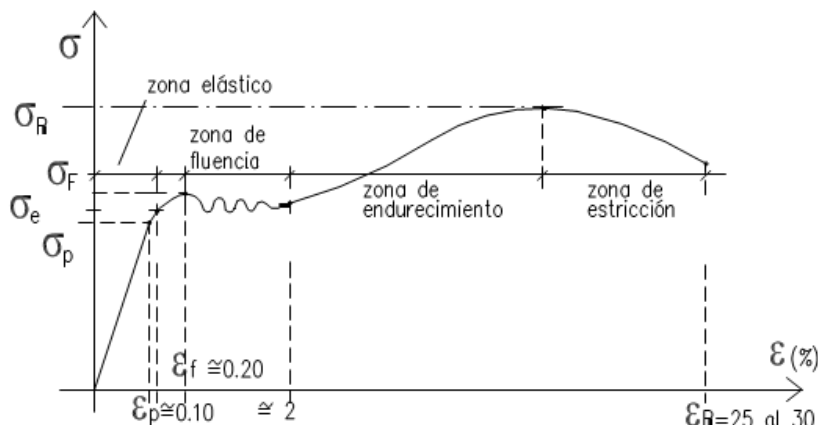


Figura 4.3.16 Diagrama tensión-deformación

En este diagrama pueden distinguirse ciertas zonas con determinadas características:

a) Período elástico.

Este período queda delimitado por la tensión σ_e (límite de elasticidad). El límite de elasticidad se caracteriza porque, hasta llegar al mismo, el material se comporta elásticamente, es decir que producida la descarga, la probeta recupera su longitud inicial. En la práctica, este límite se considera como tal cuando en la descarga queda una deformación específica remanente igual al 0.001 %.

Este período comprende dos zonas: la primera, hasta el σ_p (límite de proporcionalidad), donde el material verifica la ley de Hooke. La segunda entre σ_p y σ_e , si bien es elástica, no manifiesta proporcionalidad entre tensiones y deformaciones.

[4.3.5]

En la primera zona :

— —

En la segunda zona :

[4.3.5.1]

—

= Módulo de elasticidad reducido

En general, los límites de proporcionalidad y de elasticidad difieren muy poco entre sí.

b) Período elasto-plástico.

Para valores de tensión superiores al límite elástico, la pieza si fuera descargada no recobraría su dimensión original, apreciándose una deformación remanente acorde con la carga aplicada. A medida que aumenta la sollicitación, la gráfica representativa es la de una función para la cual disminuye el valor de su Tangente, tendiendo a anularse en el tramo final del período, al cual se llega con un valor de tensión que se indica como σ_f (tensión de fluencia).

c) Período plástico (fluencia).

Una vez arribado al valor de tensión σ_f (límite de fluencia), el material fluye, es decir, aumentan las deformaciones sin que existe aumento de tensión. En realidad este fenómeno no es tan simple, ya que puede verse que la tensión oscila entre dos valores límites y cercanos entre sí, denominados límites de fluencia superior e inferior, respectivamente. La tensión de proporcionalidad resulta ser aproximadamente el 80% de la tensión de fluencia.

$$\sigma_p = 0.8 \sigma_f$$

[4.3.6]

Las investigaciones demuestran que durante la fluencia se producen importantes deslizamientos relativos entre los cristales. Como consecuencia de estos deslizamientos, en la superficie de la probeta aparecen las llamadas líneas de Chernov - Lüders, que forman con el eje de la misma un ángulo de 45°.



Figura 4.3.17

d) Período de endurecimiento y de estricción.

Como consecuencia de un reacomodamiento cristalográfico, luego de la fluencia el material sufre un re-endurecimiento, que le confiere la capacidad de incrementar la resistencia, es decir, puede admitir un incremento de carga. Sin embargo en este período las deformaciones son muy pronunciadas. La tensión aumenta hasta alcanzar un valor máximo σ_R , denominado “tensión de rotura”, a partir del cual la tensión disminuye hasta que alcanza una determinada deformación de rotura, produciéndose la rotura física.

La tensión σ_R no es en realidad la máxima tensión que se origina en la probeta sometida a carga. En efecto, alcanzado el valor de la deformación específica correspondiente a σ_R , comienza a manifestarse en la probeta un fenómeno denominado “estricción”.

Este consiste en una reducción de una sección central. Esta reducción, progresiva con el aumento de la carga, hace que las tensiones aumenten y que, en realidad, el diagrama efectivo en lugar de presentar su concavidad hacia abajo muestra un punto de inflexión en las vecindades de σ_R y cambia su curvatura presentando una rama creciente hasta alcanzar la deformación de rotura ϵ_R .

Debido a lo que hemos mencionado recientemente el diagrama que acabamos de ver suele denominarse “diagrama convencional $\sigma - \epsilon$ ”, ya que los cálculos de las tensiones se realizan siempre sobre la base de suponer la sección transversal constante, con área igual a la inicial.



Figura 4.3.18

Una valoración cuantitativa del fenómeno de estricción está dada por el “coeficiente de estricción lateral”, el cual se define según la siguiente expresión:

$$[4.3.7]$$

Dónde:

Ω_i = área inicial

Ω_f = área final

En los aceros comunes $\phi \approx 50 \%$

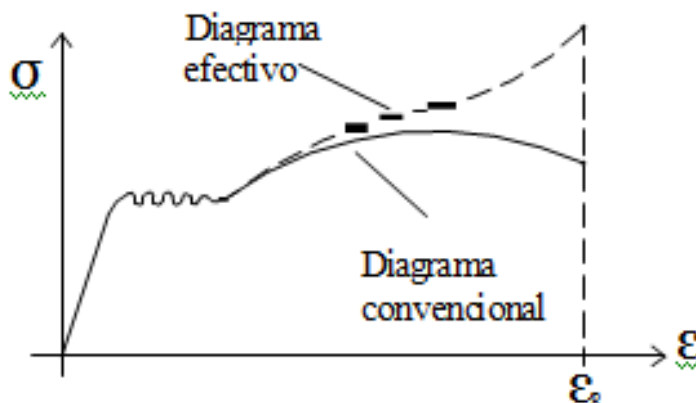


Figura 4.3.19 Diagrama efectivo y convencional

Si al realizar el ensayo de un acero común, una vez alcanzado un punto tal como el M de la gráfica de la figura 1.14, se descarga la probeta, se llega a una tensión nula a través de una recta paralela a la que define el período elástico, quedando una deformación remanente. Si la probeta vuelve a cargarse retoma la curva en el punto N, pero con un nuevo recorrido donde ya no existe el período de fluencia. Así mismo, la zona recta se prolonga hasta un valor $\sigma'_p > \sigma_p$.

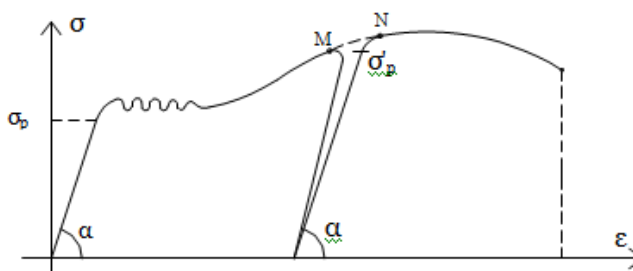


Figura 4.3.20 Endurecimiento mecánico del acero dulce

El fenómeno anterior se denomina endurecimiento mecánico o por trabajo en frío, y también puede lograrse por laminado en frío, trefilado o torsión. El trefilado se utiliza para endurecer alambres o barras circulares finas, y el torsionado especialmente para barras redondas (en general, con conformaciones superficiales), para hormigón armado.

Para estos aceros endurecidos mecánicamente o los de dureza natural, logrado por un mayor contenido de carbono o mediante aleaciones especiales, el diagrama $\sigma - \epsilon$ resulta ser substancialmente distinto del que hemos visto hasta este punto. Las características más importantes son las siguientes:

- Sus límites de proporcionalidad y elasticidad son más elevados que los aceros comunes.
- No poseen un límite de fluencia definido ni tampoco zonas de escurrimiento plástico.
- La deformación de rotura se reduce considerablemente.
- Como consecuencia de no existir un límite de fluencia definido, este se determina en forma convencional como la tensión para la cual la deformación específica remanente alcanza al 0.2%.

Los materiales como el acero dulce, que presentan una gran capacidad de deformación antes de alcanzar la rotura, se denominan “dúctiles”. Podemos decir que estos materiales avisan la rotura física, ya que antes de alcanzarse la misma las deformaciones son tan grandes, que la estructura llega a la falla por este motivo. Los materiales como el acero duro, para los cuales la rotura se produce bruscamente, sin grandes deformaciones previas, se denominan “frágiles”.

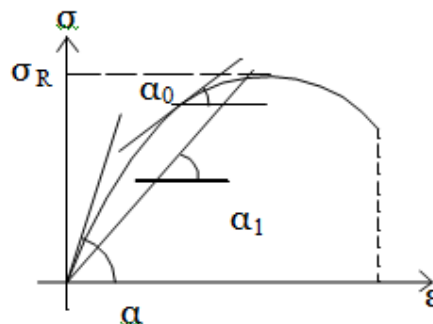
4.3.3.4. DIAGRAMA TENSIÓN – DEFORMACIÓN PARA OTROS MATERIALES.

Hay algunos materiales para los cuales se observa que el diagrama $\sigma - \varepsilon$ es una curva continua sin tramos rectos, es decir, que prácticamente en ningún momento verifican la ley Hooke. Un ejemplo clásico es el hormigón, para el cual en general interesa su curva $\sigma - \varepsilon$ en compresión.

En estos casos no puede hablarse de un módulo de elasticidad único. Caben distinguir tres valores del módulo de elasticidad:

a) Módulo al origen $E = \tan \alpha$ [4.3.8]

b) Módulo instantáneo o tangente. Su valor lo da la pendiente a la curva $\sigma - \varepsilon$ en cada punto:



0

[4.3.9]

Figura 4.3.21 Curva $\sigma - \varepsilon$ compresión

c) Módulo secante, el que viene dado por la tangente trigonométrica del ángulo α_1 .

Para estos materiales, Bach, sobre la base de numerosos ensayos, propuso como relación entre σ y ε una ley de tipo exponencial que lleva su nombre:

$$\sigma^k = E * \varepsilon \quad [4.3.10]$$

donde el coeficiente k depende del material (valor medio, ya que depende de muchas variables):

Material	Coeficiente k
Hormigón	$k = 1,15$
Cobre	$k = 1,10$
Latón	$k = 1,085$
Cuero	$k = 0.70$

Figura 4.3.20 Tabla de materiales Bach

En el caso particular en que se toma $k = 1$, 0 se obtiene la ley de Hooke. Ciertos materiales presentan además la particularidad de tener un comportamiento diferente en compresión que a tracción, tal es el caso del hormigón.

4.3.3.5. DIAGRAMAS IDEALES

Los diagramas que hemos visto suelen no ser prácticos para trabajar con ellos, por lo que en determinadas circunstancias se los reemplaza por diagramas idealizados debidos a Prandtl, que resumen las características fundamentales de los tres tipos básicos de materiales.

El diagrama ideal correspondiente a un material dúctil se compone de dos tramos

rectos: uno inclinado, correspondiente al período elástico; el otro horizontal, materializando el período de fluencia. El período de endurecimiento no interesa porque la deformación al final de la fluencia es tan significativa que el material está en falla antes de llegar a la rotura.

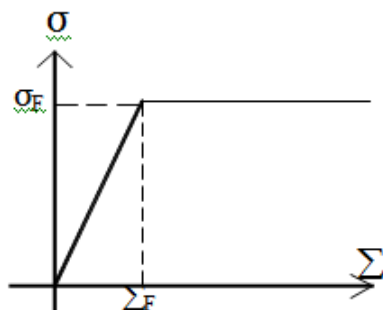


Figura 4.3.22 Diagrama ideal para un material dúctil

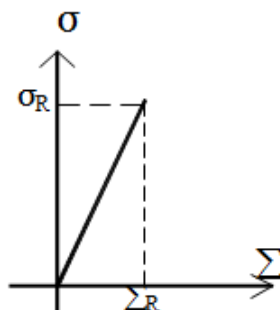


Figura 4.3.23 Diagrama ideal para un material frágil

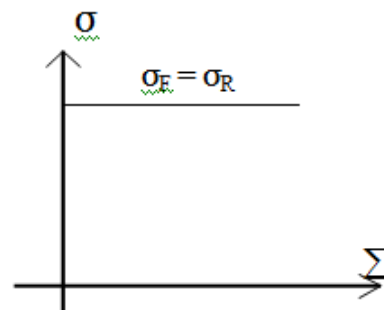


Figura 4.3.24 Diagrama ideal para un material plástico

En los materiales frágiles el límite de proporcionalidad es muy próximo a la tensión de rotura, prescindiéndose entonces del tramo curvo.

