

# PROPUESTA DE DISEÑO DE DISPOSITIVO PARA ENSAYAR UNIONES REMACHADAS

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO.

Autor: Adrián Cardet González

Tutores: M.Sc. Pavel Michel Almaguer Zaldívar

M.Sc. José A. Martínez Grave de Peralta

HOLGUÍN, 2020



## PENSAMIENTO

*“Y hubo un día que comprendí que mi único enemigo era yo mismo. Ese día fue cuando empecé a ganar todas mis batallas.”*

*Diego Montoya.*



**DEDICATORIA:**

A mis hijos que son el motor impulsor de cada paso que doy en la vida para que les sirva de ejemplo en un futuro.



## **AGRADECIMIENTOS**

A mis compañeros de estudio, a todos y cada uno de los profesores, a mi familia y amigos, en fin a todos y cada uno de los que de una forma u otra me han ayudado a llegar a este momento tan importante en mi vida.



## RESUMEN

El presente trabajo aborda la propuesta de un dispositivo para el ensayo de uniones remachadas que será instalado en la máquina universal DNS 200, ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales del Departamento de Mecánica Aplicada de la Universidad de Holguín, que tiene amplias posibilidades de realizar diferentes tipos de ensayos.

En el primer capítulo se analizan tanto las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en ingeniería como las diferentes sollicitaciones a que trabajan los mismos. Para luego pasar a estudiar la sollicitación objeto de nuestra investigación: el cortante. Siendo un elemento típico de elementos que se encuentran sometidos a dicha sollicitación las uniones remachadas. De aquí que la investigación centre el estudio de las mismas. Se realiza una búsqueda de las principales máquinas y dispositivos utilizados en el mundo para estudiar esta sollicitación.

En el segundo capítulo se propone el modelo geométrico del dispositivo diseñado y se realizan los cálculos de comprobación estructural del mismo. Para el diseño se utiliza el software SolidWork 2016 así como el módulo del Simulation para el cálculo por el Método de los Elementos Finitos de la determinación de las tensiones, deformaciones y desplazamientos que actuarán en el dispositivo. Este trabajo requiere de un elevado grado de precisión y exactitud que garantice una correcta utilización y empleo de los recursos técnicos y materiales necesarios para su fabricación.



## **ABSTRACT**

The present work addresses the proposal of a device for testing riveted joints that will be installed in the DNS 200 universal machine, located in the Materials Resistance laboratory of the Department of Applied Mechanics of the University of Holguín, which has wide possibilities of performing different types of trials.

In the first chapter, both the mechanical properties of the materials used in engineering and the different stresses they work on are analyzed. To then go on to study the solicitation object of our research: the shear. Riveted joints being a typical element of elements that are subjected to said stress. Hence, the research focuses on the study of them. A search is made of the main machines and devices used in the world to study this request.

In the second chapter, the geometric model of the designed device is proposed and its structural verification calculations are carried out. For the design, SolidWork 2016 software is used as well as the Simulation module for the calculation by the Finite Element Method of the determination of the stresses, deformations and displacements that will act on the device. This work requires a high degree of precision and accuracy that guarantees a correct use and use of the technical and material resources necessary for its manufacture.



## ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.....	6
1.1 Introducción al capítulo. ....	6
1.2 La experimentación para el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales ingenieriles. ....	7
1.3 Tipos de solicitaciones. ....	8
1.3.1. Tracción- compresión.....	8
1.3.2. Flexión.....	14
1.3.3. Pandeo.....	15
1.3.4. Plastodeformación y a la fatiga. ....	17
1.3.5. Choques o impactos.....	18
1.3.6. Torsión. ....	22
1.3.7. Cortante.....	24
1.4. Uniones remachadas. ....	26
1.4.1. Tipos de remaches.....	28
1.4.2. Tipos de fallos en uniones remachadas ....	29
1.4.3. Cálculo de los remaches a carga axial.....	30
1.5. Máquinas para ensayar uniones remachadas utilizadas en el mundo. ....	32
1.6. Diseño asistido por computadora (CAD). ....	36
1.7. El Método de los Elementos Finitos para el cálculo de elementos estructurales. ...	37
1.7.1 Aplicaciones del método de los Elementos Finitos en el análisisestructural. (Pérez Arbella, O. (2018))......	38
CAPÍTULO 2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EL ENSAYO DE JUNTAS REMACHADAS. ....	41
2.1 Introducción al capítulo ....	41
2.2 Dispositivo para ensayar de uniones remachadas.....	41
2.3. Caracterización del material.....	42
2.4. Simulación del comportamiento del dispositivo. ....	43
2.5. Modelo geométrico del dispositivo ....	43
2.6. Mallado del modelo ....	45
2.7. Cargas y restricciones.....	47
2.8. Estado tensional–deformacional del dispositivo.....	48



CONCLUSIONES.....54  
RECOMENDACIONES .....55  
BIBLIOGRAFÍA.....56  
ANEXOS.....59



## INTRODUCCIÓN

Las investigaciones han sido el motor impulsor para el desarrollo de la ciencia y la tecnología desde el surgimiento del hombre, ante la necesidad de lograr una sociedad cada vez más desarrollada. En la actualidad estas se requieren para los fóruns de ciencia y técnica, así como en los trabajos que se realizan en el campo del diseño y fabricación de piezas, partes y equipos. Es imprescindible que se fabrique buscando la forma más económica y con la mayor calidad, con el objetivo de disminuir los costos y aumentar la productividad, a partir de realizar profundamente el estudio de las propiedades mecánicas de materiales de cada pieza o elemento que se elabore.

La industria mecánica se caracteriza mundialmente por fabricar con calidad, fiabilidad y eficiencia, ya que el ingeniero debe analizar los aspectos técnico-económicos para determinar la factibilidad de fabricación, así como los procedimientos y materiales a emplear en caso de ser factible dicha fabricación. Para efectuar dicho análisis se debe recurrir a sus conocimientos de mecánica, metalurgia, procesos tecnológicos, intercambiabilidad y resistencia de materiales, entre otros, así como a técnicas de evaluación económica; constituye un aspecto importante dentro de este proceso el estudio metalográfico de la estructura de los materiales metálicos utilizados para la fabricación de piezas y equipos, así como en su reacondicionamiento.

Todos los sólidos, en una u otra medida, tienen las propiedades de resistencia y rigidez, o sea, dentro de ciertos límites son capaces, sin romperse y sin sufrir grandes variaciones en sus dimensiones geométricas, de resistir cargas.

Las diversas estructuras y máquinas, de cuyo diseño y construcción se ocupa el ingeniero mecánico en su actividad práctica, deben tener, entre otras, la propiedad de Resistencia Mecánica, es decir, deben oponerse a la rotura al ser sometidos a la acción de fuerzas externas (cargas) .

Con este propósito, los elementos o piezas de máquinas deberán ser fabricados del material adecuado y que cumplan con las condiciones de resistencia para las distintas sollicitaciones a que se someten.

Además de esto, en muchos casos, es necesario determinar las variaciones de la forma y de las dimensiones (deformaciones), que surgen en los elementos de las construcciones sometidas a cargas.



Generalmente casi el 95 % de las piezas de elementos mecánicos están contruidos de aceros aleados, hierro fundido y materiales no ferrosos, por lo tanto, es necesario realizarles estudios metalográficos y ensayos de resistencia como compresión, tracción, flexión, cizallamiento, punzonado y otros.

Las características mecánicas necesarias para los elementos estructurales se obtienen generalmente de las especificaciones del fabricante, de manuales o de ensayos destructivos que requieren de determinada cantidad de material, el que queda inhabilitado después para ser usado nuevamente. En el caso de que estas propiedades se tomen de los datos del proveedor o de manuales, es necesario tener en cuenta que estos valores responden a las estadísticas de ensayos realizados a probetas del material que pueden presentar diferentes características que el material que se esté usando para los ensayos.

Por otro lado, se han realizado investigaciones para correlacionar los ensayos no destructivos (END) con las propiedades mecánicas de los materiales, pero los resultados responden a apreciaciones cualitativas. Los END son muy efectivos para la búsqueda y caracterización de defectos y fisuras, pero no para predecir la vida útil que le queda al elemento estructural, para ello se necesita caracterizar el comportamiento en servicio del material. En este sentido el SPT se presenta como una gran opción.

En todo tipo de construcción metálica, y más concretamente en el caso de las estructuras metálicas de edificación resulta necesario enlazar entre si perfiles simples para formar barras compuestas, como también es necesario fijar las barras, ya sean simples o compuestas, en su posición definitiva dentro del conjunto de la construcción. Denominamos uniones, o costuras de fuerza, a las que tienen por misión fundamental la transmisión de cargas de un perfil a otro, o de una barra a otra, y uniones o costuras de simple acoplamiento a aquellas cuya misión principal es la de mantener unidos entre si los perfiles que forman una barra compuesta.

Los empalmes empleados en las uniones de barras o perfiles en prolongación se consideran, a todos los efectos, como uniones de fuerza. Cualquier unión es siempre un punto delicado en una estructura metálica y por ello es necesario preverlas todas en el proyecto, no autorizando durante su ejecución más empalmes y uniones que aquellos que se especifiquen, y en los sitios que se hayan definido. Como es natural, esta recomendación es fundamental para los empalmes, ya que las uniones entre barras, dan



lugar a los nudos y estos siempre deben tener una situación clara y perfectamente definida.

Debido a que hemos definido las uniones como puntos críticos de una estructura, su número debe reducirse al mínimo necesario, así como tratar de ejecutarlas con toda clase de garantías.

Cuando se dispongan empalmes de barras, que en general deben evitarse, salvo que sean necesarios y estén previstos en el proyecto, los elementos y medios de unión que hayan de constituir dicho empalme se tienen que dimensionar para que resistan el esfuerzo que ha de transmitirse a través de la unión, o bien para que puedan transmitir el esfuerzo máximo que la sección de la pieza empalmada puede aceptar en tal punto. En general, en los empalmes, cuando los cubrejuntas o elementos análogos posean, como mínimo, los mismos valores estáticos que la barra empalmada, no se hace necesaria la comprobación del empalme en cuanto a tales elementos se refiere, aunque sí es necesario comprobar los medios de unión en sí.

Las uniones tienen, dentro de los proyectos de las construcciones metálicas, especial importancia y dificultad. Cualquier unión es una zona particularmente peligrosa y la mayoría de los accidentes son debidos a uniones mal proyectadas o mal ejecutadas.

Para lograr un buen diseño es imprescindible un gran dominio de los conocimientos que aporta al ingeniero la resistencia de los materiales y a la vez es muy importante para esto la realización de las prácticas de laboratorio en nuestra universidad existen grandes problemas con el aseguramiento material debido a la situación económica por la que atraviesa nuestro país.

**Situación problemática:** El laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín no cuenta con los recursos necesarios para realizar todos los ensayos mecánicos que favorezcan el proceso de enseñanza y aprendizaje de los estudiantes.

En este trabajo se estudia la posibilidad de diseñar un dispositivo para el ensayo de uniones remachadas, lo que aumenta la gama de experimentos que se pueden realizar.

Los elementos abordados justifican la realización de la investigación, la que se lleva a cabo a partir del siguiente **Problema de Investigación:** La no existencia de un dispositivo



para el ensayo de uniones remachadas en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín.

Esta se realiza teniendo como **Objeto de estudio:** uniones remachadas, y como **Campo de acción:** Dispositivo para realizar ensayos de uniones remachadas en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín.

La investigación se dirige hacia el siguiente **Objetivo general:** Diseñar y construir un dispositivo para ensayo de uniones remachadas.

Se plantea la siguiente **Hipótesis:** Si se logra la propuesta de diseño y la fabricación del dispositivo de ensayo de uniones remachadas, entonces se podrán efectuar ensayos a cortante en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín, lo que permite aumentar la cantidad de prácticas de laboratorio en la asignatura Resistencia de Materiales e incrementar el nivel cognoscitivo de los estudiantes.

Para el cumplimiento del objetivo se planifican y ejecutan las siguientes **Tareas de Investigación:**

1. Estudio bibliográfico sobre el diseño y fabricación de piezas y ensayos.
2. Estudio de las características mecánicas de los materiales utilizados
3. Elaborar propuesta del dispositivo para ensayo de uniones remachadas.
4. Fabricar el dispositivo para ensayo de uniones remachadas.
5. Simular el comportamiento del dispositivo ante las cargas aplicadas.
6. Elaborar el informe del trabajo de diploma.

Para la ejecución de las tareas, durante la investigación se utilizaron los **Métodos** siguientes:

#### **Métodos empíricos:**

**Observación:** Para obtener el conocimiento del comportamiento del objeto de la investigación y acceder a la información directa e inmediata durante el análisis de diferentes tipos de dispositivos.

**Consulta con expertos:** Se consultaron a diferentes especialistas en tecnologías de fabricación antes de asumir el diseño del dispositivo a fabricar, con la finalidad de mejorar su funcionamiento.