Para los materiales plásticos el diagrama es una recta horizontal, lo que significa que sometidos a una carga, se deforman indefinidamente sin incremento de tensión.

4.3.4. CONSTANTES ELÁSTICAS.

El comportamiento lineal elástico de los sólidos, permite determinar valores característicos o constantes elásticas, para cada material, agrupando entre ellos a los llamados módulos de elasticidad.

4.3.4.1. MÓDULO DE ELASTICIDAD LONGITUDINAL (E).

Consideremos una barra de longitud inicial L sometida a la acción de fuerzas axiales. Esta pieza por acción de la fuerza sufre un alargamiento ΔL .

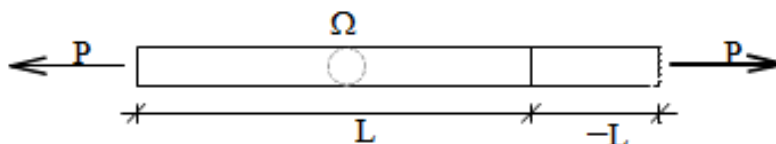


Figura 4.3.25 Alargamiento de una barra

La relación $\Delta L/L$, deformación específica unitaria, la identificamos con ϵ . Admitiendo para el material el cumplimiento de la ley de Hooke, la tensión $\sigma = P/\Omega$ usará proporcional a la deformación ϵ .

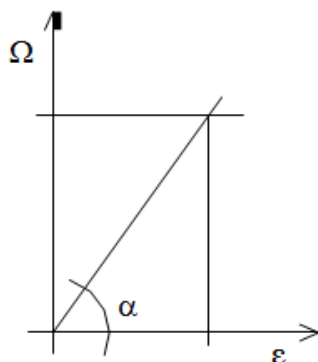


Figura 4.3.26

$$\tan \alpha = \frac{\sigma}{\epsilon} = E \quad [4.3.11]$$

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad [4.3.11.1]$$

La constante E, llamada módulo de elasticidad longitudinal, es también conocida como módulo de Young. Es la más importante de las cuatro constantes elásticas.

4.3.4.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD TRANSVERSAL (G).

Sea un paralelepípedo fijo en su parte inferior y de baja altura lo sometemos a una fuerza P en su cara superior.

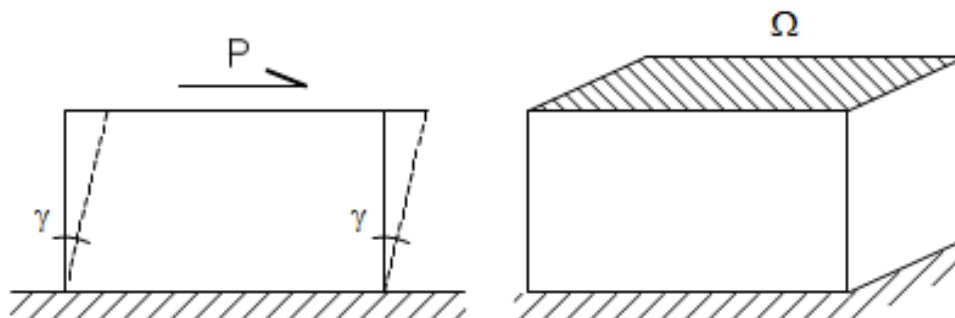


Figura 4.3.27 Deformación paralelepípedo

La deformación que se produce, muy pequeña, es una distorsión (deformación angular); al ángulo lo llamamos γ . La tensión (coincidente con el plano de la sección) la designamos como τ , siendo:

$$\tau = \frac{P}{\Omega} \quad \tau = \text{tensión tangencial o tensión de corte} \quad [4.3.12]$$

De la misma forma que se grafica la relación $\sigma - \epsilon$, puede hacerse con la de $\tau - \gamma$. Para el caso del acero común la gráfica representativa, es similar a la ya vista para las tensiones normales. Dentro del campo lineal elástico, la constante que vincula la tensión tangencial con la deformación angular, es llamada módulo de elasticidad transversal (G).

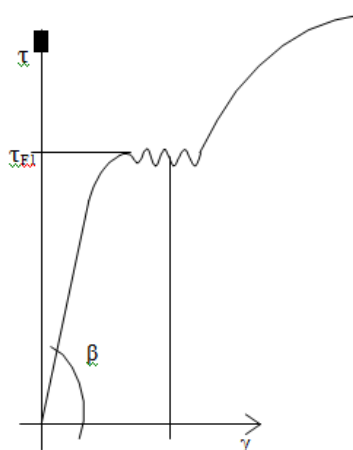


Figura 4.3.28 Gráfica relación $\tau - \gamma$

$$\tan \beta = \frac{\tau}{\gamma} = G \quad [4.3.13]$$

$$\tau = G \gamma \quad [4.3.13.1]$$

Para el acero común $\tau_{FL} = 0,57 \sigma_{FL}$

4.3.4.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD DE VOLUMEN (K)

Se define como el módulo de elasticidad de volumen (K), a la constante que permite obtener la deformación cúbica específica de un paralelepípedo elemental sometido a presión uniforme.

Sea un paralelepípedo inicialmente de lados Δx , Δy , Δz , sometidos a una presión hidrostática p ; cada una de las aristas experimentará un acortamiento, lo cual se traduce en una variación de volumen $\Delta V = V_f - V_i$.

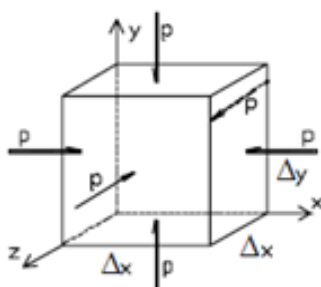


Figura 4.3.29

La deformación específica volumétrica está dada por:

$$\epsilon_v = \frac{V_f - V_i}{V_i} \quad [4.3.14]$$

Esta deformación se vincula a la presión actuante mediante una constante de proporcionalidad, el módulo K.

$$p = K \epsilon_v \quad [4.3.15]$$

Siendo ϵ_v adimensional, la unidad de K será (Kg/cm^2). Este módulo de elasticidad volumétrica no es independiente de los dos vistos anteriormente.

4.3.4.4. COEFICIENTE DE POISSON.

Al someter a una barra a un esfuerzo axial, además de experimentar deformación según la dirección de la fuerza, el cuerpo también deforma en las direcciones normales a ella.

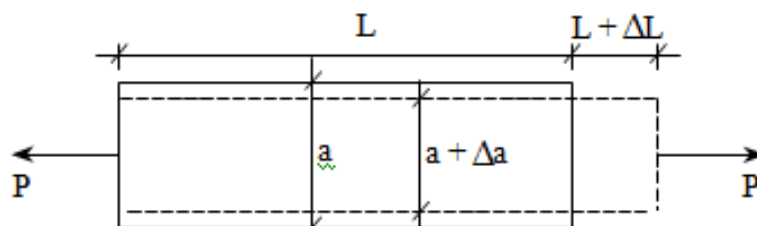


Figura 4.3.30 Barra sometida a una fuerza axial

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \quad ; \quad \epsilon_t = \frac{\Delta a}{a} \quad [4.3.16]$$

Llamando con ϵ_L el alargamiento específico en dirección de la fuerza y ϵ_t la deformación específica transversal, se define como coeficiente de Poisson (o módulo de Poisson) a la relación entre:

$$\mu = - \frac{\epsilon_t}{\epsilon_L} \quad [4.3.17]$$

o bien:

$$m = \frac{1}{\mu} = - \frac{\epsilon_L}{\epsilon_t} \quad [4.3.17.1]$$

El valor de μ es función del material, aunque su variación es pequeña. En general para materiales isótropos, μ varía entre 0,25 y 0,33.

En cualquier caso $\mu < 0,50$

Material	E (t/cm ²)	μ
Acero	2.000 a 2.100	0.22 a 0.33
Cobre	1.160 a 1.300	0.31 a 0.34
Bronce	1.100	0.32 a 0.35
Hierro fundido	750 a 1600	0.23 a 0.27
Aluminio	760	0.32 a 0.36
Madera (paralela a la fibra)	80 a 120	-
Hormigón	150 a 350	0.10 a 0.20
Mampostería de ladrillo	< 120	-
Caucho	0.01	0.47
Corcho	-	≈ 0.00

Figura 4.3.31 Valores de constantes Elásticas según el material

4.3.5. CONCEPTOS DE COEFICIENTES DE SEGURIDAD, DE TENSIÓN ADMISIBLE Y DE CARGA ADMISIBLE.

En el primer ítem de este capítulo hemos enunciado algunas de las causas que pueden provocar la falla de una pieza. Al realizar el dimensionamiento debemos crear seguridad contra todas las clases de falla posible, la cual puede producirse por coincidir varias circunstancias desfavorables, por ejemplo, un crecimiento no previsto de las cargas que gravitan en las secciones, cuya resistencia se ha debilitado por la existencia de vicios ocultos.

La teoría de probabilidades nos enseña que no se puede lograr una seguridad absoluta, lo único que puede hacerse es mantener reducidas las probabilidades de falla.

“La seguridad de una construcción siempre estará amenazada por incertidumbres, será satisfactoria cuando las probabilidades de falla queden por debajo del valor considerado como admisible”.

Existen numerosas causas de incertidumbres:

- Las hipótesis de cargas
- Las hipótesis de cálculo
- Los errores de cálculos
- Defectos del material
- Errores de las dimensiones
- Errores de ejecución

El método de cálculo fundamental y más difundido de los Coeficientes de Seguridad es el basado en las tensiones. Según este método, el cálculo de la resistencia se realiza controlando el valor de la tensión máxima que se produce en cierto punto de una estructura.

La tensión máxima de trabajo no debe superar cierto valor.

$$\sigma_{\max} \leq \frac{\sigma_L}{\nu} \quad [4.3.18]$$

σ_L : cierto valor límite de la tensión para el material dado

ν : un número mayor que la unidad denominado “coeficiente de seguridad”

Para el caso de materiales dúctiles el valor límite σ_L es el límite de fluencia en el caso de materiales frágiles σ_L es el límite de resistencia o tensión de rotura. La relación σ_L / ν recibe el nombre de “tensión admisible

$$\frac{\sigma_L}{\nu} = \sigma_{adm}$$

[4.3.19]

La elección del coeficiente de seguridad depende del mayor o menor grado de incertidumbre que exista en un problema, y se realiza basándose en toda una serie de criterios, en general probabilísticos, que escapan a los alcances de este curso.

Existen reglamentos que establecen los criterios de Dimensionamiento del coeficiente de seguridad, por ejemplo, la norma CIRSOC (SIREA). Para los casos más frecuentes ya existen valores establecidos de los coeficientes de seguridad. Podemos hacer referencia a disposiciones reglamentarias que tratan sobre construcciones de acero; indican valores que varían entre 1.25 y 1.60 según los recaudos constructivos, el destino de los edificios y los estados de carga considerados. Para estructuras de hormigón armado, los coeficientes de seguridad varían entre 1,75 y 2,10. Para el caso de la madera, material que presenta muchas incertidumbres en cuanto a su comportamiento, los coeficientes de seguridad suelen ser bastantes más grandes.

Una expresión que es usada con frecuencia para dar un concepto del coeficiente de seguridad, es que éste representa el incremento que debería tener el estado de cargas para producir el colapso de la pieza. Debemos señalar que si bien esto puede ser cierto, solamente lo será si los demás parámetros que intervienen en el problema están totalmente controlados, y no existe ninguna incertidumbre respecto de ellos.

En los materiales que tienen un período lineal elástico, la tensión admisible se encuentra en dicha zona, por lo tanto puede considerarse como válida la ley de Hooke, ya que la tensión de trabajo resulta menor o igual que la admisible. Para los materiales donde no existe un período elástico bien definido, también puede considerarse válida la ley de Hooke ya que para valores bajos de las tensiones, el diagrama $\sigma - \epsilon$ se aproxima bastante a una recta.

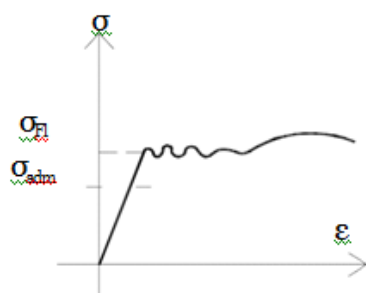


Figura 4.3.32

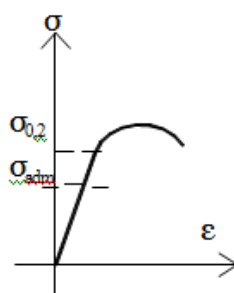


Figura 4.3.33

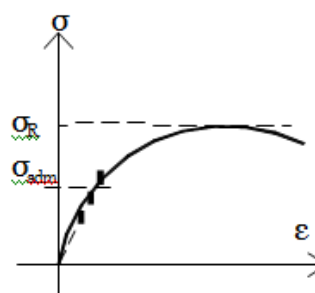


Figura 4.3.34

[4.3.20]

Al criterio utilizado para determinar el valor del coeficiente de seguridad basado en relación de tensiones lo llamaremos criterio elástico. Además de este existe otro al cual lo llamaremos plástico. La denominación utilizada para identificar a cada criterio, está relacionada al método de cálculo empleado para establecer valores de solicitaciones en la

estructura: es decir que un método de cálculo elástico, y método de cálculo plástico.

El coeficiente de seguridad a través del criterio plástico se establece en base a relación de cargas. Entenderemos como máxima carga estructural, el límite del valor de carga que puede soportar una estructura sin dejar de cumplir satisfactoriamente los fines constructivos a que está destinada. En este caso el valor del coeficiente de seguridad viene dado por

$$\sigma P_{\text{real}} = \frac{\text{Máxima Carga Estructural}}{\text{Carga real (Carga Admisible)}} = \frac{P_{\text{tot}}}{P_{\text{trab.}} (P_{\text{adm.}})} \quad [4.3.21]$$

En la materia nos referiremos al coeficiente σ que compara tensiones

4.3.6. ENERGÍA POTENCIAL DE DEFORMACIÓN.

Vamos a analizar el proceso de deformación de un sólido elástico desde el punto de vista energético. Las fuerzas exteriores aplicadas al cuerpo elástico realizan cierto trabajo que designaremos W . Como resultado del trabajo realizado, en el cuerpo se acumula cierta energía potencial U del sólido deformado. Al mismo tiempo, parte del trabajo sirve para transmitir ciertas velocidades a la masa del sólido, es decir, se transforma en energía cinética K . El balance de la energía, en el supuesto que no haya pérdidas por fricción, calor, etc., es el siguiente:

$$W = U + K \quad [4.3.22]$$

Si la carga se aplica lentamente, la velocidad del desplazamiento de las masas del cuerpo será pequeña, con lo que la energía cinética será despreciable, luego:

$$W = U \quad [4.3.22.1]$$

Al descargar el cuerpo, debido a la energía potencial, se realiza cierto trabajo, el necesario para devolver al cuerpo su forma original. En este sentido, un sólido es un acumulador de energía, comportándose como un resorte.

Si consideramos, por ejemplo, el caso de una barra traccionada mediante una fuerza que varía en forma estática, para un valor de carga P' la misma tendrá un desplazamiento δ' . Si a partir de ese instante se realiza un incremento de la carga, el alargamiento δ' tendrá un incremento $d\delta'$. La fuerza P realizará en consecuencia un trabajo,

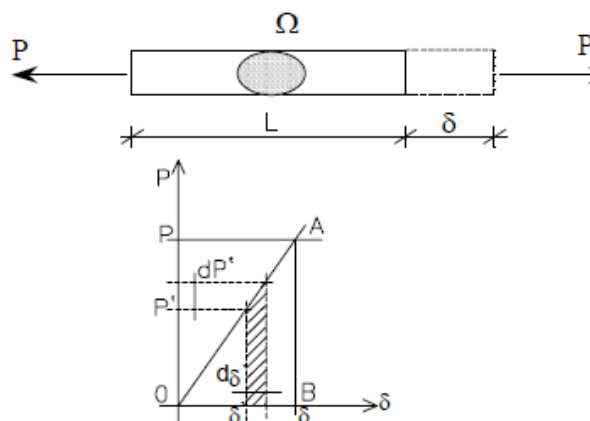


Figura 4.3.34

Energía de deformación acumulada en una barra

el que producirá un incremento de la energía de deformación acumulada.

$$dW = dU = P' d\delta' + \frac{1}{2} dP' d\delta' \quad [4.3.23]$$

Como el término $\frac{1}{2} dP' d\delta'$ tiende a cero por ser infinitésimo de orden superior, podemos afirmar:

$$dW = dU \cong P' d\delta' \quad [4.3.23.1]$$

Para un determinado valor de P, la energía acumulada será:

$$U = \int_0^\delta P' d\delta' = \text{area } OAB = \frac{1}{2} P \delta \quad [4.3.23.2]$$

$$U = \int_0^\delta P d\delta \quad d\delta = d\varepsilon L \quad P = \sigma \Omega$$

$$U = \int_0^\varepsilon \sigma A L d\varepsilon = \Omega L \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon$$

$$w = \frac{U}{Vol} = \int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon$$

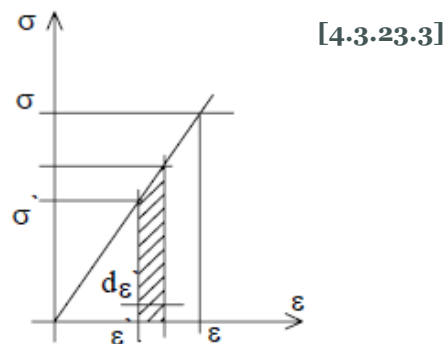


Figura 4.3.35

Podemos ver que la energía de deformación por unidad de volumen resulta ser igual al área encerrada por el diagrama σ - ε .

Si la tensión se encuentra dentro del período lineal elástico:

$$\mu = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon = \frac{1}{2} \frac{\sigma^2}{E} = \frac{1}{2} E \varepsilon^2 \quad [4.3.24]$$

4.4

MECÁNICA DE LA FRACTURA

4.4.1. IMPORTANCIA DE LA MECÁNICA DE LA FRACTURA.

4.4.1.1. CONCEPTO DE MECÁNICA DE LA FRACTURA.

En el mundo del diseño mecánico de componentes es fundamental reconocer la presencia de defectos internos en mayor o menor grado. Estos defectos internos son los que condicionan importantes propiedades de los componentes en servicio, como pueden ser su resistencia última a rotura, su tenacidad o fragilidad, su capacidad de soportar cargas cíclicas (fatiga), su resistencia bajo corrosión, etc.

La disciplina de la Ingeniería Mecánica que se encarga del estudio del comportamiento del material bajo cargas en servicio teniendo en cuenta la presencia de defectos internos se conoce como Mecánica de la Fractura.

Por tanto supone un acercamiento al comportamiento real de los materiales, en contraste con planteamientos más generales como los de la Elasticidad y Resistencia de Materiales, que no cuentan en sus desarrollos teóricos con la presencia interna de defectos o grietas. No se trata simplemente de alcanzar mayor precisión con respecto a los cálculos realizados de forma clásica. Como veremos, en muchas ocasiones la utilización de métodos de diseño basados en la Mecánica de la Fractura es la única forma de realizar un diseño correcto, ya que los resultados pueden diferir radicalmente con respecto a los realizados de forma clásica mediante principios de Resistencia de Materiales.

Sus aplicaciones son numerosas. La más inmediata consiste en relacionar cuantitativamente el nivel de carga aplicada a un componente y el tamaño y posición geométrica de una grieta. También se emplea en fatiga, ya que permite predecir cuánto tiempo será necesario para que una grieta alcance una longitud crítica. Incluso puede predecir en qué condiciones una grieta que progresa rápidamente puede ser detenida. De ahí que las industrias químicas, navales, aeroespaciales, nucleares, etc. tengan en cuenta hoy en día sus principios.

La Mecánica de la Fractura es una disciplina relativamente reciente. Se puede afirmar que comienza a existir como tal con los trabajos de A.A. Griffith en 1921, que permanecieron “olvidados” hasta que en 1948 los planteamientos de G.R. Irwin y E. Orowan provocaron un interés creciente por este enfoque hasta nuestros días.

4.4.1.2. EJEMPLOS HISTÓRICOS DE FALLOS POR FRACTURA.

Es evidente que el interés creciente por la Mecánica de la Fractura surge de la necesidad industrial de resolver problemas relacionados con el fallo mecánico que no podían ser resueltos mediante planteamientos tradicionales. Estos fallos han ocasionado innumerables pérdidas, no sólo económicas, sino también en vidas humanas. Por tanto, todo esfuerzo encaminado a conocer y controlar mejor el proceso que lleva hasta la fractura de un componente está plenamente justificado.

Sirva como ejemplo la siguiente relación histórica de fallos y accidentes:

- 1800-1870** Se registran en Inglaterra 936 explosiones de calderas de vapor, con un total de 1615 muertos y 2097 heridos.
- 1879** Colapso del puente sobre la ensenada del río Tay en Escocia bajo tiempo tormentoso y que provocó la muerte de los 200 ocupantes del tren que lo atravesaba. Causa: se encontraron fallos en los materiales de fundición empleados en el puente. Además no se tuvieron en cuenta correctamente las cargas de viento en la etapa de dimensionado.
- 1875-1905** Unas 500 explosiones de calderas de vapor en Alemania, con 300 muertos.
- 1930** Con la introducción de las uniones soldadas surgen frecuentes fallos en puentes, barcos, calderas, conducciones a presión, etc. Las soldaduras trajeron consigo la presencia de pequeñas grietas locales, que en combinación con las tensiones residuales que generan y los cambios de estructura, dan lugar a una fractura más bien frágil.
- 1944** Rotura de un depósito de gas natural licuado en Cleveland, ocasionando 130 muertos y 300 heridos. Causa: defecto en una soldadura, propagado por fatiga debido a las vibraciones de ferrocarriles y fábricas de estampación de la vecindad. Además, las bajas temperaturas del gas perjudicaron el comportamiento del material.
- 1942-1948** En 970 barcos tipo “Liberty” (construidos en EE.UU. mediante cascos enteramente soldados con grandes paneles para su armada y las de Inglaterra y Canadá) se contabilizaron un total de 5000 grietas, de las cuales 127 implicaron graves daños. 11 de los barcos se partieron en dos mitades de forma casi instantánea mientras navegaban en las frías aguas del Mar del Norte. Causa: Aunque la nueva técnica de fabricación acortaba grandemente los tiempos de entrega, la aparición de grietas en las uniones soldadas dio lugar a procesos de fractura frágil. Muchas empezaron en las esquinas de las escotillas cuadradas de la cubierta. Estas espectaculares consecuencias fueron las que motivaron que el gobierno de los EE.UU. decidiera financiar proyectos de investigación relacionados con la Mecánica de la Fractura. Los estudios que realizó Irwin en 1948 formaron parte de estos proyectos de investigación en el Naval Research Laboratory.
- 1950-1960** Dos aviones británicos de pasajeros “Comet” estallaron en vuelo a gran altitud. Causa: propagación de grieta en el fuselaje a partir de las esquinas de las ventanillas, debido a la presión diferencial.
- 1958, 1969** Fallo de la carcasa del propulsor de un misil “Polaris” y accidente en vuelo de un avión militar F-111. Causa: la presencia de pequeños defectos resultó ser crítica cuando se decidió emplear metales de alta resistencia con el objetivo de ahorrar

peso. Estos fallos introdujeron en los procedimientos de diseño de la U.S. Air Force los principios de “diseño tolerante al fallo”, propio de la Mecánica de la Fractura, que admite la presencia de grietas y evalúa su capacidad de producir el fallo en función de su longitud.

1950, 1962, 1967 Hundimientos de puentes en Quebec, Melbourne y West Virginia

1974 Explosión de una industria química en las proximidades de Flixborough (Inglaterra), causando 28 muertos. Causa: Rotura del material que sujetaba la válvula de seguridad y que provocó la fuga de una mezcla inflamable, desencadenando la explosión.

1979 El petrolero “Kurdistan” se parte en dos en aguas del Atlántico Norte.

1980 Hundimiento de la plataforma petrolífera “Alexander Kielland” frente a las costas noruegas. Sólo pudieron ser rescatados 89 de 212 hombres. Causa: rotura por fatiga de una unión soldada de forma defectuosa.