**Medición:** Se utilizaron diferentes instrumentos de medición, entre los que se encuentran el pie de rey y el micrómetro, para realizar el dimensionamiento del dispositivo.



**Métodos teóricos:**

**Análisis y Síntesis:** Mediante la determinación de los elementos necesarios obtenidos en cada una de estas fuentes bibliográficas consultadas, se elaboró la conceptualización necesaria para trabajar en el desarrollo del marco teórico y del trabajo.

**Histórico y Lógico:** Para el estudio del objeto a través del tiempo y llegar a un análisis lógico de la vía más eficiente para que el trabajo cumpla los objetivos propuestos.

**Resultados esperados:**

Con la realización del presente trabajo se podrá contar con un dispositivo para realizar ensayo de uniones remachadas, con el fin de lograr aumentar la cantidad de experimentos y la caracterización del comportamiento de los materiales utilizados en este tipo de ensayo

**Novedad:** Por primera vez se contará con un dispositivo capaz de lograr ensayos de uniones remachadas en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad de Holguín.



# **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA DE LA INVESTIGACIÓN.**

## **1.1 Introducción al capítulo.**

En el presente capítulo se analizan tanto las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en ingeniería como las diferentes solicitaciones a que trabajan los mismos. Para luego pasar a estudiar la solicitación objeto de nuestra investigación: el cortante.

Un elemento típico de elementos que se encuentran sometidos a dicha solicitación son las uniones remachadas. De aquí que la investigación centre el estudio de las mismas.

Definiéndose que los medios de unión han marcado, de manera importante, el avance que ha experimentado la construcción de estructuras metálicas desde que se empezó a utilizar el acero laminado en 1856 hasta nuestros días.

El primer medio de enlace que aparece es el roblón, elemento que trabaja a cortadura y aplastamiento. En la actualidad es muy raro, por no decir que imposible, encontrar esta técnica de unión en construcción de estructuras. Ha quedado apartada a causa de los inconvenientes que presenta; mala distribución tensional en la junta, mal aprovechamiento de los materiales en piezas traccionadas, poca seguridad de rigidez en las uniones, ya que los roblones pueden quedar "suelos" e imposibilidad de realizar un cálculo exacto, así como medios de construcción costosos. Tras los roblones se desarrollaron las uniones mediante los tornillos, en sus modalidades de tornillos ordinarios y calibrados. Su finalidad fundamental era obtener uniones desmontables. Sus inconvenientes son análogos a los de las uniones roblonadas y, por tanto, su empleo no es muy extenso en edificación, donde se buscan uniones estructurales permanentes.

Luego se hace una revisión de las principales máquinas y dispositivos para ensayar uniones remachadas más utilizados en el mundo.

Por último se analiza el Diseño Asistido por Computadora (CAD) como herramienta de apoyo al diseño de máquinas y equipos y dentro de estas herramientas específicamente el Método de Elementos Finitos, método que le permite al diseñador reducir significativamente el tiempo que invierte en el análisis, además de optimizar los resultados finales.



## 1.2 La experimentación para el estudio de las propiedades mecánicas de los materiales ingenieriles.

Todos los sólidos en una gran medida tienen las propiedades de resistencia y rigidez, o sea que, dentro de ciertos límites son capaces, sin romperse, de resistir cargas sin sufrir grandes variaciones en sus dimensiones geométricas.

La Resistencia de Materiales puede considerarse como una rama de la mecánica llamada Mecánica de los Sólidos deformables, este a su vez abarca también otras ciencias como la teoría matemática de la elasticidad, que estudia los mismos problemas que la Resistencia de Materiales, pero con la diferencia esencial, en la manera de enfocar el problema; la Teoría Matemática de la Elasticidad exige un aparato matemático muy complicado, para estudiar de una manera más rigurosa y exacta el comportamiento de los sólidos deformables. Por su parte la Resistencia de Materiales tiene como fin la elaboración de métodos prácticos de cálculo de los elementos típicos de las estructuras.

La Resistencia de Materiales es la ciencia que trata de la resistencia y de la rigidez de los elementos de las estructuras. Mediante los métodos en ella estudiados podemos determinar las dimensiones de los elementos de las máquinas y de distintos tipos de estructuras para que resistan las acciones externas a que están sometidas. Según el tiempo de aplicación de las cargas que actúan sobre los elementos se pueden clasificar como:

- Estáticas.
- Dinámicas.
- Móviles.
- Impacto.

Esta clasificación se refiere al estado de reposo o movimiento en que se encuentra la carga cuando actúa.

Son **Cargas Estáticas** aquellas que actúan sobre los elementos resistentes sin variar su estado de reposo o variando lentamente en el transcurso del tiempo. Tal es el caso del peso propio de los elementos constructivos, las personas en oficinas o viviendas, el público en sala de espectáculos, etc.

Son **Cargas Dinámicas** las que varían rápidamente en el tiempo y en todos los casos, actúan en estado de movimiento. Muchas máquinas y partes de ellas están sometidas



comúnmente a estas cargas; un tipo importante de carga dinámica es aquel en que la carga se aplica súbitamente como en el caso del impacto de una masa en movimiento.

Serán **Cargas Móviles**, aquellas cuya dirección de movimiento no coincide con la dirección de acción de la misma, como es el caso de un vehículo recorriendo un puente, o un puente grúa desplazándose sobre la viga de apoyo (viga carrilera).

Serán **Cargas de Impacto**, aquellas cuya dirección de movimiento coincide con la acción de la misma, como es el caso de un martinete, que se deja caer a una determinada altura sobre un pilote o pilotín para que este pueda hincarse en el terreno. Su tiempo de aplicación es muy breve (instantáneo), semejante a un vehículo chocando contra una estructura o el público que salta en las gradas de un estadio.

En todos estos casos se necesita conocer la respuesta de los materiales a la acción de las mismas. La manera más común de conocer esta respuesta es mediante la realización de ensayos mecánicos que modelen la acción real de las cargas. Estos ensayos son posibles dividirlos en ensayos destructivos y no destructivos.

### **Ensayos destructivos.**

El ensayo mecánico a materiales se realiza con el fin de determinar las propiedades mecánicas del material. Al mismo tiempo puede realizarse para evaluar la resistencia ante estados tensionales complejos. El ensayo a materiales se realiza con probetas cuyas dimensiones y formas pueden variar según los aparatos de medición disponibles y según las condiciones de los ensayos. Los ensayos destructivos permiten conocer las distintas propiedades del material a la sollicitación a la que están sometidos. Como su nombre lo indica en ellos se destruye la probeta o la muestra ensayada.

Entre estos ensayos podemos citar los de tracción, compresión, cortante, flexión, fatiga, pandeo y otros más.

### **1.3 Tipos de sollicitaciones.**

#### **1.3.1. Tracción- compresión.**

Las deformaciones elásticas se caracterizan porque las mismas desaparecen completamente si se elimina las cargas que las produjeron. En otras palabras, un cuerpo deformado elásticamente recupera totalmente su forma original cuando es descargado. Por otra parte, las deformaciones elásticas son reversibles, es decir las mismas dependen únicamente de las tensiones actuantes, siendo independientes de la historia de la



deformación. Por el contrario, si un cuerpo experimenta deformaciones irreversibles, decimos que las mismas son inelásticas. En particular, si como consecuencia de la deformación irreversible resultan deformaciones permanentes una vez removida la carga, se dice que el cuerpo ha sufrido deformación plástica. (Tracción, compresión. Luis A. de Vedia, Hernán Svoboda).

Muchos de los aspectos básicos de la plasticidad pueden ser introducidos mediante la consideración del diagrama tensión-deformación específica (o unitaria) correspondiente a un ensayo de tracción uniaxial de una barra prismática de sección constante, del tipo ilustrado en la figura 1.1.

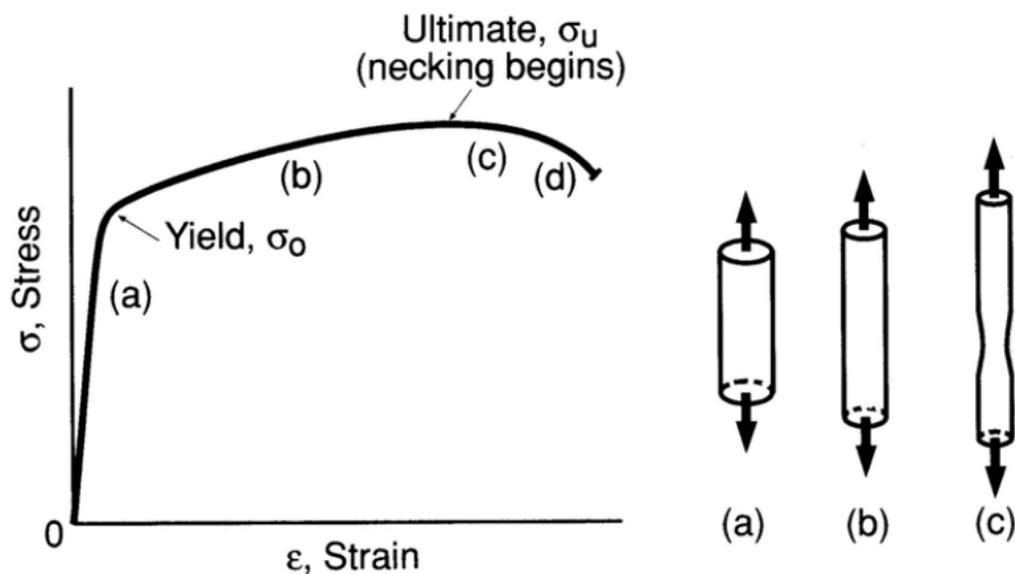


Figura 1.1 Diagrama tensión-deformación específica (o unitaria) correspondiente a un ensayo de tracción uniaxial de una barra prismática de sección constante. (Fuente: Tracción, compresión. Luis A. de Vedia, Hernán Svoboda).

En el diagrama anterior, la tensión  $\sigma$  corresponde a lo que se denomina tensión convencional o ingenieril, definida como la fuerza aplicada sobre la sección inicial de la barra.

### Ensayos de tracción-compresión en metales.

El propósito de este ensayo es analizar el comportamiento de diversos materiales al ser sometidos a un esfuerzo de tensión uniaxial: ensayo de tracción.

El ensayo de tracción de un material dado consiste en someter a una probeta normalizada fabricada con dicho material a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se

produzca la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión deben ser muy pequeñas.

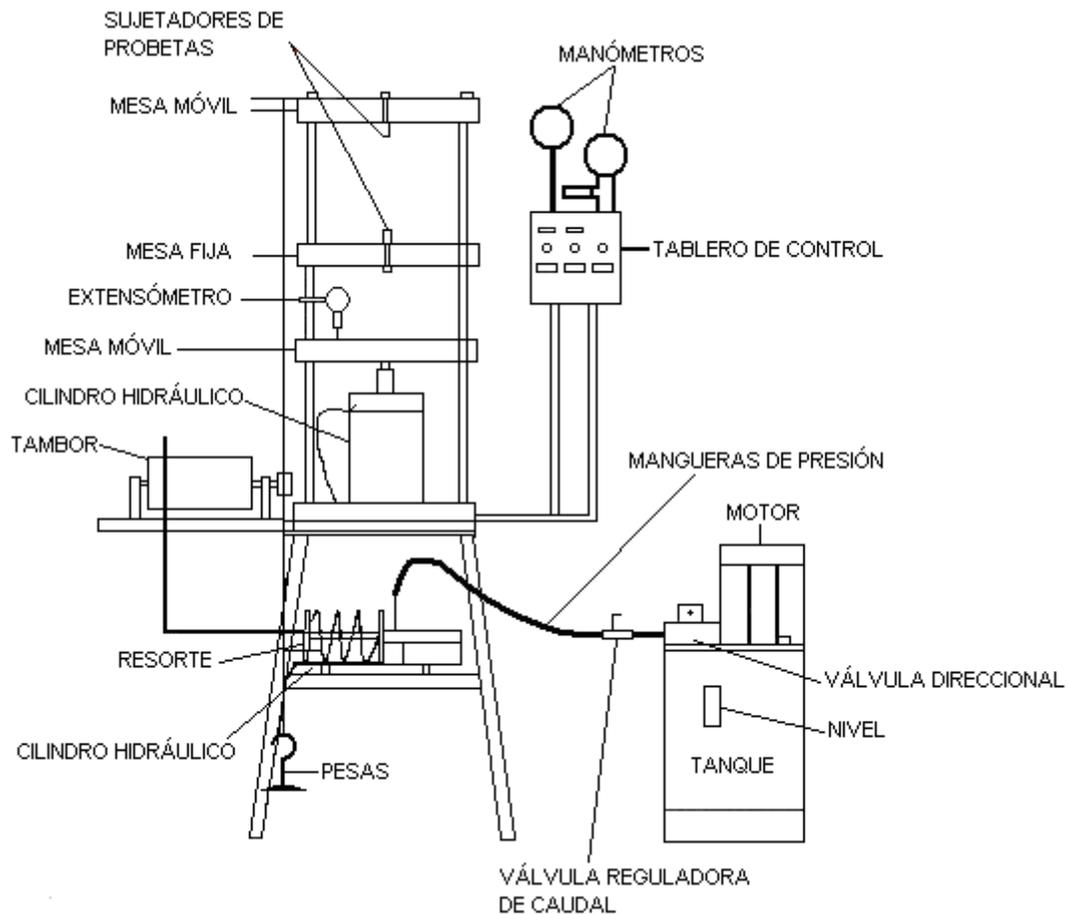


Figura 1.2. Máquina para ensayo a tracción.