En 1982 la Administración Federal de los EE.UU. encargó un estudio para cuantificar los costes directos e indirectos ocasionados por los fallos con fractura en el país. Además de las invaluable pérdidas humanas, la cifra ascendía a 120.000 millones de dólares. El estudio afirmaba que aproximadamente un 30% de estos costes podían haber sido ahorrados aplicando las técnicas de Mecánica de la Fractura conocidas en aquel momento.

4.4.1.3. LA MECÁNICA DE LA FRACTURA Y EL DISEÑO MECÁNICO.

Es evidente que la presencia de grietas en un componente de una máquina, vehículo o estructura puede debilitarlo de forma que se produzca la rotura por fractura del mismo. Esto puede ocurrir a tensiones por debajo del límite de fluencia del material, donde dicha rotura no sería de esperar (como sucedió en la mayoría de los ejemplos citados). En estos casos es necesario evaluar la capacidad de daño de dichas grietas mediante técnicas de Mecánica de la Fractura.

Además de las grietas propiamente dichas, algunos tipos de imperfecciones que tienen forma de grieta se pueden convertir en ellas, debiéndose tratar dichas imperfecciones como si fuesen verdaderas grietas. Algunos ejemplos de lo comentado son marcas de mecanizado de gran profundidad en la superficie del componente, huecos en las soldaduras, inclusiones en materiales fundidos y forjados y de laminaciones en materiales compuestos.

A la hora de diseñar un componente, se pueden seleccionar el material y realizar el diseño de forma que el componente sea relativamente tolerante a la existencia de grietas (diseño tolerante al fallo). También se puede realizar diseños que incluyan redundancias de forma de la fractura del un componente no cause un fallo catastrófico de todo el sistema (diseño seguro al fallo). A menudo es necesario realizar inspecciones periódicas, por ejemplo a puentes, aviones, etc., de forma que las grietas no puedan crecer hasta un tamaño peligroso sin ser encontradas y reparadas. Los métodos para inspeccionar grietas no incluyen solamente la simple inspección visual de los componentes, sino métodos más sofisticados como líquidos penetrantes, rayos X o ultrasonidos (en este último método se utilizan las reflexiones de las ondas de sonido de alta frecuencia para descubrir la presencia de grietas). La reparación de las grietas puede consistir, por ejemplo, en mecanizar el extremo de la grieta con el fin de dejar una superficie lisa, o reforzar la zona de la grieta de alguna manera.

A la hora de diseñar un componente en el que se prevé la aparición de grietas se hace imprescindible controlar la fractura. Este control de la fractura consiste en determinar el estado crítico de tensiones y la longitud de grieta que posibilitan que esta crezca muy rápidamente, produciéndose, por tanto, un fallo catastrófico del componente.

La figura siguiente muestra una grieta de longitud $2a$ en una placa sometida a tracción. También se ha representado la relación entre la tensión crítica en función del tamaño de la grieta, es decir aquella tensión que aplicada en los extremos de la placa con una grieta de longitud $2a$ hace que ésta sea crítica, es decir, que produce una fractura rápida del componente.

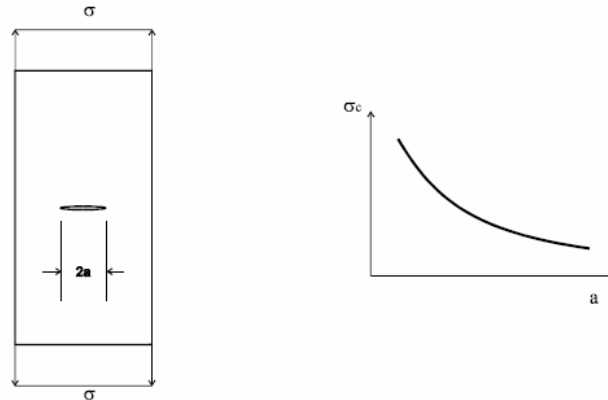


Figura 4.4.1.- Grieta en un aplaca sometida a tracción

A la vista de la gráfica resulta obvio que existe una relación no lineal entre la longitud crítica y la tensión crítica y el fallo depende tanto de la tensión aplicada como de la longitud de la grieta. En definitiva, deberemos encontrar los modelos y propiedades de material que sean capaces de predecir el fallo de un componente debido a la propagación de una grieta existente.

Antes de entrar en los detalles de la Mecánica de la Fractura, es conveniente hacer ciertas observaciones relativas a la naturaleza general de las grietas y sus efectos.

4.4.2. MODOS DE APERTURA DE GRIETA.

Una grieta en un sólido puede estar solicitada en tres modos diferentes, como se ilustra en la figura 1.2. Las tensiones normales dan lugar al Modo I (modo de apertura), donde los desplazamientos de las superficies de la grieta son perpendiculares al plano de la grieta. Las tensiones tangenciales originan los Modos II y III. La superposición de los desplazamientos de estos tres modos define cualquier otro tipo de deformación de la grieta. En general el Modo I es el más crítico en problemas de ingeniería, por lo que nos centraremos fundamentalmente en este caso a lo largo del curso.

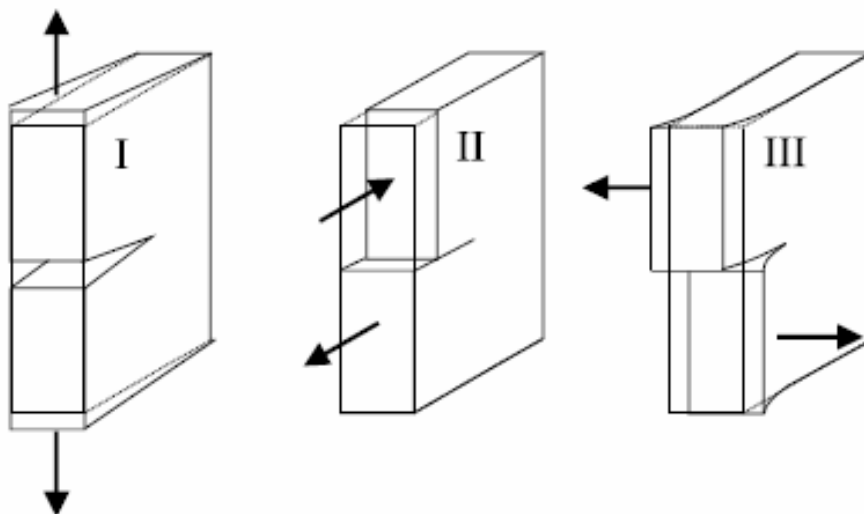


Figura 4.4.2.- Modos de apertura de grieta

4.4.3. MECÁNICA DE LA FRACTURA vs. RESISTENCIA DE MATERIALES.

Como se ha comentado, la metodología de diseño con arreglo a los principios de la Mecánica de la Fractura puede dar lugar a resultados radicalmente diferentes a los que ofrecen las teorías más simplificadas de la Resistencia de Materiales.

Veámoslo con un ejemplo. Supongamos que queremos conocer la máxima tensión σ aplicable a tracción a una placa como la de la figura justo antes de que se inicie el fallo. La placa tiene una anchura $2b$, espesor unidad y contiene una grieta centrada en la placa de longitud $2a$.

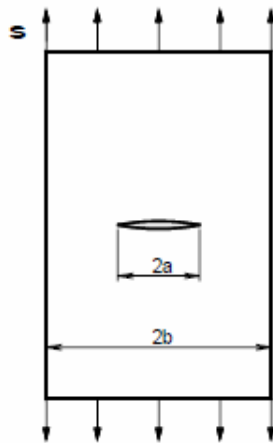


Figura 4.4.3.- Placa de anchura $2b$ con una grieta centrada de longitud $2a$ sometida a una tensión de tracción σ

Planteamiento según Resistencia de Materiales.

Según los principios de Resistencia de Materiales, el fallo se alcanzará cuando la tensión presente en la porción de área neta del plano de la grieta alcance el valor de la tensión de fluencia S_y . La tensión que hay en el área neta (supuesta uniforme, bajo hipótesis de la Resistencia de Materiales) es:

$$\sigma_{\text{neto}} = \frac{\text{Fuerza}}{\text{Área neta}} = \frac{\sigma \cdot (2b - 1)}{(2b - 2a) \cdot 1} = \frac{b \sigma}{b - a} \quad [4.4.1]$$

y el fallo se producirá cuando esta tensión σ_{neto} alcance el valor del límite de fluencia S_y . Por tanto el valor de la tensión aplicada σ que dará lugar al fallo según este criterio para una determinada semilongitud de grieta a será:

$$\sigma = \sigma_{\text{REM}}(a) = \frac{(b - a) S_y}{b} = \left(1 - \frac{a}{b}\right) S_y \quad [4.4.2]$$

Planteamiento según Mecánica de la Fractura.

Como se verá en los temas sucesivos, este planteamiento implica comparar el valor que alcanza un parámetro K con el valor de una constante característica de cada material, conocida como K_c (si se trata del modo I de fractura se habla entonces de K_I y K_{Ic} , respectivamente). Al parámetro K se le conoce como factor de intensidad de tensiones y a K_{Ic} como tenacidad a la fractura. La comparación que se hace entre K y K_c es totalmente análoga a la que se hace entre σ y S_y :

Resistencia de Materiales:	Si $\sigma < S_y$	No hay fallo
Mecánica de la Fractura:	Si $K < K_c$	No hay fallo

El fallo predicho por la Mecánica de la Fractura cuando $K=K_c$ hay que entenderlo como una propagación incontrolada e inestable de grieta que lleva a la rotura total del componente. Además de la tensión aplicada σ , el parámetro K incluye el efecto de la longitud de grieta a . Esta es la gran diferencia: se tiene en cuenta la existencia de defectos internos (grietas). En cuanto al límite K_c , es único para un material dado en unas condiciones dadas, tal y como le ocurre a S_y .

En este ejemplo comparativo se sabe que K_I viene dado por la siguiente expresión:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} F(a, b) \quad [4.4.3]$$

donde $F(a, b)$ es un factor que tiene en cuenta la geometría de la pieza y que en este problema depende de sus dimensiones a través de la función:

$$F(a, b) = \frac{1}{\sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2b}\right)}} \quad [4.4.3.1]$$

El fallo se producirá cuando el parámetro K_I alcance el valor crítico del material K_{Ic} . Por tanto el valor de la tensión aplicada σ que dará lugar al fallo según este criterio para una determinada semilongitud de grieta a será:

$$\sigma = \sigma_{MF}(a) = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a} F(a, b)} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{\pi a}} \sqrt{\cos\left(\frac{\pi a}{2b}\right)} \quad [4.4.3.2]$$

Se representan a continuación los valores de la tensión σ que se puede aplicar en cada uno de estos planteamientos para una determinada semilongitud de grieta a (adimensionalizada por la semianchura de la placa). Para la figura 1.4 se han utilizado los valores de constantes de material $S_y=600$ MPa y $K_{Ic}=200$ MPa \sqrt{m}

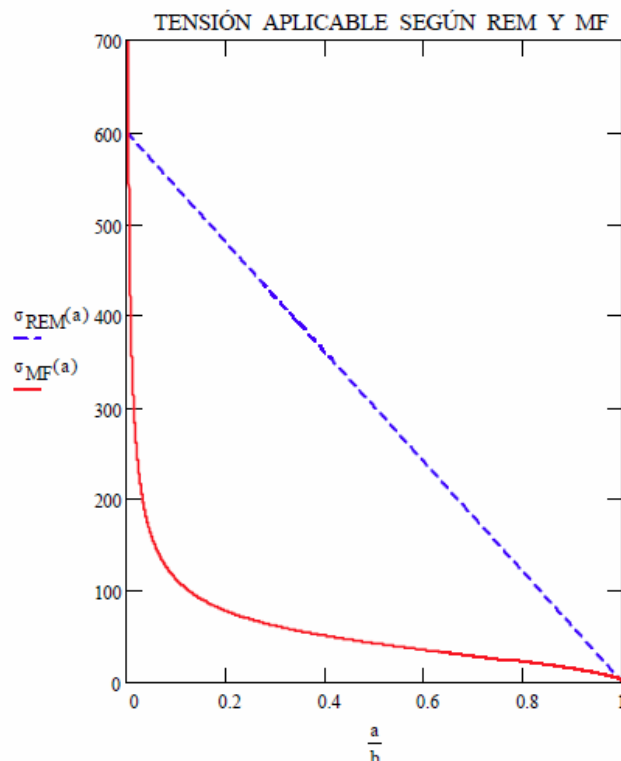


Figura 4.4.4.- Valores que puede tomar la tensión aplicada σ para que no se produzca el fallo según los enfoques de REM y MF

En general, el límite impuesto por la Mecánica de la Fractura es mucho más severo que la simplista teoría de Resistencia de Materiales, ya que la tensión máxima admisible es mucho menor de la que cabría esperar. También se observa que cuando la grieta es casi tan grande como la anchura $2b$ ambas teorías predicen el fallo con muy baja tensión aplicada. Por el contrario, cuando la grieta es prácticamente inexistente, la tensión máxima aplicable es lógicamente S_y , mientras que la teoría de la Mecánica de la Fractura admite tensiones teóricamente infinitas.

4.4.4. LAS GRIETAS COMO CONCENTRADORES DE TENSIONES.

La razón última que explica la diferencia de comportamiento según REM o según MF (ver apartado anterior) radica en que la distribución de tensiones no es en absoluto uniforme en la sección neta del plano que contiene la grieta. El efecto que introduce una grieta en el campo de tensiones de un material es análogo al debido a concentradores de tensiones como agujeros o entallas, sólo que muchísimo más acusado debido a los bajos radios de curvatura de los extremos de grieta.

Estudiemos el efecto del concentrador de tensiones debido a un agujero elíptico (de semiejes c y d) en una placa a tracción. Supondremos que las dimensiones del agujero son pequeñas en comparación con las de la placa y que el eje mayor de la elipse está alineado con la dirección de la tensión nominal aplicada remotamente σ^{nom} . El campo de tensiones remoto uniforme está alterado en las cercanías del agujero como se ilustra en la figura 1.5 (representada para unas proporciones entre semiejes $c/d = 3$)

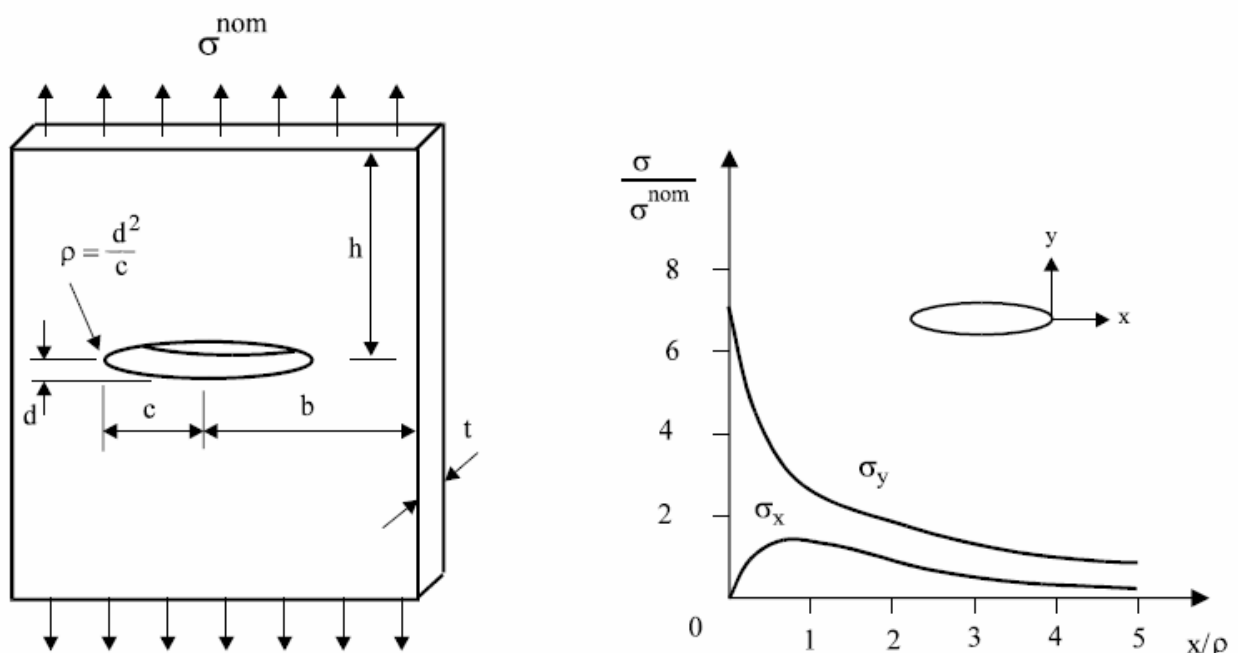


Figura 4.4.5.- Concentrador de tensiones elíptico en una placa sometida a tracción y estado tensional resultante en el plano $y=0$ para un valor $c/d = 3$

El efecto más importante del agujero es en la tensión σ_y , paralela a la tensión nominal aplicada. En el eje x , la tensión σ_y aumenta rápidamente en las cercanías del agujero, alcanzando su valor máximo en la superficie del mismo. Este valor máximo depende de las proporciones de la elipse, y puede expresarse como:

$$\sigma_y = \sigma^{\text{nom}} \left(1 + 2 \frac{c}{d} \right) = \sigma^{\text{nom}} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \right) \quad [4.4.4]$$

Siendo ρ el radio del extremo de la elipse. Podemos definir el factor de concentración de tensiones, k_t , como la relación entre la tensión máxima y la tensión nominal

$$k_t = \frac{\sigma_{y\text{max}}}{\sigma^{\text{nom}}} = 1 + 2 \frac{c}{d} = 1 + 2 \sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad [4.4.4.1]$$

Se observa que para una relación entre semiejes $c/d = 3$, el factor de concentrador de tensiones vale $k_t = 7$. Consideremos ahora una elipse en la que el semieje d se aproxima a cero, de forma que el radio en el extremo ρ también se aproxima a cero (esto corresponde a una grieta ideal). En este caso, la tensión σ_y tiende a infinito, al igual que k_t . Esta elevada concentración de tensiones (teóricamente infinita) es la que explica el daño que provocan las grietas, tanto mayor cuanto más agudo sea su extremo.

4.4.5. COMPORTAMIENTO EN EL ENTORNO DEL EXTREMO DE GRIETA EN MATERIALES REALES.

Una tensión infinita no puede existir en un material real. Si la carga aplicada no es demasiado elevada, el material puede acomodar la existencia de una grieta inicial ideal de forma que la tensión teóricamente infinita se reduzca a un valor finito. En materiales dúctiles, como es el caso de muchos metales, aparecen grandes deformaciones plásticas en las inmediaciones del extremo de grieta. La región en la que el material fluye se denomina zona plástica. La deformación en el extremo de grieta da lugar a un extremo de grieta con un radio de curvatura pequeño (pero no infinitamente pequeño), de forma que el aspecto del extremo de grieta es romo. De este modo, la tensión no tiende a infinito, y la grieta se abre en su extremo una cantidad σ , denominada desplazamiento de apertura de extremo de grieta (CTOD).

En otros tipos de materiales, aparecen comportamientos diferentes, que tienden a reducir la tensión teóricamente infinita modificando el extremo de grieta. En algunos polímeros, se desarrolla una región que contiene huecos alargados con estructura fibrosa que une las caras de la grieta. En materiales frágiles, tal y como los cerámicos, se puede desarrollar una región con una alta densidad de pequeñas grietas.

En todos los casos, el extremo de grieta experimenta una gran deformación y se desarrolla una separación finita en el extremo de grieta. Las tensiones elevadas que deberían existir idealmente en el extremo de grieta, se redistribuyen en una zona mayor. En el extremo de grieta se alcanza un valor finito de la tensión que puede ser resistido por el material, aunque a partir de una cierta distancia del extremo de la grieta, las tensiones son superiores a las correspondientes a la grieta ideal, de forma que se verifique el equilibrio global de cargas (ver figura 1.6, arriba, izquierda).

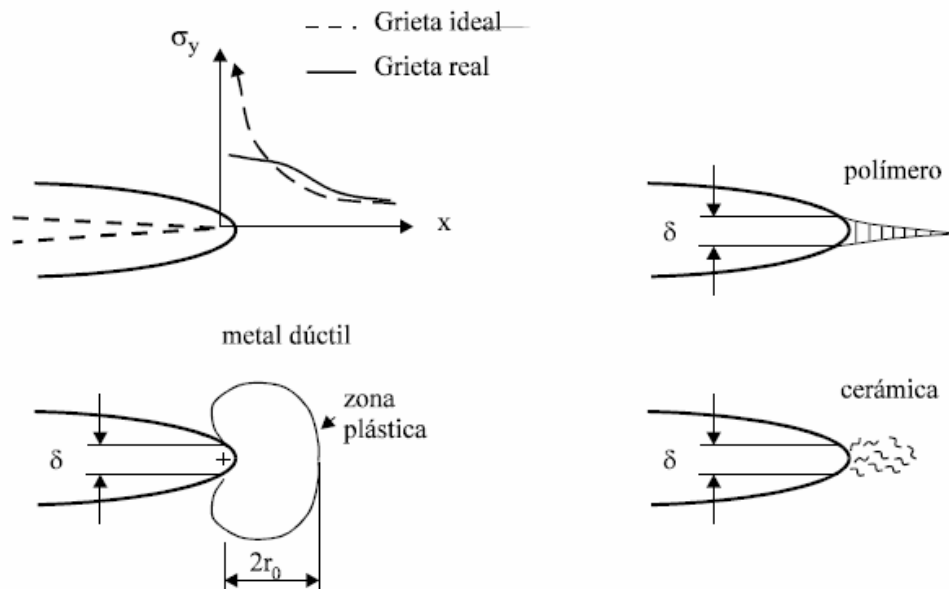


Figura 4.4.6.- No linealidades presentes en el extremo de la grieta

4.4.6. M.F. ELÁSTICO LINEAL Y M.F. ELASTO-PLÁSTICA.

El problema se puede abordar mediante el enfoque de la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal (MFEL) cuando el estado tensional presente en el componente es fundamentalmente elástico. Según las ecuaciones de la MFEL, las tensiones en el extremo de grieta son infinitas. Obviamente, tal y como se ha razonado en el apartado anterior, esto no es posible en la realidad. Por tanto, la MFEL es una aproximación al problema que es válida siempre que el tamaño de la verdadera zona plástica (ignorada por la MFEL) sea suficientemente pequeña en comparación con las dimensiones tanto del componente a estudiar como de la propia grieta.

Esta hipótesis (en inglés, “small scale yielding”) es generalmente aceptable para:

- Los materiales con comportamiento claramente frágil
- La mayoría de los materiales con comportamiento dúctil, siempre que las cargas no sean excesivamente elevadas.

Además los planteamientos de la MFEL son los más simples e históricamente son los primeros que se consideraron (Irwin, 1948).

Sin embargo, cuando la zona de fluencia plástica alrededor del extremo de grieta es suficientemente grande en comparación con las dimensiones de la grieta o del componente, el campo tensional y de deformaciones que predice la MFEL está tan lejos de la realidad que no tiene sentido. Es necesario entonces un planteamiento más complejo del problema, que tenga presente las no linealidades del material. Este enfoque se denomina Mecánica de la Fractura Elasto-Plástica (MFEP) y es necesario siempre que el material se comporte de una manera claramente dúctil bajo cargas suficientemente elevadas, que lleven a grandes zonas del material a niveles de tensiones próximos o iguales al límite S_y (en el supuesto de un estado de carga uniaxial) o bien la frontera de un criterio de fallo conveniente en el caso más general multiaxial. Fue a partir de 1968, con los trabajos de J.R. Rice, cuando la MFEP comenzó a ser considerada como procedimiento de diseño.

Generalmente, los materiales frágiles tienen elevados límites de fluencia y baja tenacidad a la fractura ($S_y \uparrow$, $K_{IC} \downarrow$). La relación entre tensión aplicada σ y longitud de grieta a es en ellos del tipo mostrado en la figura 1.7. Se observa que la llamada longitud de grieta de transición a_t (definida por el punto de cruce entre el valor de S_y y la curva dada por Mecánica de la Fractura a través de la expresión $\sigma = K_{IC} / \sqrt{(\pi a)}$) es prácticamente nula. Este valor de a_t se puede considerar como valor orientativo a partir del cual tiene sentido la aplicación de la MFEL. En definitiva, para materiales frágiles la práctica totalidad del rango de tensiones (hasta valores muy cercanos a S_y) es válida la curva que indica el fallo según la teoría de MFEL.

Sin embargo, para materiales dúctiles ($S_y \downarrow$, $K_{IC} \uparrow$), la curva que indica el fallo según MFEL y la línea que define el valor de S_y se cruzan en un valor de longitud de grieta de transición a_t notablemente mayor que el obtenido para comportamientos frágiles. Esta situación provoca que para tensiones relativamente cercanas a S_y el fallo no pueda ser predicho por la MFEL. Las cruces en la fig. 1.7 dcha. indican precisamente los puntos donde experimentalmente se encuentra el fallo para dicho rango de tensiones. Por tanto, esta zona necesita de otras teorías que expliquen su comportamiento, como lo hace la MFEP.