El ensayo se realiza en una Máquina Universal tradicional (figura 1.2) y la operación consiste en someter una probeta (ver figura 1.3, según NC 04 - 01) a una carga monoaxial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurra la falla.

Las probetas para ensayos de tensión se fabrican en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta puede ser redonda, cuadrada o rectangular. Para la mayoría de los casos, en metales, se utiliza comúnmente una probeta de sección redonda (NC 04 – 01). Para láminas y placas usualmente se emplea una probeta plana.

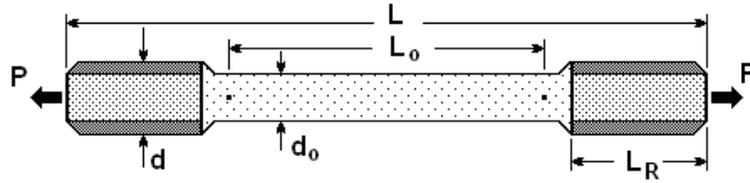


Figura 1.3. Probeta para el ensayo a tracción.

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

La tensión axial  $\sigma$  en el espécimen de prueba (probeta) se calcula dividiendo la carga  $P$  entre el área de la sección transversal ( $A$ ):

$$\sigma = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1.1)$$

Cuando en este cálculo se emplea el área inicial de la probeta, el esfuerzo resultante se denomina tensión nominal (tensión convencional o tensión de ingeniería). Se puede calcular un valor más exacto de la tensión axial, conocido como esfuerzo real.

La deformación unitaria axial media se determina a partir del alargamiento medido “ $\delta$ ” entre las marcas de calibración, al dividir  $\delta$  entre la longitud calibrada  $L_0$ . Si se emplea la longitud calibrada inicial se obtiene la deformación unitaria nominal ( $\epsilon$ ).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} \dots \dots \dots (1.2)$$

Después de realizar una prueba de tensión y de establecer el esfuerzo y la deformación para varias magnitudes de la carga, se puede trazar un diagrama de esfuerzo contra deformación. Tal diagrama es característico del material y proporciona información importante acerca de las propiedades mecánicas y el comportamiento típico del material.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama esfuerzo deformación representativo de los materiales dúctiles. El diagrama empieza con una línea recta desde  $O$  hasta  $A$ . En esta región, el esfuerzo y la deformación son directamente proporcionales, y se dice que el comportamiento del material es lineal. Después del punto  $A$  ya no existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, por lo que el esfuerzo en el punto  $A$  se denomina límite de proporcionalidad. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación puede expresarse mediante la ecuación  $\sigma = E\epsilon$ , donde  $E$  es una constante de proporcionalidad

conocida como el módulo de elasticidad del material. El módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo-deformación en la región linealmente elástica y su valor depende del material particular que se utilice.

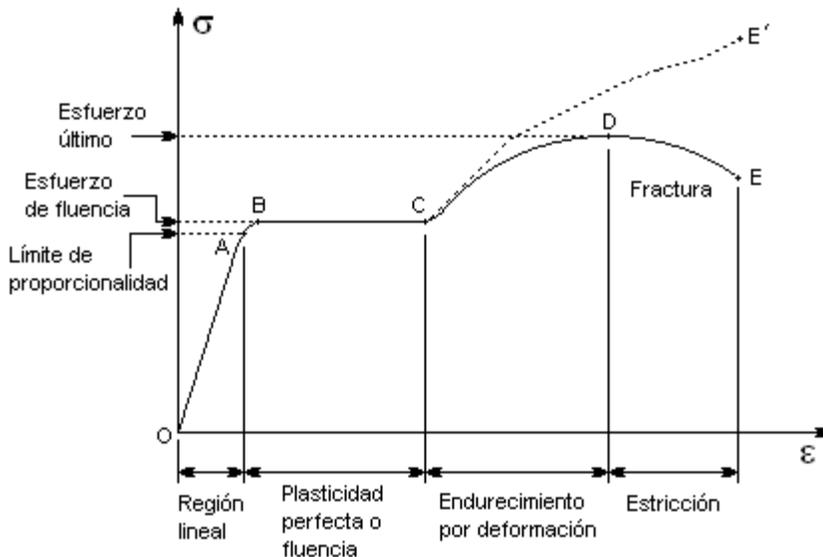


Figura 1.4. Diagrama de esfuerzo-deformación de materiales dúctiles.

La ecuación  $\sigma = E\varepsilon$  se conoce comúnmente como ley de Hooke.

Al incrementar la carga más allá del límite de proporcionalidad, la deformación empieza a aumentar más rápidamente para cada incremento en esfuerzo. La curva de esfuerzo-deformación asume luego una pendiente cada vez más pequeña, hasta que el punto B de la curva se vuelve horizontal. A partir de este punto se presenta un alargamiento considerable, con un incremento prácticamente inapreciable en la fuerza de tensión (desde B hasta C en el diagrama). Este fenómeno se conoce como cedencia o fluencia del material, y el esfuerzo en el punto B se denomina esfuerzo de cedencia o punto de cedencia (o bien, esfuerzo de fluencia o punto de fluencia). En la región de B hasta C, el material se vuelve perfectamente plástico, lo que significa que puede deformarse sin un incremento en la carga aplicada.

Después de sufrir las grandes deformaciones que se presentan durante la fluencia en la región BC, el material empieza a mostrar un endurecimiento por deformación. Durante este proceso, el material sufre cambios en sus estructuras cristalina y atómica, lo que origina un incremento en la resistencia del material a futuras deformaciones. Por tanto, un alargamiento adicional requiere de un incremento en la carga de tensión, y el diagrama

esfuerzo-deformación toma una pendiente positiva desde C hasta D. Finalmente la carga alcanza su valor máximo y el esfuerzo correspondiente (en el punto D) se denomina esfuerzo último. De hecho, el alargamiento posterior de la barra se acompaña de una reducción en la carga y finalmente se presenta la fractura en un punto E, tal como se indica en el diagrama.

Se presenta una contracción lateral de la muestra cuando se alarga, lo que origina una reducción en el área de la sección transversal. La reducción en el área es muy pequeña como para tener un efecto apreciable en el valor de los esfuerzos calculados antes del punto C, pero más allá de este punto la reducción comienza a modificar el perfil del diagrama. Desde luego, el esfuerzo real es mayor que el esfuerzo nominal debido a que se calcula con un área menor.

En la cercanía del esfuerzo último, la disminución del área se aprecia claramente y ocurre un estrechamiento pronunciado de la barra, conocido como estricción. Si para el cálculo del esfuerzo se emplea el área de la sección transversal en la parte estrecha del cuello ocasionado por la estricción, la curva real esfuerzo-deformación seguirá la línea punteada CE'. La carga total que puede resistir la probeta se ve efectivamente disminuida después de que se alcanza el esfuerzo último (curva DE), pero esta disminución se debe al decremento en área de la probeta y no a una pérdida de la resistencia misma del material. En realidad, el material soporta un aumento de esfuerzo hasta el punto de falla (punto E'). Sin embargo, con fines prácticos la curva esfuerzo-deformación convencional OABCDE, basada en el área transversal original de la muestra y que, por lo tanto, se calcula fácilmente, suministra información satisfactoria para emplearla en el diseño. La ductilidad de un material a tensión puede caracterizarse por su alargamiento total y por la disminución de área en la sección transversal donde ocurre la fractura.

La elongación porcentual se define como sigue:

$$E_{elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} (100) \dots\dots\dots(1.3)$$

Donde:

$L_o$  es la longitud calibrada original y  $L_f$  es la distancia entre las marcas de calibración al ocurrir la fractura.

La reducción porcentual de área mide el valor de la estricción que se presenta y se define como sigue:

$$R_A = \frac{A_o - A_f}{A_o} (100) \dots\dots\dots(1.4)$$

Donde:

$A_o$  es el área original de la sección transversal y  $A_f$  es el área final en la sección de la fractura.

Los materiales que fallan en tensión a valores relativamente bajos de deformación unitaria se clasifican como materiales frágiles.

En este ensayo las propiedades usualmente determinadas son: La resistencia a la fluencia (punto de fluencia), la resistencia a la tensión, la ductilidad (el alargamiento y la reducción de área), el módulo de elasticidad y el tipo de fractura.

En ingeniería se necesita saber cómo responden los materiales sólidos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o la cizalladura. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa), una deformación permanente o una fractura. Los efectos de una fuerza externa dependientes del tiempo son la plastodeformación y la fatiga.

### **Ensayo de compresión.**

Debido a que en las construcciones, muchos elementos, tales como columnas y cimientos se encuentran a compresión, este ensayo resulta esencial para determinar los esfuerzos de compresión de los materiales. Este ensayo es muy similar al de tracción. Es decir, que a una probeta de un material dado se le somete a cargas y se mide su deformación, de la misma manera que con el ensayo de tracción, de manera que se obtiene una gráfica similar.

### **1.3.2. Flexión.**

Si las fuerzas sobre un material tienden a cambiar la curvatura inicial del eje centroidal de la sección de la pieza, esta se encuentra a flexión. La utilización de este tipo de ensayos, se deja casi únicamente para vigas, ya que es uno de los elementos más utilizado en la construcción. En las estructuras y máquinas en servicio, la flexión puede ir acompañada del esfuerzo directo, el corte transversal o por torsión. Pero en los ensayos se analizan independientemente las de los esfuerzos restantes. A lo largo de las vigas a las cuales se aplican los esfuerzos, existe un eje que divide los esfuerzos de tracción y de compresión,

ésta es la línea neutra de la viga. Sobre el lado que se da la compresión, las fibras se acortan, sobre las que están a tracción se alargan.

Muy a menudo la barra se somete a la acción de una carga transversal o a la de pares exteriores, cuyo plano de acción pasa por el eje de la barra (Fig. 1.5). En sus secciones transversales aparecen momentos flectores, es decir, momentos exteriores que actúan en un plano perpendicular al de la sección transversal de la barra.

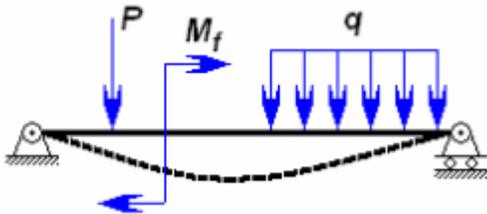


Figura 1.5 Viga simplemente apoyada.

Cuando actúa este tipo de carga, el eje de la barra se encorva. El tipo indicado de sollicitación se denomina flexión. Las barras que trabajan principalmente a la flexión se denominan comúnmente vigas (Fig. 1.5). La flexión se denomina pura, si el momento flector es el único esfuerzo interior que surge en la sección transversal de la barra. Con mayor frecuencia, en las secciones transversales de la barra, simultáneamente al momento flector, aparecen también fuerzas constantes y este tipo de flexión se denomina flexión transversal. Si el plano de acción del momento flector (plano de sollicitación) pasa por uno de los ejes centrales principales de inercia de la sección transversal, entonces esta flexión se denomina plana. Si el plano de acción del momento flector en la sección no coincide con ninguno de los ejes principales de la sección se denomina flexión desviada.

### 1.3.3. Pandeo.

En los cuerpos elásticos, así como en los cuerpos rígidos se pueden distinguir dos tipos de equilibrio, estable e inestable. Supongamos una barra sometida a compresión o un sistema elástico sometido a desviaciones respecto a su posición de equilibrio. (Figura 1.6). (Ferrás Moreno, A. (2012)).

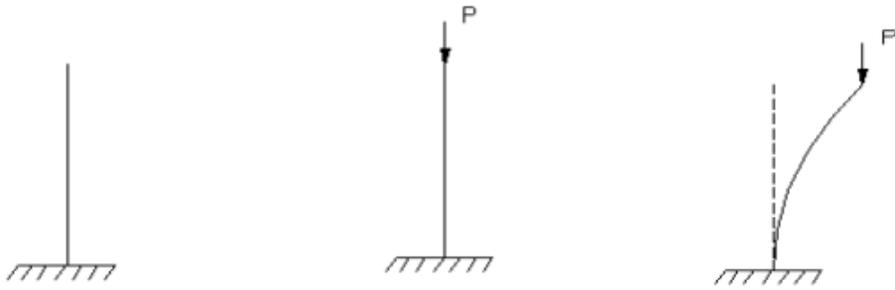


Figura 1.6. Esquema de análisis de una barra comprimida.

En estas condiciones el sistema es perturbado. Al cesar la perturbación el sistema regresa a su posición inicial. En este caso se dice que es un sistema estable. Si el sistema, al ser aplicadas las cargas y provocar desviaciones de su posición de equilibrio inicial no recupera su posición original, se trata de un caso de equilibrio inestable. Normalmente siempre existen causas por las que el sistema se desvía de la posición de equilibrio, pero un sistema no puede permanecer en equilibrio inestable por mucho tiempo, siempre tiene lugar el paso relativamente rápido a una nueva forma de equilibrio, en este caso se dice que ha habido una pérdida de estabilidad. Un sistema que pierde la estabilidad puede comportarse de distintas formas. Casi siempre el sistema pasa a ocupar una nueva forma de equilibrio estable, esto va acompañado de grandes desplazamientos, grandes deformaciones plásticas o la destrucción completa del sistema. En algunos casos al perder la estabilidad la estructura sigue trabajando (la placa delgada que cubre la estructura de los aviones), además pueden ocurrir casos en los que el sistema al perder la estabilidad y no encontrar otra forma más estable permanece oscilando sin amortiguamiento. Este fenómeno de pérdida de la estabilidad en el caso de los cuerpos elásticos se puede observar en varios ejemplos el caso más simple es el de una barra comprimida axialmente. (Ferrás Moreno, A. (2012)).

También tenemos casos de tubos de paredes delgadas solicitados por una carga exterior que pierde la estabilidad (la forma circular pasa a ser elíptica y el tubo se aplasta). También puede perder la estabilidad este tubo en el caso de compresión, también ocurre en las bielas de los motores de combustión interna etc. 18 Si tenemos una barra sometida a compresión axial, cuando la barra es relativamente corta, el peso o la carga a que se somete no produce en ella grandes desviaciones y si lo retiramos, se recupera la forma original. Pero cuando la barra es larga, se producen grandes flechas por lo que además de

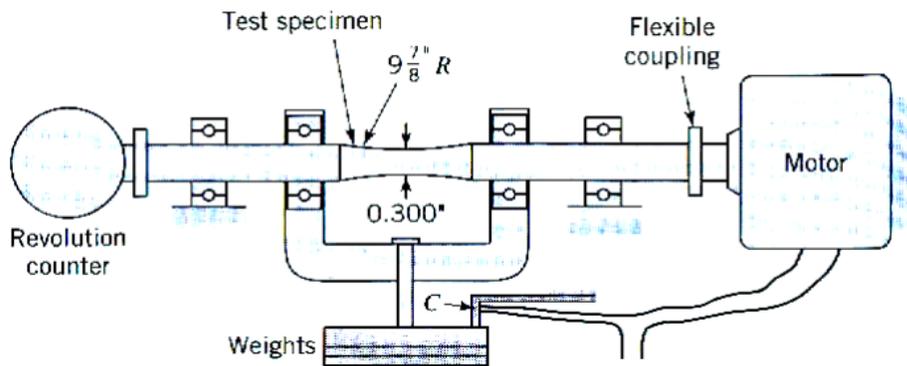
la compresión se produce una flexión simultánea que será tanto mayor cuanto mayor sea la flecha. Este es un proceso que aumenta continuamente y que llega a deformar o destruir la barra de tal forma que no siga cumpliendo su cometido. Entre el paso del estado estable al de rotura está el inestable. La fuerza capaz de producirlo se llama crítica, de no alcanzarse el valor de dicha fuerza el estado recupera su posición inicial al cesar dicha fuerza, de sobrepasarse el cuerpo se destruye. Por lo tanto, desde el punto de vista de ingeniería la fuerza crítica debería considerarse como una carga peligrosa, debido a que es el valor límite de la carga compresiva o el valor mínimo de la carga compresiva para que un sistema sea inestable. (Ferrás Moreno, A. (2012)).

#### **1.3.4. Plastodeformación y a la fatiga.**

La plastodeformación es una deformación permanente gradual causada por una fuerza continuada sobre un material. Los materiales sometidos a altas temperaturas son especialmente vulnerables a esta deformación, que se conoce como creep en estas condiciones. La pérdida de presión gradual de las tuercas, la curvatura de cables tendidos sobre distancias largas o la deformación de los componentes de máquinas y motores, son ejemplos visibles de plastodeformación. En muchos casos, esta deformación lenta cesa porque la fuerza que la produce desaparece a causa de la propia deformación. Cuando la plastodeformación se prolonga durante mucho tiempo, el material acaba rompiéndose. Cruz Velázquez, Y. (2012).

La fatiga puede definirse como una fractura progresiva. Se produce cuando una pieza mecánica está sometida a un esfuerzo repetido o cíclico, por ejemplo, una vibración. Aunque el esfuerzo máximo nunca supere el límite elástico, el material puede romperse, incluso después de poco tiempo. En algunos metales, como las aleaciones de titanio, puede evitarse la fatiga manteniendo la fuerza cíclica por debajo de un nivel determinado. En la fatiga no se observa ninguna deformación aparente, pero se desarrollan pequeñas grietas localizadas que se propagan por el material hasta que la superficie eficaz que queda no puede aguantar el esfuerzo máximo de la fuerza cíclica. El conocimiento del esfuerzo de tracción, los límites elásticos y la resistencia de los materiales a la plastodeformación y a la fatiga, son extremadamente importantes en ingeniería. (Cruz Velázquez, Y. (2012)).

El ensayo a la fatiga básico es el concebido por A.Wöhler (1819 -1914) en el cual una probeta lisa, entallada o el componente mismo es sometido a una carga variable de amplitud constante determinándose el número de ciclos necesarios para que se produzca la iniciación de la fisura por fatiga o una dada cantidad de propagación, P.Ej. 50% de la sección. (Cruz Velázquez, Y. (2012)).



. Figura 1.7. Máquina de Moore para ensayo de flexión rotativa (Fuente: Torsión. Luis A. de Vedia, Hernán Svoboda)

La figura 1.7 muestra esquemáticamente una máquina de ensayo a la fatiga por flexión rotativa. La probeta se encuentra sometida a un estado de flexión pura y las tensiones actuantes en una fibra a cierta distancia del eje neutro cambia de signo cada medio giro de la probeta. De esta manera las fibras estarán sometidas a una tensión alternativa cuya amplitud será máxima para las más alejadas del eje de la probeta.

### 1.3.5. Choques o impactos.

En un inicio, al resolver los problemas se suponía que las cargas que actuaban sobre los elementos de máquina o de las construcciones estáticas, es decir, su magnitud, dirección y sentido no variarían, aumentaban desde cero hasta sus valores definitivos, tan lentamente, que las aceleraciones que se producían se podían despreciar. Ejemplo de estas cargas son el peso de los elementos y las cargas constantes y variables que aumentan o disminuyen muy lentamente desde cero hasta su valor límite. (CruzVelázquez, Y. (2012)).

Sin embargo, en la práctica nos encontramos casos en que los elementos soportan cargas dinámicas, que surgen al originarse un cambio en las posiciones de la pieza o de los

cuerpos unidos a estas, varían su valor en función del tiempo, con mucha rapidez; estos provocan aceleraciones en las piezas, las cuales no pueden ser despreciadas.

Las tensiones y deformaciones que se provocan en las piezas bajo la acción de las cargas dinámicas pueden ser de magnitudes muchas veces mayor que las tensiones y deformaciones que se producen al actuar las cargas de forma estática.

El cálculo por cargas dinámicas es más complicado que el cálculo por cargas estáticas. La dificultad consiste en que, por una parte, los esfuerzos interiores y las tensiones se obtienen por métodos más complicados y, por la otra, la determinación de las características mecánicas de los materiales para cargas dinámicas es también complicado. (CruzVelázquez, Y. (2012)).

Debemos destacar, que muchos materiales, que bajo cargas estáticas se comportan como plásticos, si la carga es dinámica se comportan como materiales frágiles.

Las experiencias demuestran que al actuar las cargas dinámicas, la distribución de tensiones y deformaciones en el volumen de un cuerpo sigue siendo igual que para las cargas estáticas correspondientes. Por eso, al realizar el cálculo de los elementos de máquinas y construcciones en que se puede aplicar el principio de D'Alembert, conocido de la mecánica teórica. Según este principio cualquier sólido en movimiento se puede considerar en estado de equilibrio instantáneo si se suma a las fuerzas exteriores que sobre él actúan, la fuerza de inercia, que es igual al producto de su masa por su aceleración y está dirigida en dirección opuesta a la aceleración. Una vez conocida la fuerza de inercia se puede emplear, sin limitación alguna, el método de las secciones para calcular las fuerzas internas. (Licea Arias, R. (2006)).

En el caso de las fuerzas de impacto que resulta difícil la determinación de fuerzas de inercia para el cálculo de tensiones y deformaciones dinámicas, se recurre a la ley de la conservación de la energía.

Si bien los ensayos estáticos de tracción permiten conocer la capacidad de resistencia y deformabilidad de un metal cuando se lo somete a un esfuerzo progresivo, aplicado lentamente estas propiedades pueden variar según la naturaleza de las cargas y condiciones de trabajo a que se halle sometido. Es por ello que en muchos casos deben considerarse los factores que inciden en la destrucción de la pieza de acuerdo con el empleo práctico del mecanismo o estructura a la que pertenece; por ejemplo, si el metal

soporta tensiones dinámicas sucesivas (fatiga) o estáticas a elevadas temperaturas (creep), la fractura se origina al disminuir su resistencia; en cambio, en elementos sometidos a efectos exteriores instantáneos o variaciones bruscas de las cargas, su falla se produce generalmente al no aceptar deformaciones plásticas o por fragilidad, aún en aquellos metales considerados como dúctiles. En estos casos, es conveniente analizar el comportamiento del material en experiencias de choque o impacto. (Licea Arias, R. (2006)).

Por lo expuesto, las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a efectos dinámicos de choque se ven sensiblemente modificadas, aunque los mecanismos de deformación plástica presumiblemente no varían con el modo de aplicación de la carga.

El objeto del ensayo de choque es el de comprobar si una máquina o estructura fallará por fragilidad bajo las condiciones que le impone su empleo, muy especialmente cuando las piezas experimentan concentración de tensiones por cambios bruscos de sección, maquinados incorrectos, bajas temperaturas, o bien verificar el correcto tratamiento térmico del material ensayado. (Licea Arias, R. (2006)).

Según Licea Arias, R. (2006) en dependencia del tipo de deformación que se produce se clasifica el impacto de diferentes formas:

1. Impacto longitudinal: Cuando surge en el cuerpo analizado una fuerza interna de tracción o compresión.
2. Impacto transversal: Cuando surgen en el cuerpo analizado momentos flectores.
3. Impacto torsional: Cuando surgen en el cuerpo analizado momentos torsores. Por ejemplo, al detenerse bruscamente o de forma inesperada un árbol que gira, en cuyo extremo va situado un volante, aquí el árbol soporta un momento torsor dinámico producto de la fuerza de inercia del volante.

También el impacto se diferencia a partir del movimiento del elemento que golpea:

1. Impacto vertical: cuando se refiere a la caída de una carga desde determinada altura.
2. Impacto horizontal: cuando se refiere al choque de cuerpos en movimiento, o uno fijo y el otro en movimiento.
3. Los métodos propuestos por Izod en 1903 y por Charpy en 1909, consisten en romper el material que se ensaya, bajo un efecto dinámico que se produce por el impacto sobre el mismo de una masa de peso y velocidad conocida. En ambos casos la rotura

se produce por flexionamiento de la probeta, por lo que se los denomina flexión por choque.

4. En los casos en que se pretenda obtener mejores condiciones de tracción pura, por la rapidez en la aplicación de las cargas, se pueden realizar ensayos dinámicos de tracción por choque.
5. Además, en la determinación de las temperaturas de transición de aceros estructurales, las normas aconsejan el empleo de martinets con probetas especiales (método A.S.T.M).
6. Para el estado de tensión creado por la sollicitación dinámica de choque, la velocidad de aplicación de carga estandarizada es superior a la crítica de rotura, por lo que la deformación será localizada con epicentro en la entalla.

La máquina del tipo Charpy (ver figura 1.8) es adquirible en una variedad de tamaños; un tamaño usual es aquel que posee una capacidad de aproximadamente 220 pie-lb para metales y 4 pie-lb para plásticos. El péndulo consiste en una barra ligera y rígida, situándose un pesado disco en el extremo; el péndulo está suspendido de una flecha corta que gira en rodamientos de balines y se balancea hasta la mitad de la distancia entre dos postes verticales, cerca de cuya base están los soportes o yunques de las probetas. El percutor está ligeramente redondeado y debe alinearse de modo tal que establezca contacto con la probeta contra su peralte total en el instante del impacto.



Figura 1.8. Péndulo de Charpy (Fuente: Licea Arias, R. (2006).)