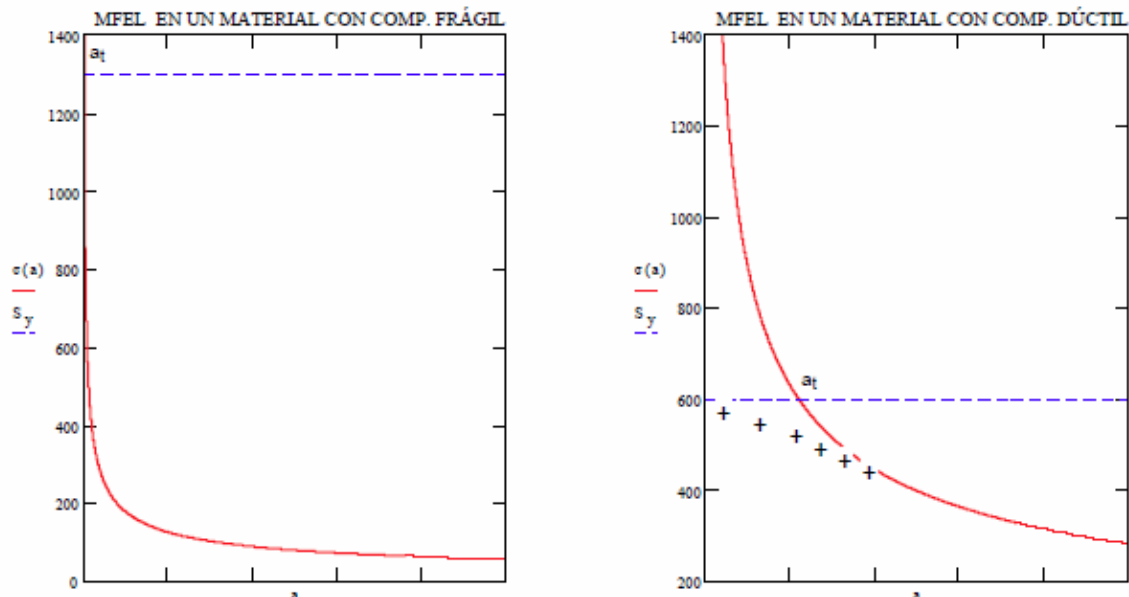


Figura 4.4.7.- Rango de tensiones aplicables en lo que la MFEL es una buena aproximación para comportamiento frágil (izda.) y dúctil (dcha.). Los valores de σ son solo una referencia

En este curso introductorio centraremos nuestro estudio en la MFEL, tanto por su simplicidad como porque muchas de las aplicaciones ingenieriles pueden ser resueltas mediante esta teoría.

4.4.7. LEY DE PARIS.

Los resultados de los estudios de fatiga han mostrado que la vida de un componente estructural puede relacionarse con la velocidad de crecimiento de la grieta. La velocidad de propagación de la grieta es una función del nivel de tensión y de la amplitud de la misma.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad [4.4.7]$$

Dónde:

A y m son constantes para un determinado material

K Factor de intensidad de tensiones

$\frac{da}{dN}$ pendiente de la curva de velocidad de crecimiento

El valor de m normalmente está comprendido entre 1 y 6.

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad [4.4.7.1]$$

o bien

$$\Delta K = Y \Delta \sigma \sqrt{(\pi a)} \quad [4.4.7.2]$$

Desarrollando estas expresiones a partir de gráficas generadas por ellas mismas, se puede llegar a la siguiente ecuación:

$$N_f = \frac{da}{A \pi^{\frac{m}{2}} (\Delta \sigma)^m} \int_{a_0}^{a_c} \frac{1}{Y^m a^{\frac{m}{2}}} da \quad [4.4.7.3]$$

Dónde:

N_f Número de ciclos hasta rotura

Y Parámetro independiente de la longitud de la grieta

m y A Siguen siendo parámetros definidos por el material

a_c Es la longitud crítica de la grieta

a_0 Longitud de grieta inicial

a_c se puede calcular por:

$$a_c = \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma Y \sqrt{\pi}} \right)^2 \quad [4.4.7.4]$$

Dónde:

K_{Ic} Es la tenacidad de fractura de deformaciones planas.

Estas fórmulas fueron generadas por Paul C. Paris en 1961 realizando una gráfica logarítmica log-log de la velocidad de crecimiento de grieta contra el factor de intensidad de tensiones mostrando una relación lineal en la gráfica. Utilizando esta gráfica se pueden realizar predicciones cuantitativas sobre la vida residual de una probeta dado un tamaño de grieta particular. Se encuentra así el comienzo de la iniciación o iniciación rápida de grieta.

Factores que intervienen:

Son diversos los factores que intervienen en un proceso de rotura por fatiga aparte de las tensiones aplicadas. Así pues, el diseño, tratamiento superficial y endurecimiento superficial pueden tener una importancia relativa.

Diseño:

El diseño tiene una influencia grande en la rotura de fatiga. Cualquier discontinuidad geométrica actúa como concentradora de tensiones y es por donde puede nuclear la grieta de fatiga. Cuanto más aguda es la discontinuidad, más severa es la concentración de tensiones.

La probabilidad de rotura por fatiga puede ser reducida evitando estas irregularidades estructurales, o sea, realizando modificaciones en el diseño, eliminando cambios bruscos en el contorno que conduzcan a cantos vivos, por ejemplo, exigiendo superficies redondeadas con radios de curvatura grandes.

Tratamientos superficiales:

En las operaciones de mecanizado, se producen pequeñas rayas y surcos en la superficie de la pieza por acción del corte. Estas marcas limitan la vida a fatiga pues son pequeñas grietas las cuales son mucho más fáciles de aumentar. Mejorando el acabado superficial mediante pulido aumenta la vida a fatiga.

Uno de los métodos más efectivos de aumentar el rendimiento es mediante esfuerzos residuales de compresión dentro de una capa delgada superficial. Cualquier tensión externa de tracción es parcialmente contrarrestada y reducida en magnitud por el esfuerzo residual de compresión. El efecto neto es que la probabilidad de nucleación de la grieta, y por tanto de rotura por fatiga se reduce.

Este proceso se llama «granallado» o «perdigonado». Partículas pequeñas y duras con diámetros del intervalo de 0,1 a 1,0 mm son proyectadas a altas velocidades sobre la superficie a tratar. Esta deformación induce tensiones residuales de compresión.

Endurecimiento superficial:

Es una técnica por la cual se aumenta tanto la dureza superficial como la vida a fatiga de los aceros aleados. Esto se lleva a cabo mediante procesos de carburación y nitruración, en los cuales un componente es expuesto a una atmósfera rica en carbono o en nitrógeno a temperaturas elevadas. Una capa superficial rica en carbono o nitrógeno es introducida por difusión atómica a partir de la fase gaseosa. Esta capa es normalmente de 1mm de profundidad y es más dura que el material del núcleo. La mejora en las propiedades de fatiga proviene del aumento de dureza dentro de la capa, así como de las tensiones residuales de compresión que se originan en el proceso de cementación y nitruración.

Influencia del medio:

El medio puede afectar el comportamiento a fatiga de los materiales. Hay dos tipos de fatiga por el medio: fatiga térmica y fatiga con corrosión.

Fatiga térmica:

La fatiga térmica se induce normalmente a temperaturas elevadas debido a tensiones térmicas fluctuantes; no es necesario que estén presentes tensiones mecánicas de origen externo. La causa de estas tensiones térmicas es la restricción a la dilatación y o contracción que normalmente ocurren en piezas estructurales sometidas a variaciones de temperatura. La magnitud de la tensión térmica resultante debido a un cambio de temperatura depende del coeficiente de dilatación térmica y del módulo de elasticidad. Se rige por la siguiente expresión:

$$\sigma = \alpha_l E \Delta T \quad [4.4-7.5]$$

Dónde:

σ	Tensión térmica
α_l	Coeficiente de dilatación térmica
E	Módulo de elasticidad
ΔT	Incremento de temperatura

Fatiga con corrosión:

La fatiga con corrosión ocurre por acción de una tensión cíclica y ataque químico simultáneo. Lógicamente los medios corrosivos tienen una influencia negativa y reducen la vida a fatiga, incluso la atmósfera normal afecta a algunos materiales. A consecuencia pueden producirse pequeñas fisuras o picaduras que se comportarán como concentradoras de tensiones originando grietas. La de propagación también aumenta en el medio corrosivo puesto que el medio corrosivo también corroerá el interior de la grieta produciendo nuevos concentradores de tensión.

4.5

ELEMENTOS FINITOS

4.5.1.- HISTORIA DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

En esta sección, se presenta un breve resumen de la historia del método de elementos finitos aplicados a resolver la parte estructural y no estructural de la ingeniería aplicada, así como de la fisicomatemática.

El método de elementos finitos por novedoso que parezca, tienen ya varios años en su forma conceptual, ya que podemos recordar las bases del cálculo diferencial e integral propuestos por Sir Isaac Newton por tomar un ejemplo, sin embargo, el desarrollo moderno de esta técnica comienza en 1940, específicamente en el campo de ingeniería estructural, con los trabajos de Hrennikoff [5] en 1941 y McHenry [2] en 1943, quienes propusieron el uso de líneas en una dimensión para representar elementos como barras o vigas para el cálculo de esfuerzos en sólidos con sección transversal continua.

En una investigación publicada en 1943, el Matemático Courant [3], propuso el arreglo para la solución de esfuerzos añadiendo una variación. Después añadió la aplicación del método de funciones interpolares sobre sub-regiones triangulares que conformaban una región entera obteniendo resultados numéricos aproximados. En 1947 Levy [4], desarrolló el método de flexibilidad y fuerza, y en 1953 su trabajo, sugirió la aplicación de un nuevo método (El método de rigidez y desplazamiento), el cual podría ser considerado como una alternativa viable para el análisis estático redundante de estructuras de aeronaves. Sin embargo, sus ecuaciones requerían de una gran dedicación y labor para su solución a mano, por lo que su método de solución numérica, tuvo que esperar el advenimiento de las computadoras digitales de alta velocidad para hacerse popular.

En 1954 Argyris y Kelsey [6] desarrollaron el análisis estructural por medio de matrices empleando por primera vez métodos energéticos. Este desarrollo, marcaría una tendencia y ejemplificaría la importancia que jugaría tiempo después, los principios de análisis energéticos en la evolución de la técnica de elementos finitos.

La primera vez que se trató de analizar cuerpos de 2 dimensiones, fue con los trabajos de Turner et al [8], quien en 1956 logró la implementación de matrices de rigidez para la determinación de armaduras, elementos conformados por vigas y algún otro cuerpo bidimensional conformado por triángulos y rectángulos sometidos a esfuerzo simple. Este

procedimiento, fue comúnmente conocido como “El método directo de rigidez” y se basaba principalmente en obtener una matriz de rigidez de la estructura estudiada. Al mismo tiempo del desarrollo de las computadoras digitales de alta velocidad a finales de los años 50s, trabajos como los de Turner, desarrollaron ecuaciones de rigidez fundadas en el método de elementos finitos para la solución matricial de estructuras. Pero no fue hasta 1960, cuando la frase “Elementos Finitos” fue introducida para describir este tipo de trabajos.

La frase “Elementos Finitos” fue introducida por primera vez por Clough [9], cuando por primera vez se usaron elementos triangulares y rectangulares para el análisis de esfuerzos. La técnica de matriz de rigidez para placa rectangular considerando elementos de flexión, fueron desarrollados por Melosh[10] en 1961. La cual fue seguida por la matriz de rigidez de cáscaras simétricas en los ejes, desarrollada para contenedores de presión en 1963 por Grafton y Strome [11].

Pero fue hasta el año de 1961 cuando Martin [12] extendió los alcances y aplicaciones del método de elementos finitos a problemas tridimensionales con el desarrollo de matrices de rigidez tetraédricas. Trabajos adicionales realizados por Gallagher et al [13] en 1962 y Argyris [15] en 1964, complementaron la técnica de matrices tetraédricas para el caso de estudio de sólidos simétricos en los ejes.

La mayoría de los trabajos desarrollados para la técnica de elementos finitos hasta principios de los 60s, se enfocaron en la modelación matemática de problemas mecánicos que contemplaran únicamente deformaciones elásticas, desplazamientos cortos y concentraciones de esfuerzos bajos, en condiciones de modelación de cargas estáticas y materiales elásticos. Sin embargo, deflexiones de gran magnitud y análisis térmico así como la modelación de materiales no lineales aparecieron hasta 1964, con los trabajos de Gallagher et al [13] quien además de comenzar la modelación matemática de materiales no lineales, también introdujo el concepto de pandeo de columnas en modelaciones matemáticas con elementos finitos. Trabajos como los de Zienkiewicz et al [20] complementaron aun mas la técnica, extendiendo los alcances del método a problemas de involucran visco elasticidad en 1968.

Este nuevo giro que tomó en los 60s el análisis por elementos finitos, tomaba como referencia los trabajos de modelación matemática a través de métodos energéticos, ya que con la finalidad de tener modelos mas confiables, se exploraba la aplicación de estos modelos de energía aplicados ya anteriormente a la mecánica de sólidos, para la determinación de fallas de material como es el criterio de falla Von Misses [30], o también conocido dentro de la literatura como, “Criterio de Máxima Energía de Distorsión”.

A manera de resumen, este criterio de falla de materiales, se basa en la determinación de la energía de distorsión en un material dado, por ejemplo, la energía asociada a los cambios de forma de un material, se contrapone a la energía de los cambios en volumen del mismo.

Por lo que de acuerdo a este criterio, se establece que un determinado componente estructural, será seguro siempre y cuando no se exceda el valor máximo de la energía de distorsión por unidad de volumen, en la que para valores típicos del material, es la energía por unidad de volumen de distorsión, requerida para causar la cedencia en una prueba de tensión al

mismo material.

Con el advenimiento de métodos energéticos en la mecánica de sólidos, también fueron introducidos métodos dinámicos en el análisis convencional por elementos finitos. Tal es el caso de los trabajos de Archer [21] quien en 1965 aplicó el análisis dinámico y desarrolló el uso de matrices de masa consistente, las cuales eran aplicables a sistemas de masa residual distribuida en barras y vigas dentro del análisis estructural. Futuras extensiones al método hicieron posible la adaptación de métodos de peso residual y en 1963, se comenzó a experimentar con el método de elementos finitos ya que se observó que al cambiar las ecuaciones de los nodos e implementar nuevas formulaciones, el método de elementos finitos tenía algunas que otras aplicaciones además de el área de mecánica de los materiales y aplicaciones estructurales. Con los trabajos de Melosh's [14] se exploraron los campos de flujo de fluidos, torsión de flechas y conducción de calor.

Trabajos posteriores como los de Lee [25], encontraron que cuando las formulaciones directas o las variantes a las mismas son difíciles o imposibles de usar, los modelos de masa residual eran apropiados en algunas de las veces. Por ejemplo, en 1977 Lyness et al [27] aplicó el método de masa residual para la determinación de campos magnéticos. En 1976 Belytschko [28] consideró problemas con deformaciones largas, comportamiento dinámico no lineal, y mejoró las técnicas numéricas para la solución de sistemas de ecuaciones, lo que significó un gran avance para la aplicación del método, y ya que a partir de los 80s, con la mejora en el hardware disponible en el mercado, la aplicación del método de elementos finitos, viviría un auge si precedentes. El rápido y evolutivo mundo de la computación, impulsaría a diferentes compañías de software, a incursionar en el desarrollo de este tipo de aplicaciones, ya que el método de elementos finitos, había traspasado las barreras de sus orígenes para análisis estructural y se había adecuado para una infinidad de aplicaciones y ramas de estudio, que van desde la ingeniería de alimentos, pasando por la ingeniería mecánica en la formula uno, la ingeniería aeroespacial, hasta llegar a la simulación de sistemas atmosféricos y predicción del estado del tiempo.

Un relativamente nuevo campo de aplicación del método de elementos finitos es la bioingeniería [29], este campo aun tiene que enfrentar grandes retos al igual que muchos otros campos de estudio en donde se aplica el método, como son la modelación de materiales no lineales, no linealidades geométricas y geometrías complejas y otras dificultades de modelación que aun se están descubriendo. Desde hace ya más de medio siglo (principios de los 50s a la fecha), grandes avances se han hecho en la aplicación de elementos finitos para solucionar complejos problemas de la ingeniería. Ingenieros, Matemáticos y otros científicos sin lugar a duda continuarán desarrollando nuevas aplicaciones para este método en diferentes disciplinas y áreas, ya que la necesidad de productos más confiables, eficientes y optimizados, esta creando una tendencia para el desarrollo de nuevos productos. La industria automotriz, es un ejemplo de la aplicación de estos sistemas de simulación para la optimización del desempeño de vehículos, ya que con la introducción del método de elementos finitos para remplazar las pruebas de colisión de vehículos, han permitido a los diseñadores, reducir costos al poder hacer una infinidad de pruebas a la estructura de los automóviles en una menor cantidad de tiempo, sin siquiera estrellar un solo vehículo, teniendo la certeza que el diseño es confiable y sobre todo, salvaguardando la integridad de los consumidores.



4.5.2.- INTRODUCCIÓN A LA NOTACIÓN MATRICIAL.

La siguiente investigación y por así cumplir con las necesidades de este proyecto, no pretende explicar las bases de la matemática matricial, más bien pretende dar una visión general de algunos conceptos útiles para la cimentación de los conceptos del método de elementos finitos.

Los Métodos matriciales, son una herramienta necesaria cuando se habla del método de elementos finitos, ya que dada la magnitud de ecuaciones que comúnmente se emplean, es necesaria la simplificación de las ecuaciones de los elementos de rigidez y una de sus mas grandes aplicaciones, es sin duda, la programación, ya que para propósitos de la misma, los métodos matemáticos de uso de matrices para la solución de sistemas de ecuaciones dada la simplicidad de su notación y su fácil implementación en algoritmos.

Una matriz, se define como un arreglo rectangular de cantidades, las cuales se disponen en columnas y filas, dichos arreglos de cantidades, son común mente usados para auxiliar en la expresión y solución de sistemas algebraicos de ecuaciones.

4.5.3.- EL PAPEL DE LA COMPUTADORA EN LA SOLUCIÓN DE MATRICES.

Como ya ha sido mencionado anteriormente, a principios de los años 50, los métodos matriciales y su asociación al método de elementos finitos, no estaba listo para la solución de problemas complicados. A pesar de que el método de elementos finitos ya había sido empleado para describir estructuras complejas, las cuales requerían la solución de una gran cantidad de ecuaciones algebraicas asociadas a la modelación del fenómeno empleando dicha técnica para el análisis estructural, la obtención de una solución estructural por medio del método de elementos finitos, se tornaba extremadamente difícil de resolver y por ende, de aplicar, por lo que pese a que la modelación de estructuras y el entendimiento de las matemáticas de estructuras estaba bien cimentado en la descripción del fenómeno físico, el método resultaba impráctico. No fue hasta el advenimiento de la computadora, cuando la solución de miles de ecuaciones en cuestión de minutos se hizo posible.

El desarrollo de la computadora, impulso el desarrollo de nuevas tecnologías de software. Un gran número de programas enfocados a la solución de problemas generales y especiales fueron escritos para la solución de problemas estructurales. Programas como SOLID WORK, ilustraron con elegancia el método de elementos finitos, expandieron sus aplicaciones y sobre todo, reforzaron su entendimiento.

De manera general, para ocupar una computadora, el analista una vez definido el modelo de elementos finitos a estudiar, alimenta el ordenador con la información necesaria para la realización del cálculo.

Esta información puede incluir la posición coordinada de los nodos, la manera en la que se interconectan los nodos, las condiciones de frontera, las fuerzas aplicadas, las restricciones y el tipo de análisis a realizar. De esta información, la computadora genera las ecuaciones necesarias para resolver el sistema y lleva a cabo el análisis.

4.5.4.- ASPECTOS GENERALES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

En esta sección, se presenta de manera general, los pasos a seguir que intervienen durante la formulación y la solución de problemas de ingeniería empleando del método de elementos finitos. Por razones de simplicidad y a forma de una descripción introductoria al lector, los pasos a continuación descritos, solo ejemplifican el caso del análisis estructural, se describirá de forma general, la matemática involucrada en el análisis dinámico y su aplicación al método de elementos finitos. De esta forma, el lector podrá encontrar las analogías de este análisis con problemas estructurales teniendo una idea global del funcionamiento del análisis y el entendimiento de las bases de esta investigación.

Típicamente, para el análisis de un problema estructural de esfuerzos, el ingeniero analista, busca la determinación de esfuerzos y desplazamientos en la estructura estudiada, la cual se encuentra en equilibrio ya que es sometida a cargas determinadas. Para la gran mayoría de los análisis estructurales, es difícil determinar la distribución de deformaciones usando métodos convencionales por lo que el método de elementos finitos entra en escena.

Existen dos acercamientos generales asociados al entendimiento y aplicación del método FEA (Finite Element Method). El primer acercamiento, es llamado el método de FUERZA o FLEXIBILIDAD, el cual se basa en el uso de fuerzas internas como las incógnitas del problema. Para la obtención de las ecuaciones gobernantes, tienen que emplearse primero las ecuaciones de equilibrio. Después es necesario introducir ecuaciones adicionales generadas por las ecuaciones de compatibilidad. El resultado es el arreglo de ecuaciones algebraicas redundantes que determinan las fuerzas internas desconocidas. El segundo acercamiento del método, es el llamado método de DESPLAZAMIENTO, o método de RIGIDEZ, el cual asume el desplazamiento de nodos como las incógnitas del problema.

Por requerimiento del método de RIGIDEZ, se necesita que los elementos estudiados se interconecten por nodos comunes entre sí, a lo largo de un eje común o una superficie común de tal manera que aun después de que la deformación se presente, los nodos permanezcan conectados al nodo común. Las ecuaciones gobernantes son expresadas en términos de desplazamientos nodales usando las ecuaciones de equilibrio en cada nodo, de tal forma que al se pueda aplicar la ley de relaciona la fuerza con los desplazamientos.

Estos dos acercamientos, resultan en dos diferentes incógnitas (fuerzas y desplazamientos) en el análisis y el uso de diferentes matrices asociadas a sus planteamientos (flexibilidad y rigidez). Como ya ha sido mencionado, para aplicación de modelos computacionales a la solución de problemas, el método por matrices de rigidez, es mucho más fácil de implementar ya que el planteamiento del problema es mucho más sencillo. Sin embargo la vasta mayoría de programas de aplicaron general para la solución de problemas estructurales empleando el método de elementos finitos, ha incorporado el planteamientos de desplazamientos para la solución de problemas.

El método de elementos finitos involucra la modelación de una estructura empleando pequeños elementos interconectados llamados elementos finitos. Una función de desplazamiento es asociada a cada elemento. Cada elemento interconectado, esta ligado entre sí, directa o indirectamente a través de interfases comunes, como lo pueden ser: nodos,



superficies comunes, bordes.

Al usar incógnitas de propiedades de materiales en donde se estudie el esfuerzo/deformación, se puede determinar el comportamiento de un nodo determinado en términos de las propiedades de cualquier otro elemento en la estructura.

El arreglo total de ecuaciones, describen el comportamiento de cada nodo en una serie de ecuaciones algebraicas las cuales se expresan en notación matricial para su mejor entendimiento y menos complicada solución.

4.5.5.- MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro, lo que lo hace mucho más simple. Esta simulación, en algunos casos, es casi indispensable debido a que en algunas disciplinas, que utilizan con mayor frecuencia este tipo de metodología como la física, matemáticas o ingeniería, no les es posible obtener soluciones analíticas a partir de expresiones matemáticas.

Una solución analítica es aquella expresión matemática que arroja resultados con determinadas incógnitas que requieren la solución de ecuaciones diferenciales, las cuales debido a su complejidad son imposibles de resolver. Sin embargo gracias a este tipo de metodologías se permite que el problema sea planteado como una serie de ecuaciones algebraicas simultáneas, en lugar de utilizar una resolución a partir de ecuaciones diferenciales complejas.

Actualmente al momento de analizar un elemento mecánico el proceso se puede llevar a cabo mediante la forma clásica o mediante la utilización de un método computarizado de elementos finitos.

La diferencia principal entre el método clásico y el de elementos finitos, es la forma en que éstos perciben la estructura durante el procedimiento para llegar a la solución. Los métodos clásicos consideran la estructura como un continuo, cuyo comportamiento está gobernado por ecuaciones diferenciales ordinarias. El método de los elementos finitos considera a la estructura como un ensamble de pequeñas partículas de tamaño finito. El comportamiento de las partículas y de la estructura global es obtenido formulando un sistema de ecuaciones algebraicas que pueden ser rápidamente resueltas con un computador.