La probeta estándar para ensayos de flexión es una pieza de 10x10x50 mm ranurada; otros tamaños se usan en casos especiales; en muchas especificaciones comerciales se requiere una ranura en forma de ojo de cerradura o de U. La probeta la cual se carga como una viga simple, se coloca horizontalmente entre los dos yunques, de modo que el percutor golpee el lado opuesto de la ranura. El péndulo es elevado hasta su posición más alta y sostenido por un tope ajustado para dar una altura de caída constante para todos los ensayos; luego se le suelta y permite caer y fracturar la probeta. En su movimiento ascendente el péndulo lleva el indicador de fricción sobre una escala semicircular graduada en grados o pie-libras; la energía requerida para fracturar la probeta es una función del ángulo de elevación.

Con la finalidad de que el material esté actuando en las más severas condiciones, el método Charpy utiliza probetas entalladas (estado triaxial de tensiones) y velocidades de deformación de 4,5 a 7 m/s, siendo el entorno recomendado por las normas el de 5 a 5,5 m/s.

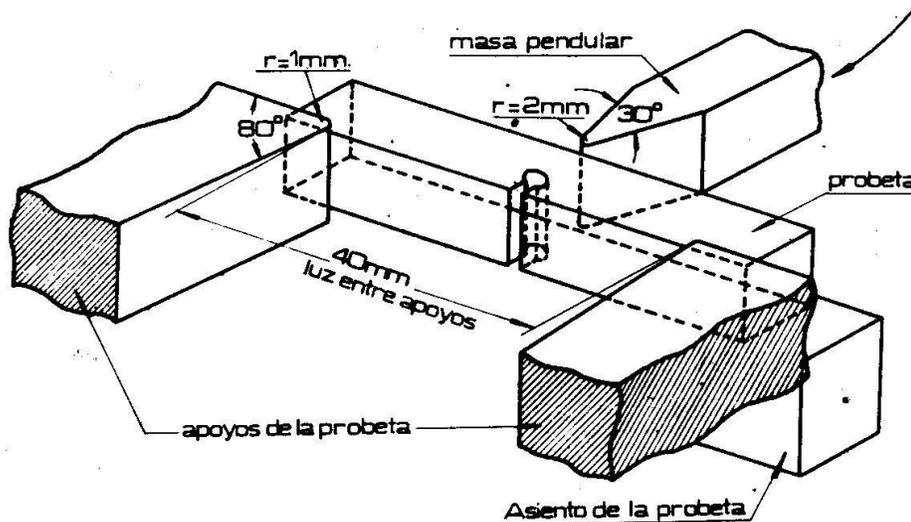


Figura 1.9. Colocación de las probetas. (Fuente: Licea Arias, R. (2006).)

Las probetas se colocan, como muestra la Figura 1.8, simplemente apoyadas sobre la mesa de la máquina y en forma tal que la entalladura se encuentra del lado opuesto al que va a recibir el impacto. En la misma figura se puede observar la correcta posición del material como así también la forma de los apoyos y del martillo pendular.

### 1.3.6. Torsión.

En ingeniería, torsión es la sollicitación que se presenta cuando se aplica un momento sobre el eje longitudinal de un elemento constructivo o prisma mecánico, como pueden ser ejes o, en general, elementos donde una dimensión predomina sobre las otras dos, aunque es posible encontrarla en situaciones diversas. (CruzVelázquez, Y. (2012))

La torsión se caracteriza geoméricamente porque cualquier curva paralela al eje de la pieza deja de estar contenida en el plano formado inicialmente por la dos curvas. En lugar de eso una curva paralela al eje se retuerce alrededor de él.

Sea un eje de sección circular de radio  $R$  y longitud  $L$  sometida a un momento torsor  $T$  como se muestra en la Figura 1.8

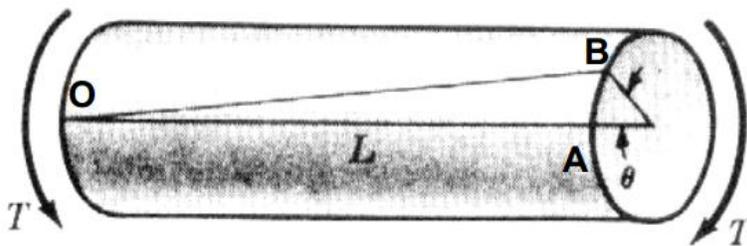


Figura 1.8. Eje de sección circular sometido a un momento torsor. (Fuente: Vedia, L., Svoboda, H. (2001))

Asumiremos que secciones planas antes de la deformación permanecen planas después de la deformación, lo que se verifica experimentalmente para ejes de sección circular pero que no es cierto en general para otras secciones.

Los criterios principales para la selección de la probeta de torsión parecen ser que las probetas deben ser de tal tamaño que permitan que las mediciones de deformación deseadas se logren con exactitud adecuada, y de tales proporciones que eliminen aquella porción de probeta sobre la cual se tomen las mediciones del efecto de los esfuerzos debidos a la sujeción de los extremos. Los extremos deben ser tales que puedan sujetarse y asegurarse sin desarrollar esfuerzos suficientemente localizados para causar falla en las mordazas. (CruzVelázquez, Y. (2012))

Es prácticamente imposible determinar la resistencia al corte hasta el límite proporcional de las fibras extremas de una probeta de torsión sólida. Una delgada probeta tubular es preferible para la determinación de esta propiedad. Las probetas tubulares para determinaciones de la resistencia última al corte deben tener secciones cortas reducidas,

con una razón entre el largo y el diámetro de alrededor 0.5 y una razón entre diámetro y el grueso de 10 a 12.

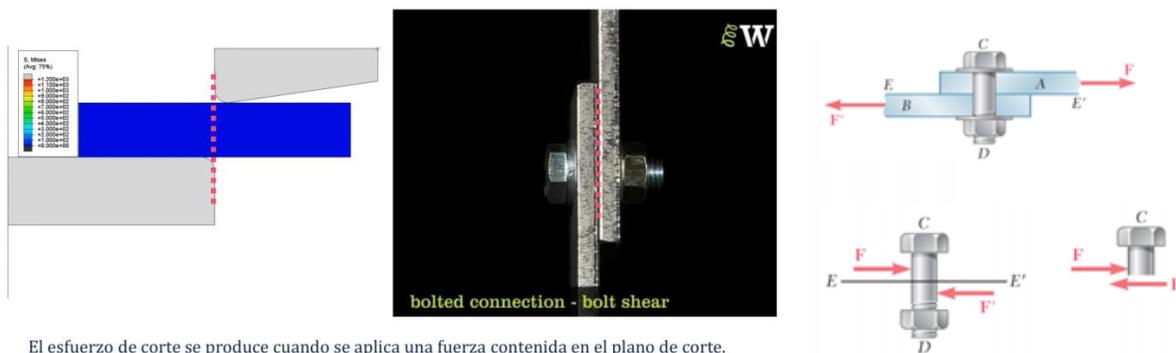
### 1.3.7. Cortante.

Se dice que una sección de una pieza está sometida a cizallamiento o cortadura cuando sobre ella actúa un esfuerzo cortante, es decir, una resultante de fuerzas paralelas al plano de la sección. Dado que la existencia de esfuerzo cortante implica la existencia de un momento flector variable, una rebanada diferencial de una pieza sometida a cortadura está también sometida a flexión. Veremos en lo que sigue que, a menudo, es necesario recordar este hecho para proceder al estudio de las tensiones producidas por la combinación de momento flector variable y esfuerzo cortante. Adicionalmente, pueden actuar sobre la sección un esfuerzo axial y/o un momento torsor. (CruzVelázquez, Y. (2012))

Por tanto la cortadura (cizalladura o tensión cortante) es el esfuerzo que soporta una pieza cuando sobre ella actúan fuerzas contenidas en la propia superficie de actuación y generalmente suele ir acompañado de algún otro esfuerzo.

Un esfuerzo de corte es un esfuerzo que actúa paralelamente a un plano, a diferencia de los esfuerzos de compresión y tensión que actúan perpendicularmente al plano donde se aplican. Como su nombre lo indica produce el desplazamiento de “capas” de la superficie. Como puede observarse en la siguiente figura el esfuerzo de corte se produce cuando se aplica una fuerza contenida en el plano de corte. (Cruz Velázquez, Y. (2012))

#### Esfuerzo de corte simple



El esfuerzo de corte se produce cuando se aplica una fuerza contenida en el plano de corte.

Figura 1.9. Esfuerzo de corte simple (Fuente: Matías Pacheco, A., Abarca Ortega, A. (2019)).

Además pueden esfuerzos de corte en más de una sección como se observa a continuación.

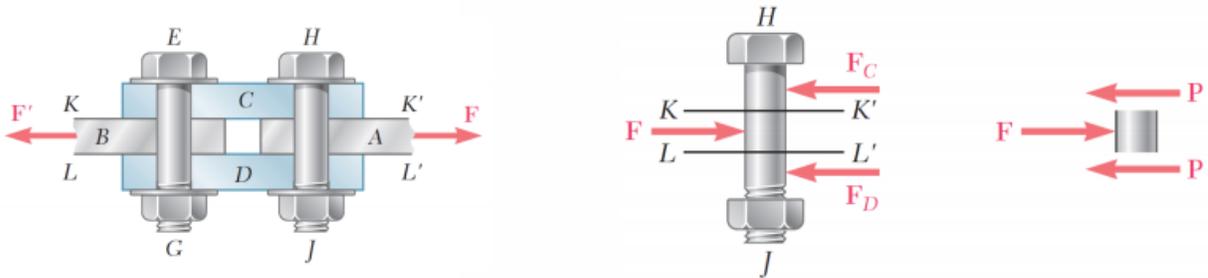


Figura 1.10 Esfuerzo de corte doble (Fuente: Matías Pacheco, A., Abarca Ortega, A. (2019)).

Las cargas que producen las condiciones de corte de interés principal en el ensayo de materiales son las siguientes:

- Las resultantes de fuerzas paralelas, pero opuestas, actúan a través de los centroides de secciones espaciadas a distancias infinitesimales entre sí.
- Las fuerzas se aplican paralelamente al eje de corte, pero a una distancia finita, es decir, en un eje longitudinal, distante del eje centroidal.
- Las fuerzas opuestas aplicadas son paralelas, pero no yacen en un plano que contenga el eje longitudinal del cuerpo; aquí se establece un par que produce torsión alrededor de un eje longitudinal. Esta acción es denominada torsión.

La deformación que acompaña al corte puede considerarse que proviene del esfuerzo de las delgadas tiras o capas paralelas de un cuerpo por deslizarse una sobre otra. La deformación por corte, definida como distorsión, es una función del cambio de ángulo entre los lados adyacentes de un bloque elemental al distorsionarse bajo esfuerzos cortantes. El cambio total de ángulo se representa más convenientemente por medio de un diagrama. Pero los cambios de ángulos son muy pequeños y se expresan en radianes.

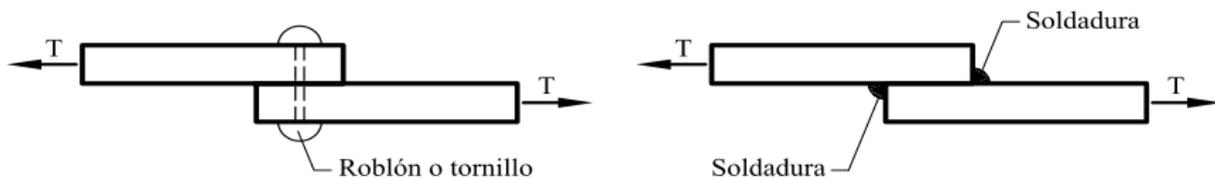
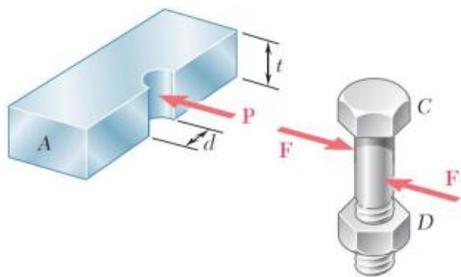
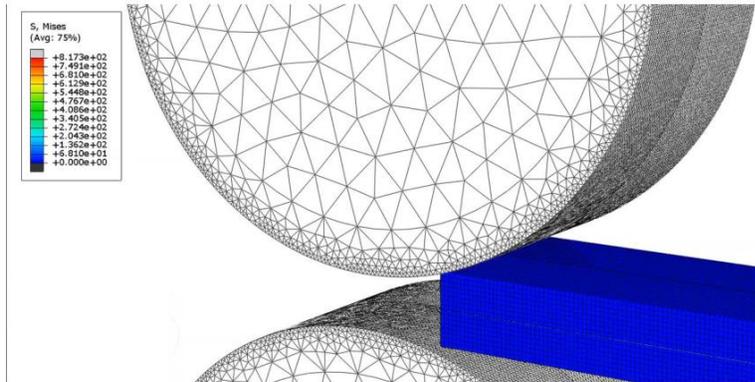


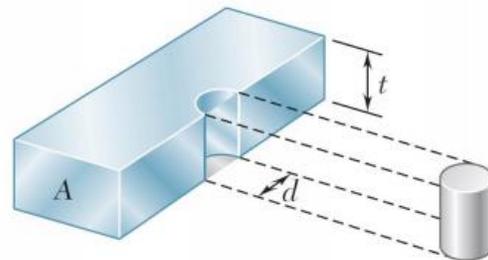
Figura 1.11 Aplicaciones de la teoría elemental: uniones roblonadas o soldadas (Fuente: Cervera Ruiz, M., Blanco Díaz, Elena. (2005))

Además surgen esfuerzos de aplastamiento entre el remache y la plancha.