Las partículas de tamaño finito son llamadas elementos finitos o simplemente elementos. Los puntos donde los elementos finitos están interconectados se conocen como nodos o puntos nodales, y el procedimiento de seleccionar los nodos se denomina discretización o modelado.

El método de elementos finitos, es un método numérico generalmente utilizado para la solución de problemas con alto grado de dificultad, ya que involucran geometrías complejas, determinación de propiedades de materiales y cargas no distribuidas. El análisis por elementos finitos es un método computarizado para predecir como un objeto real reaccionará a fuerzas, calor, vibración, flujo de fluidos, fenómenos eléctricos y magnéticos, entre otros. En términos generales se refiere a si éste se romperá, fallará o trabajará como fue diseñado.



El concepto básico de FEA es el dividir el continuo en un número finito de elementos, es decir discretizar el continuo y resolver cada uno de los elementos de las ecuaciones del sistema para después ensamblar la solución total.

Se entiende por discretizar al proceso de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños, a los cuales se les denomina elementos finitos. Estos están interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies que se comportan como volúmenes de control independiente. En el análisis de elementos finitos no se intenta resolver el problema como si fuese una sola pieza, sino por el contrario se subdivide el elemento en un número finito de elementos que a su vez arrojan resultados individuales que como conclusión se fusionan para generar una sola solución.

Dentro de la ingeniería mecánica, las aplicaciones prácticas en la mecánica de sólidos pueden agruparse en dos grandes familias: La de los problemas asociados con sistemas discretos y la de los problemas asociados a sistemas continuos. En los primeros sistemas lo que se analiza esta dividido de forma natural, es decir en elementos claramente definidos. En el segundo caso el sistema no puede ser dividido en forma natural, en unidades simples, por lo que su análisis resulta mucho más complejo, por esta razón es necesario utilizar el método de elemento finito.

El comportamiento mecánico de cada parte o elemento, en los que se subdivide el elemento analizado, queda definido por un número finito de parámetros llamados grados de libertad, asociados al los puntos que en dicho momento se unen al resto de los elementos de su entorno conocidos como nodos. Para definir el comportamiento en el interior de cada elemento se supone que dentro del mismo, todo queda perfectamente definido a partir de lo que sucede en los nodos a través de una adecuada función de interpolación.

Como puede apreciarse, en el método de elementos finitos son casi esenciales los conceptos de discretización o acción de transformar la realidad de la naturaleza continua en un modelo discreto aproximado y de interpolación, o acción de aproximar los valores de una función a partir de su conocimiento en un número discreto de puntos. Por lo tanto este es un método aproximado desde múltiples perspectivas.

Esta presentación aproximada de la realidad en forma de un modelo numérico permite la resolución del problema. Los diversos coeficientes del modelo son automáticamente calculados por el ordenador a partir de la geometría y propiedades físicas de cada elemento. Sin embargo queda en manos del usuario decir hasta que punto la discretización utilizada en el modelo representa adecuadamente el modelo de la estructura.

La desratización correcta depende de diversos factores como son el tipo de información que se desea extraer del modelo o tipo de solicitud aplicada. Actualmente el método de los elementos finitos ha sido generalizado hasta constituir un potente método de cálculo numérico.

4.5.6.- ESTRUCTURA Y FUNCIONES DE UN PROGRAMA DE ELEMENTOS FINITOS.

Un programa de elementos finitos es una pieza compleja de software en la que interactúan numerosas operaciones. Por este motivo suelen estar divididos en segmentos, de los cuales cada uno efectúa una operación determinada. Sin embargo el programa no solamente se limita al cálculo de algoritmos. La generación de los datos y el análisis de los resultados numéricos, que aparecen como producto del cálculo son esenciales para concluir el análisis satisfactoriamente.

Así pues, un paquete de cálculo de elementos finitos consta de un post -procesador, un procesador en el cual se incluye la preparación de datos y se generan los archivos de resultado, y finalmente esta el post-procesador que facilita el análisis e interpretación de los resultados, generalmente en forma de grafica mediante el trazado de curvas, gráficos tridimensionales, tablas, etc.

Uno de los análisis más utilizados es el estático, que permite la determinación de los componentes de los nodos por efecto de una sollicitación estática y, en una segunda fase, la determinación del estado en ciertos puntos característicos de cada elemento. Este tipo de análisis permite acotar la deformación del componente de estudio y localizar zonas altamente sollicitadas o zonas de sollicitación baja.

El análisis dinámico, que dentro de esta investigación no será utilizado, ya que los amortiguadores únicamente serán analizados por el método estático, será explicado únicamente con la finalidad de que el lector comprenda plenamente todos los tipos de análisis que pueden ser generados a partir del MEF. Los tres tipos de análisis dinámico son los siguientes.

- a) Cálculo de las frecuencias y modos propios de vibración: La vibración libre de un cuerpo elástico se realiza en frecuencia y tomando formas que le son características, denominadas frecuencias y modos propios de vibración. El análisis de nodos y frecuencias propias de vibración se realiza con el objetivo de conocer mejor el comportamiento dinámico del componente o estructura y determinar posibles áreas de conflicto, como por ejemplo la generación de resonancia.
- b) Cálculo de la respuesta en función del sistema.: Este tipo de análisis permite determinar la respuesta vibratoria y tencional de una estructura cuando es activada mediante una carga senoidal con amplitud y frecuencia variable.
- c) Cálculo y respuesta a una sollicitación transitoria: En este tipo de análisis se pretende simular el efecto de una secuencia de carga real sobre la estructura, incorporando los efectos dinámicos.
 - Transferencia de calor: Pueden abordarse problemas de conducción, convección o radiación, en un régimen estacionario. Los resultados son básicamente las distribuciones de temperatura y los flujos de calor.
 - Mecánica de fluidos: Pueden ser problemas en el régimen laminar, turbulento, estacionario o transitorios. Los resultados son básicamente las distribuciones de presión y velocidad.

4.5.7.- APLICACIONES PARA EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

Como se mencionó brevemente al inicio de este capítulo, el método de elementos finitos puede ser utilizado en infinitud de disciplinas debido a que puede determinar cualquier tipo de incógnitas.

En el campo de la ingeniería, específicamente en la mecánica, existen diferentes aplicaciones del método de elementos finitos, que van desde la simulación de flujo de fluidos, el análisis de esfuerzos estructurales, la transferencia de calor y el análisis de multi- fenómeno para la determinación de secuencias mecánicas.

Cabe aclarar que el área de elementos finitos es un campo que está en continuo desarrollo, por lo que día con día, investigadores de diferentes partes del mundo están creando nuevas aplicaciones que vuelven mucho más eficiente el método y a la vez se les ofrecen mucho más ventajas a los usuarios.

Dentro de esta investigación de tesis el análisis se enfocó a lo estructural, ya que el propósito era encontrar los esfuerzos y deformaciones que sufrían los tres amortiguadores puestos a prueba. De esta manera sería mucho más sencillo poder elegir el más adecuado para ser colocado en la aeronave que competirá en SAE Aero Design y así poder lograr que su desempeño fuera el óptimo.

Es bien sabido que una de las leyes que explica claramente este fenómeno es la Ley de Hooke o también conocida como Ley de elasticidad. La ley de Hooke describe fenómenos elásticos como los que exhiben los resortes.

Esta ley afirma que la deformación elástica que sufre un cuerpo es proporcional a la fuerza que produce tal deformación, siempre y cuando no se sobrepase el límite de elasticidad. En la constante de fuerza de un resorte se encuentra experimentalmente la relación funcional entre el periodo de oscilación y la masa, en un sistema masa – resorte. La fuerza recuperadora del resorte es proporcional a la elongación y de signo contrario (la fuerza de deformación se ejerce hacia la derecha y la recuperadora hacia la izquierda). La expresión de la ley es:

$$F = -F = K\Delta x. \quad [4.5.1]$$

F y Δx son vectores de la misma dirección y sentido opuesto.
La fuerza que ejerce para estirarlo es: $F = K\Delta x$.

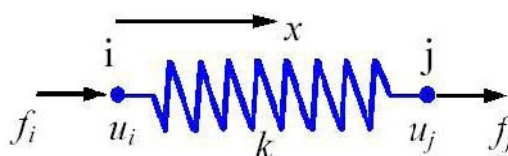


Figura 4.5.1.- Resorte que representa la Ley de Hooke.

4.5.8.- PASOS PARA EL ANÁLISIS POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN SOLID WORK.

Hoy en día quienes utilizan el análisis por elementos finitos hablan de tres grandes actividades que envuelven todo el proceso las cuales son: Pre-procesamiento, procesamiento y post-procesamiento. En la tabla siguiente se explica de manera clara el desarrollo de estos tres procesos.

Pre- procesamiento	Procesamiento	Post-procesamiento
SuperDraw <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Construcción de la geometría (también se puede importar) <input type="checkbox"/> Adición de condiciones de frontera <input type="checkbox"/> Adición de cargas Decorer <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Entrada de las propiedades del material. <input type="checkbox"/> Definición del tipo de elemento y adición de sus propiedades (espesor, etc.) 	<ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Cálculos (dependiendo del tipo de análisis, Algor utilizara diferentes procesadores; para análisis estático se utiliza el SSAP0) 	SuperView <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Se chequea la geometría del modelo. <input type="checkbox"/> Se verifican condiciones de frontera. <input type="checkbox"/> Se revisan las cargas Se analizan los resultados: <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Esfuerzos <input type="checkbox"/> Desplazamientos <input type="checkbox"/> Temperaturas

Figura 4.5.1.-Tabla Proceso de Análisis.

En realidad el método por elementos finitos involucra durante todo el proceso de análisis siete pasos distintos dentro de los cuales solamente cinco, 1-2-4-5-7, requieren de la toma de decisiones por parte del usuario, puesto que los dos restantes son automáticamente desarrollados por el software comercialmente conocido como Solid work.. A continuación se explicarán cada

uno de estos cinco pasos para lograr una mejor comprensión del método.

4.5.8.1.- DISCRETIZAR O MODELAR LA ESTRUCTURA.

La estructura es dividida en elementos finitos. Este paso se efectúa en el pre-procesador cual ayuda al usuario a crear el mallado. Este es uno de los pasos más importantes y cruciales para determinar la exactitud de la solución del problema.

Discretización, es el proceso de modelación de un cuerpo que consiste en la división equivalente del mismo, en un sistema conformado por cuerpos más pequeños (elementos finitos) interconectados por medio de puntos comunes o nodos, los cuales forman superficies y se



comportan como volúmenes de control independientes, los que a su vez son afectados por las condiciones de frontera que afecten al cuerpo estudiado como un todo. Durante la aplicación del método de elementos finitos, en lugar de intentar resolver el problema como un todo en una sola operación, se divide el cuerpo del problema en un número finito de elementos, los cuales a su vez se resuelven simultáneamente y se obtienen el resultado de un todo conformado por cada resultado arrojado por los elementos finitos.

4.5.8.2.- DEFINICIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS.

En este paso el usuario debe definir las propiedades de los elementos y seleccionar el tipo de elemento que es el más apropiado para modelar el sistema físico.

4.5.8.3.- ENSAMBLE DE LAS MATRICES DE RIGIDEZ.

La matriz de rigidez de un elemento consiste de coeficiente que pueden ser derivados a partir del equilibrio, del método de energía o de otro. La matriz de rigidez del elemento relaciona los desplazamientos nodales a las fuerzas aplicadas en los nodos. El ensamble de las matrices de rigidez de los elementos implica la aplicación de equilibrio para la estructura completa.

4.5.8.4.- APLICACIÓN DE CARGAS.

En este paso se deben suministrar todas las cargas que son aplicadas exteriormente, estas cargas pueden ser concentradas, distribuidas, momentos, etc.

4.5.8.5.- DEFINICIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA.

Deben proveerse las condiciones de soporte, es decir, algunos desplazamientos nodales deben ser colocados en valores conocidos.

4.5.8.6.- SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES ALGEBRAICAS LINEALES.

La aplicación secuencial de los pasos mencionados hasta aquí conduce a un sistema simultáneo de ecuaciones algebraicas donde las incógnitas son los desplazamientos.

4.5.8.7.- CÁLCULO DE LOS ESFUERZOS.

Además de los esfuerzos, el programa puede calcular las reacciones, modos, vibraciones u otra información pertinente. El post-procesador se utiliza para visualizar gráficamente los resultados.