**Esfuerzo de aplastamiento o apoyo (bearing stress)**



Fuerzas equivalentes y opuestas entre la placa y el perno, ejercida sobre la superficie apernada.



Dimensiones de cálculo del esfuerzo de aplastamiento (bearing stress).

Figura 1.12 Esfuerzo de aplastamiento o apoyo. (Fuente: Matías Pacheco, A., Abarca Ortega, A. (2019)).

**1.4. Uniones remachadas.**

El uso de métodos de unión entre diferentes componentes es una necesidad bien conocida, debido principalmente a la necesidad de fabricar una pieza compuesta por varios elementos que facilite la ejecución de los diferentes procesos a los que se somete. Normalmente, el fallo de una estructura se inicia en algunas de sus uniones. Esto puede ser debido, principalmente, a una falta de consideración en cuanto a su diseño o a las limitaciones de la unión utilizada. En la mayoría de las ocasiones, el propio procedimiento de unión elegido no puede ofrecer un valor de resistencia similar al de los elementos que

trata de unir, por lo que favorece la necesidad de conocer la capacidad portante de la unión. (<https://es.scribd.com/document/235328782/Juntas-Remachadas>).

Un ejemplo de esfuerzo de cortadura sería el que soportan los roblones o remaches después de colocados. Estos están sometidos además de a la tensión de cortadura, a otra tensión de tracción necesaria para mantener unidas dos chapas metálicas.

Los remaches se usan bastante como sujetadores en edificios, puentes, calderas, tanques, barcos y muchas otras estructuras. Cuando se tienen cargas centralmente aplicadas, es usual suponer que todos los remaches de una junta están esforzados por igual. Sin embargo, esta hipótesis es sólo aproximadamente válida. Por ejemplo, considere las dos barras en la Figura 1.13 que son mantenidas juntas por una sola hilera de remaches.

El material en B y e tiene grandes alargamientos porque soporta casi toda la carga P. El material en A y D tiene pequeños alargamientos porque las barras en esos puntos toman sólo poca carga. Debido a esos desiguales alargamientos, los remaches extremos toman cargas excesivas. Las cargas son menores en los siguientes remaches hacia el centro, hasta que a la mitad de la junta los remaches soportarán menos carga que la carga promedio. En materiales dúctiles, una distribución más uniforme de la carga entre los los remaches ocurre si la junta es sometida primero a una sobrecarga que ocasione que el material en las regiones más esforzadas fluya plásticamente.

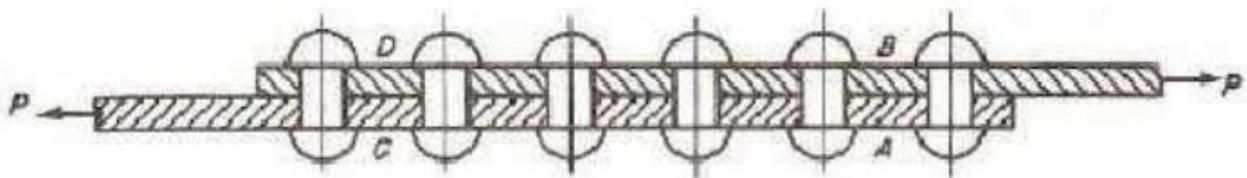


Figura 1.13 Unión de barras mediante remaches. (Fuente: (<https://es.scribd.com/document/235328782/Juntas-Remachadas>)).

Los remaches no deben espaciarse ni muy alejados ni muy cercanos entre sí. La distancia mínima centro a centro entre remaches para trabajo estructural de acero se toma usualmente igual a tres diámetros de remaches. Un espaciamiento algo menor se usa en calderas. Tampoco deben quedar muy separados entre sí, debido al peligro de que se presente el pandeo de las placas unidas por ellos. La

separación máxima se toma usualmente igual a 16 veces el espesor de la placa exterior. La distancia al borde o la distancia del centro del remache al borde de la placa no debe ser menor que una cantidad especificada para evitar posibles fallas por desgarramiento. El remachado es esencialmente un proceso de forja, que se ha desarrollado partiendo de un proceso de martillado a mano hasta llegar al método actual de colocación a máquina. El proceso de remachado puede ser realizado en caliente, normalmente para obras pequeñas realizadas en taller, o para remaches grandes (más de 1”), o puede realizarse en frío, para remachados en campo (remaches de  $\frac{1}{2}$ ” a  $\frac{7}{8}$ ” a  $\frac{7}{8}$ ”). Inicialmente la cabeza de los remaches se conseguía a golpe de martillo, actualmente toda esta simplificado por el uso de maquinaria especial. Para realizar el remachado primero se perfora la chapa a unir, se coloca el remache (frío o caliente) en la perforación y se conforma la otra cabeza, tal como se muestra en la figura. (<https://es.scribd.com/document/235328782/Juntas-Remachadas>).

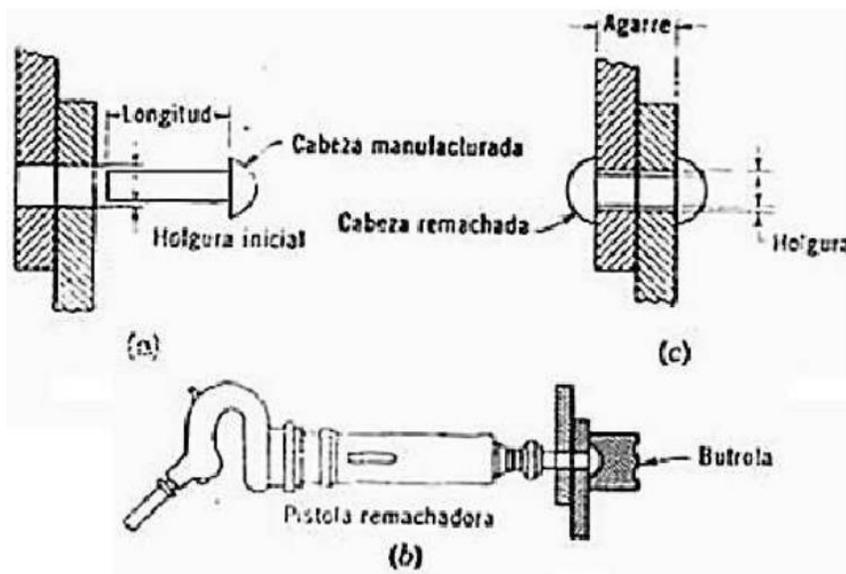


Figura 1.14 Pasos esenciales en el remachado. (Fuente: <https://es.scribd.com/document/235328782/Juntas-Remachadas>).

#### 1.4.1. Tipos de remaches.

Se puede clasificar los remaches por dos categorías:

- Por el tipo de carga que resisten.
- Por la forma del remache.

Por el tipo de carga se tienen remaches a carga axial, a carga cortante, y remaches a carga excéntrica; siendo que por la forma se encuentra remaches de cabeza semiesférica, cabeza avellanada, remaches huecos y remaches de cabeza de hongo.

Los remaches de cabeza de hongo se utilizan para unir chapas muy delgadas, mientras que los remaches huecos además de unir chapas delgadas pueden ser utilizados para cuero, cartón u otros. En las figuras siguientes se muestran las formas típicas de los remaches.

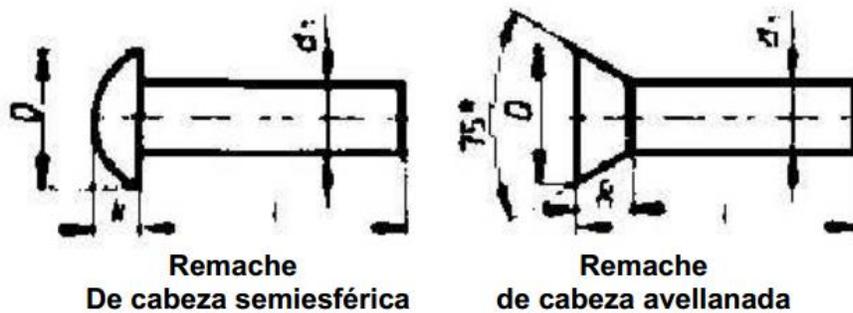


Figura 1.15 Formas típicas de los remaches.

#### 1.4.2. Tipos de fallos en uniones remachadas

En la gráfica siguiente se muestra de forma general los tipos de fallos de las uniones remachadas, reconociendo:

- En el remache, fallo por cortadura (simple, doble, triple).
- En la placa, fallo por aplastamiento, fallo por ruptura a tensión y fallo por corte en los bordes.

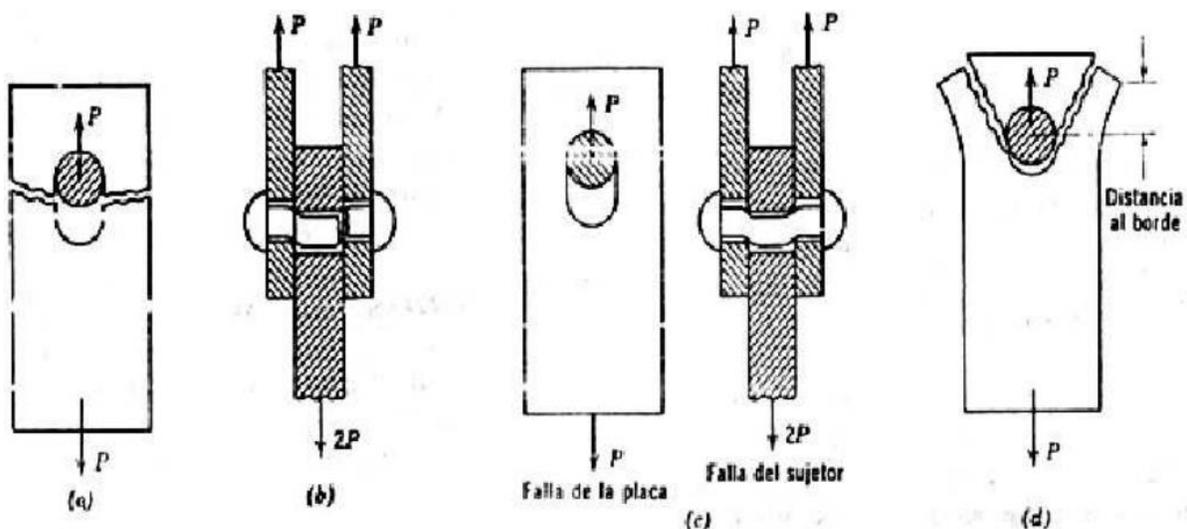


Figura 1.16 Tipos de fallos en uniones remachadas

### 1.4.3. Cálculo de los remaches a carga axial.

#### Cálculo del remache a esfuerzo de corte:

El remache propiamente (el vástago) puede fallar por esfuerzo cortante, entonces:

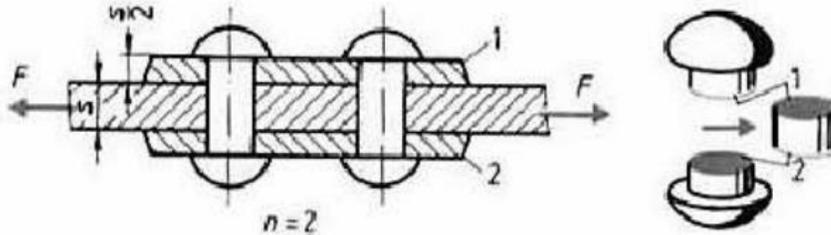


Figura 1.17 Fallo a cortante del remache

$$\tau = \frac{F}{\left(\frac{\pi \cdot d_r^2}{4}\right)} \quad (1.5)$$

Donde:

$\tau$  : esfuerzo admisible a corte del remache (N/m<sup>2</sup>)

F : fuerza aplicada (N)

$d_r$  : diámetro del remache (mm)

#### Cálculo de la placa a esfuerzo de tracción:

Por efecto de los orificios aplicados a la placa para que se inserten los remaches, esta puede fallar a tracción, entonces:

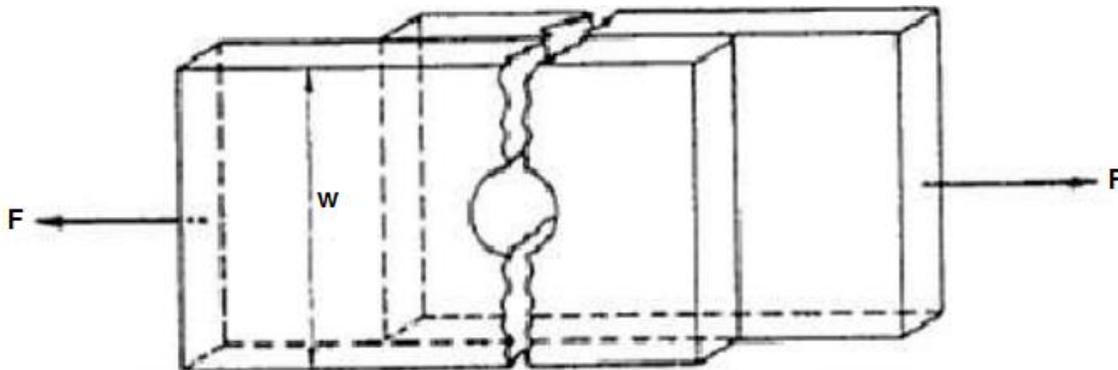


Figura 1.18 Fallo a tracción de la plancha.

$$\sigma_y = \frac{F}{(w-d_r) \cdot t} \quad (1.6)$$

Donde:

$\sigma_y$ : esfuerzo admisible del material de la placa (N/m<sup>2</sup>)

w: ancho de la placa (mm)

t: espesor de la placa (mm)

### Cálculo de la placa a esfuerzo de aplastamiento:

Como resultado de la presión ejercida por el remache, la placa sufrirá un esfuerzo de aplastamiento, que podría desgarrar a la misma, esta verificamos con:

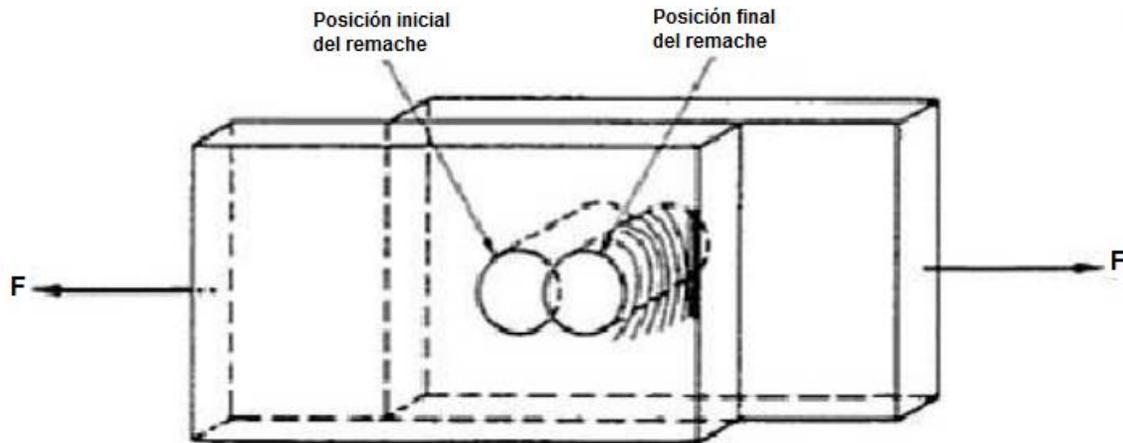


Figura 1.19 Fallo a aplastamiento de la plancha.

$$\sigma_c = \frac{F}{d_r * t} \quad (1.7)$$

Donde:

$\sigma_c$ : Esfuerzo admisible de compresión (N/m<sup>2</sup>)

### Cálculo de la placa a esfuerzo de cortante en los bordes:

La ecuación para calcular este esfuerzo cortante en la orilla de la placa es:

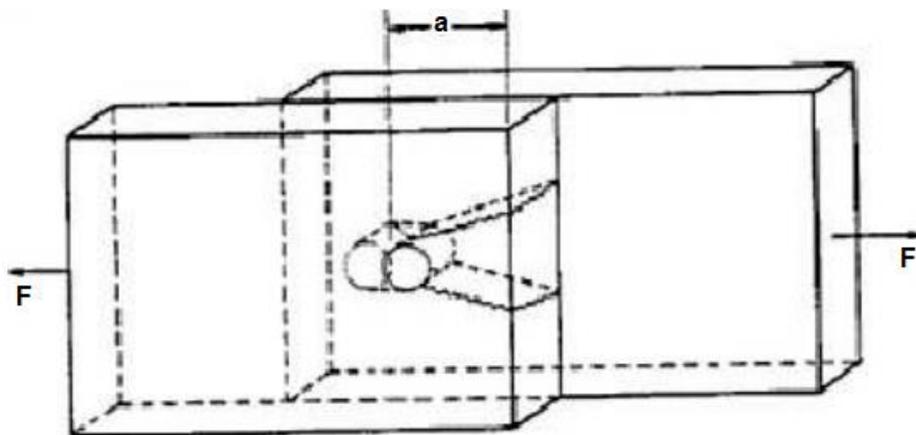


Figura 1.20 Fallo a cortante en los bordes de la plancha.

$$\tau_{placa} = \frac{F}{a * t} \quad (1.8)$$

Donde:

$\tau_{\text{placa}}$  : esfuerzo admisible a corte de la placa (N/m<sup>2</sup>)

a : distancia de eje del remache al borde de la placa (mm)

Finalmente se debe verificar en el diseño de uniones por remaches, que las perforaciones no se encuentren muy cerca de los bordes, de forma básica (pues la norma especifica varias consideraciones), se debe precautelar que del eje de simetría de la perforación, al borde en dirección de la fuerza exista 1,5 veces el diámetro del remache, y 2 veces el diámetro en su dirección transversal.

### **1.5. Máquinas para ensayar uniones remachadas utilizadas en el mundo.**

Los elementos de sujeción se encuentran sometidos en la práctica a cargas de cizallamiento que pueden causar una rápida rotura de la unión. Por ello, hay que realizar ensayos de cizallamiento en piezas unidas o probetas. Esto afecta especialmente a las uniones remachadas, en cuyo caso la inducción de la carga es vital para que la carga por cizallamiento no sea influenciada por otras fuerzas colaterales que influyan negativamente sobre los resultados del ensayo. Los equipos de ensayo pueden ser simples o muy complejos, pero siempre cumplen con su objetivo.

Estos elementos de sujeción se someten a ensayos de cizallamiento que consisten en:

- Ensayo de tipo tecnológico consistente en someter un material a esfuerzos crecientes y progresivos hasta llegar a la rotura.
- Se realiza sobre materiales que van a estar sometidos a fuerzas de corte (chavetas, lengüetas, espárragos, tornillos, pernos).
- En el ensayo de cizallamiento se generan fuerzas transversales en una pieza de material.

A continuación se muestran algunos equipos y/o dispositivos de los que se disponen a nivel mundial para realizar este tipo de ensayo:

- **WP 310.02 Dispositivo para ensayos de cizallamiento, de corte doble.**

Con este accesorio para WP 310 pueden efectuarse los ensayos de cizallamiento en un proceso de dos cortes.

El dispositivo de cizallamiento está compuesto por dos mordazas de cizallamiento endurecido para sujetar la probeta y una lengüeta de tracción con un reborde endurecido. El dispositivo de cizallamiento así obtenido se instala en el rango de presión del equipo de ensayo WP 310 entre el travesañ inferior y la cruceta. La lengüeta se extiende entre las

dos mordazas de cizalladura sin espacio libre. Esto hace que la probeta se corte en dos secciones transversales. Esto evita en gran medida la distorsión del esfuerzo de flexión y la distorsión de los resultados.

El esfuerzo cortante se genera en el ensayo de cizallamiento mediante fuerzas cortante externas que actúan sobre la probeta y se determina la resistencia del material al esfuerzo cortante.

La resistencia al cizallamiento determinada en el ensayo de cizallamiento es importante para el dimensionado de tornillos, remaches y pasadores, así como para calcular la fuerza necesaria para el cizallado y el punzonado.



Figura 1.21 WP 310.02 Dispositivo para ensayos de cizallamiento, de corte doble. (Fuente: <https://www.gunt.de/es/productos/dispositivo-para-ensayos-de-cizallamiento-de-corte-doble/020.31002/wp310-02/glct-1:pa-150:pr-1577>)

- **WP 300.10 Dispositivo para ensayos de cizallamiento, de corte doble**

Muy parecida a las anteriormente descrita.

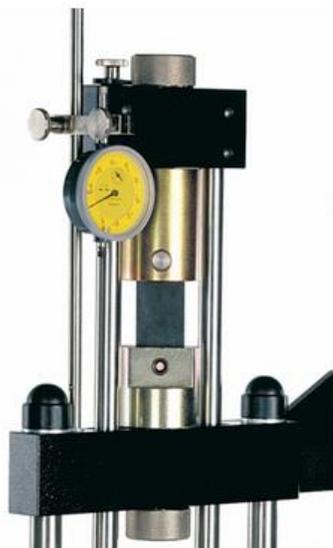


Figura 1.22 WP 310 Dispositivo para ensayos de cizallamiento, de corte doble. (Fuente: <https://www.gunt.de/es/productos/dispositivo-para-ensayos-de-cizallamiento-de-corte-doble/020.30010/wp300-10/glct-1:pa-150:pr-1550>)

- **Double Shear Fixture for Fasteners Catalog no. W-5135.**



Figura 1.22 Double Shear Fixture for Fasteners Catalog no. W-5135

- **Single Shear Fixture for Fasteners Catalogno. W-5141**

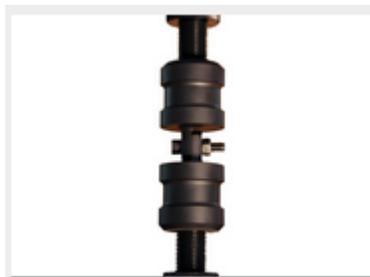


Figura 1.23 Single Shear Fixture for Fasteners Catalog no. W-5141

- **Máquina de prueba de fuerza/de cizallamiento/de compresión/universal L1 series.**

Los comprobadores FMM están disponibles en tres capacidades: 110lbf (500N), 330lbf (1500N) y 550lbf (2500N). Hay dos longitudes de carrera disponibles para todas las capacidades: carrera estándar a 20" (508mm) y carrera extendida a 30"

(762mm). Las velocidades de la cruceta se controlan localmente y se pueden ajustar de 0,002 a 40 pulgadas/min (0,05 a 1016 mm/min). Una pantalla OLED de alta resolución muestra mediciones de distancia con una precisión superior a 20µm (0,0008 pulgadas). Los límites de recorrido ayudan a prevenir la sobrecarga del sensor de carga. Ideal para aplicaciones de tensión, compresión, flexión, cíclicas, de cizallamiento y de fricción.

- **Máquina Universal DNS 200.**

La máquina universal de prueba a tracción, compresión y flexión DNS – 200 está compuesta de la unidad de procesamiento de datos, que es una computadora donde se instala el software TestExpert.NET 1.1, la celda de carga, la máquina de medición como tal (ver Figura .24) y los sistemas de suministro de corriente eléctrica.

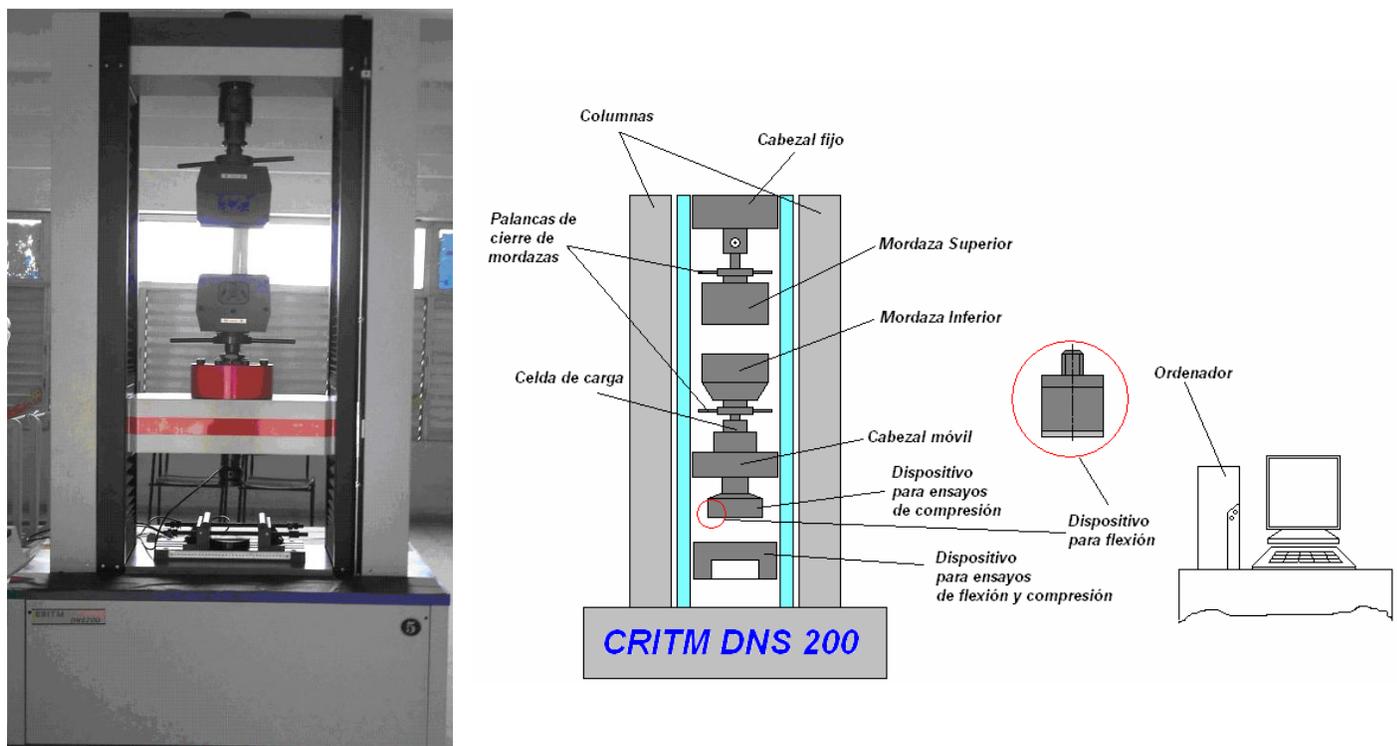


Figura 1.24 Máquina Universal DNS 200. (Fuente: Elaboración propia)

Cuando la máquina está funcionando, la computadora envía los comandos y el sistema de control de la máquina se encarga de controlar la velocidad para los ensayos (tracción, compresión o flexión). Después que la velocidad es controlada, una señal envía las órdenes para hacer bajar el cabezal móvil y que se produzca la tracción de la probeta. Mientras tanto el sensor de detección de la tracción y el codificador fotoeléctrico enviarán

los valores de las diferentes señales que serán amplificadas y transformadas por el sistema de medición; entonces los resultados del ensayo serán mostrados en el monitor de la computadora, y la correspondiente curva tensión contra deformación es graficada, en el caso del ensayo a tracción.

La interfase usuario-máquina es asequible y fácil para la observación y operación, realizando automáticamente los cálculos necesarios para el procesamiento de la información.

El sistema de transmisión cuenta con un motor de alta fiabilidad, que garantiza una transmisión suave, reduciendo el consumo de energía.

El cabezal móvil puede desplazarse libremente sobre las guías verticales y garantizan la alineación del cabezal fijo y el móvil y el acoplamiento de la probeta de prueba. Este desplazamiento sirve para ajustar, además, la distancia entre cabezales y medir la longitud inicial de la probeta de ensayo.

#### **1.6. Diseño asistido por computadora (CAD).**

En el mundo contemporáneo la construcción de grúas, equipos de izaje y más específico elevadores de plataforma que están dirigido a realizar producciones en series normadas, que dependen de las condiciones de trabajo, así como del volumen de carga y función a realizar. En nuestro país aún es muy pobre el trabajo con las herramientas computacionales para la realización de diseños de elevadores principalmente, ya que, se obtienen a través del mercado internacional y en menor escala se fabrican en Cuba, cuando se hace necesario construir un elevador se buscan los elementos estandarizados y las ensamblan sin llevar a cabo un análisis simulado en computadora.

El uso del software SolidWorks facilitó el trabajo y análisis de las diferentes partes de la estructura así como una vista tridimensional del aspecto que tomaría el elevador después de construido, este software tiene además una base de datos de elementos normalizados llamada Toolbox, donde se encuentran elementos como los perfiles, los tornillos y otros elementos de fácil selección, ya que dependen solamente del conocimiento del diseñador para realizar su selección, cuando ya se tiene seleccionados los elementos se procede al ensamble de los mismos y seguidamente al análisis con la herramienta insertada como complemento en el

SolidWorks llamada, Simulation la cual se encarga de realizar los estudios de cargas y restricciones a los elementos del diseño.

Los fabricantes del sector del diseño asistido por computadoras (CAD) siempre han sido punteros en aprovechar la tecnología informática más avanzada. El diseño con modelos 3D, técnicas de diseño vectorial, la medición automatizada, el trabajo directo con objetos y procedimientos, la organización en capas de los proyectos o la ampliación de los programas con extensiones especializadas, tienen su origen en aplicaciones de CAD, aunque actualmente se pueden encontrar en otros tipos de programas.

Los avances en el sector informático siempre han estado muy relacionados con el desarrollo y evolución de las aplicaciones CAD. El génesis de los programas de diseño asistido por computadora lo podemos situar al final del periodo de los ordenadores de primera generación, pero adquiere su completo desarrollo a partir de la aparición de los ordenadores de cuarta generación, en que nacen los circuitos de alta escala de integración LSI (Large Scale Integration) y ya están desarrollados en su totalidad los lenguajes de alto nivel. Se encuentran desarrolladas: la segmentación con el propósito de permitir la ejecución simultánea de muchas partes del programa, la memoria virtual utilizando sistemas de memoria jerárquicamente estructurados y la multiprogramación. A destacar el gran impacto en la productividad que supone para las empresas el emplear técnicas de CAD. Desde el inicio, las grandes empresas han apostado por el CAD y ello supone importantes inversiones que, como es lógico, potencian y convierten el CAD en un producto estratégico con un gran mercado.

### **1.7. El Método de los Elementos Finitos para el cálculo de elementos estructurales.**

Según Pérez Arbella, O. (2018), la ingeniería estudia muchos fenómenos físicos que pueden ser modelados matemáticamente con relativa precisión mediante el uso de ecuaciones diferenciales. Éstas, por lo general, son de difícil solución analítica mediante los métodos clásicos. El MEF permite una evaluación aproximada de las ecuaciones diferenciales que modelan cualquier fenómeno físico (Chandrupatla, Tirupathi, 1999; Angulo, A, 2011). Algunos de los problemas que abarcan el método, están relacionados con el análisis de esfuerzos, flujos de materia, transferencia de calor y dinámica aplicada, entre otras áreas. La solución de problemas de sistemas estructurales es la aplicación

más común hoy en día, en el mercado existen varios software especializados íntegramente en este campo. Con el uso de estos, el diseñador puede reducir significativamente el tiempo que invierte en el análisis, además de optimizar los resultados finales. La característica principal del MEF es que descompone la región de análisis (aquella donde se cumplen las ecuaciones diferenciales) en partes pequeñas de determinada geometría, denominadas elementos finitos, de manera que la precisión del método depende directamente del número de elementos. La agrupación de todos los elementos de una región es denominada 'malla'. La aproximación de cada elemento es usualmente polinomial (lineal, cuadrática, cúbica, etc.), esto depende de cómo cambie la variable en estudio. Por ejemplo, para un problema de transferencia de calor, la variable es la temperatura. Por lo tanto, esta aproximación es un tipo de interpolación sobre cada elemento, donde se asume que la variable es conocida en determinados puntos de éste, denominados 'nodos', localizados en la periferia del elemento (Chandrupatla, Tirupathi, 1999; Angulo, A, 2011). Finalmente, todos los fenómenos físicos son sistemas continuos, es decir, poseen un número infinito de soluciones, en contraste a uno discreto que tiene un número finito de soluciones. Precisamente, el objetivo del uso del método es llegar a conocer la respuesta o el comportamiento de un sistema continuo a partir de la discretización de éste, con cierta aproximación. Las tecnologías de simulación numéricas son hoy día un complemento indispensable ya que permiten minimizar actividades costosas en tiempo y dinero, disminuir el riesgo de las decisiones tempranas y explorar un amplio campo de posibles soluciones (González, Fernández, V.; Rodríguez, Madrigal, M.; Veliz, Marrero, L. M.; Delvía, Jiménez, C.; Delgado, Peña, Y, 2005). A continuación abordamos algunas aplicaciones que ha tenido el MEF en el análisis de estructuras metálicas similares a la Cabria de perforación. (Pérez Arbella, O. (2018).

### **1.7.1 Aplicaciones del método de los Elementos Finitos en el análisis estructural.(Pérez Arbella, O. (2018).**

Uno de los eventos más tristemente recordado fue el Huracán Michelle que cruzó la isla de Cuba en el mes de noviembre de 2001, azotando con vientos de gran fuerza de hasta 225 kilómetros. Entre las mayores afectaciones que se produjeron fue la caída de la torre de 75 metros de altura y 15 toneladas de peso que transmite la señal de televisión nacional, radio y teléfonos desde Matanzas hasta Guantánamo, el golpe llegó a otras 9 torres de

transmisión de señales. Se interrumpieron casi 13 000 teléfonos y aproximadamente 1 500 postes se destruyeron y otra cantidad se doblaron. Esta ha sido la mayor afectación en Cuba en la historia de las telecomunicaciones. En el trabajo presentado por Luisa María Véliz Marrero en la 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, en La Habana se evalúa de forma cuantitativa la vulnerabilidad estructural de dos torres de telecomunicaciones para todas las categorías de eventos que, como resultado de un análisis de peligros se determina que pueden afectarlas, independientemente de las condiciones de diseño establecidas. Esta evaluación se realiza por el Método de los Elementos Finitos y se dan criterios para el reforzamiento, de sus elementos o la sustitución de la instalación por otras que resistan al menos la presión básica para la zona del país donde están ubicadas y posibilite el cumplimiento de la función para lo cual se diseñaron (Véliz, Marrero, María L, 2012). En el 7º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica en México, se presentó un trabajo relacionado con el análisis de una torre de telecomunicaciones con sus antenas (parábolas), utilizándose el MEF. La propuesta de este estudio es simular las condiciones de trabajo particulares de estructuras metálicas en forma de torres de comunicaciones, para entonces predecir su comportamiento para condiciones límites de carga de acuerdo con la zona en que se encuentra ubicada dicha estructura. El análisis se lleva a cabo a partir del conocimiento de las fuerzas que genera un evento meteorológico para una torre de dimensiones, material y aditamentos conocidos, la cual fue modelada con el software de diseño en 3D SolidWorks, analizándose con el Método de los Elementos Finitos (Campos R. Rolando, 2005). Otra de las aplicaciones del MEF, pero dirigida al análisis de frecuencia se muestran en un trabajo del 7º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica en México, donde se estudiaron los primeros cuatro modos transversales naturales de vibración de una viga de perfil tipo I sometida a diferentes condiciones de empotramiento. Los resultados se obtuvieron analíticamente, experimentalmente y numéricamente, esto último con paquetes comerciales de elemento finito (Patran™ y Abaqus™). Se hizo una comparación de las diferentes técnicas empleadas, y un análisis de las ventajas del MEF (Campos R. Rolando, 2005). En la 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura de La Habana se analizaron las torres de transmisión eléctrica de estructuras de acero, que se utilizan para dar soporte a los cables conductores y protectores de la red de energía eléctrica

nacional. En Cuba los fallos en esta tipología estructural son frecuentes debido a la incidencia de fuertes vientos huracanados. La investigación realizada traslada su atención, al tema del análisis estructural de las torres de celosías tipo SS1 de 39 metros de altura y sección rectangular de las líneas de transmisión eléctrica de 220 kV, bajo la acción de vientos huracanados utilizando como técnica de análisis el programa de análisis estructural SAP 2000 (Carrasco, Luzardo, Abel; Elena, Parnás, Vivian B, 2012).



## **CAPÍTULO 2. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL DISPOSITIVO PARA EL ENSAYO DE JUNTAS REMACHADAS.**

### **2.1 Introducción al capítulo**

En la actualidad los dispositivos son muy utilizados para fabricar diferentes equipos, debido a su gran utilidad y desempeño al realizar las sujeciones de piezas, dentro de los que se encuentran los dispositivos universales y especiales en la producción o análisis de cualquier tipo de pieza. El dispositivo que se caracteriza a continuación pertenece al grupo de los dispositivos especiales.

En el presente capítulo se modelará el prototipo en 3D del dispositivo de ensayo de uniones remachadas para someterlo a un estudio estático, con el objetivo de la evaluación del estado tensional-deformacional del mismo. Para esto se tuvieron en cuenta varios aspectos: como la caracterización de los materiales, la determinación de las fuerzas actuantes en él, las restricciones del modelo y la generación correcta del mallado.

### **2.2 Dispositivo para ensayar de uniones remachadas**

En la figura 2.1 se muestran diferentes vistas del modelo propuesto para el dispositivo para realizar el ensayo a uniones remachadas. Este dispositivo está compuesto por dos placas con orificios. En los orificios se ubican los remaches que se desean ensayar.

Este dispositivo está propuesto para ser utilizado en la máquina universal de ensayos DNS-200 (Anexo 1). Esta máquina consta de dos cabezales, uno fijo y otro móvil. La sujeción en la máquina se logra mediante la acción de las mordazas del cabezal fijo en una de las superficies marcadas con la letra A en la vista izquierda de la figura 2.1. El otro extremo, marcado con la letra B se coloca en el cabezal móvil para aplicar la carga. Como los cabezales de la máquina se encuentran alineados, y debido a la propia configuración geométrica del dispositivo propuesto, se elimina la posible excentricidad de la carga y de esta manera no aparecen momentos flectores durante el experimento.

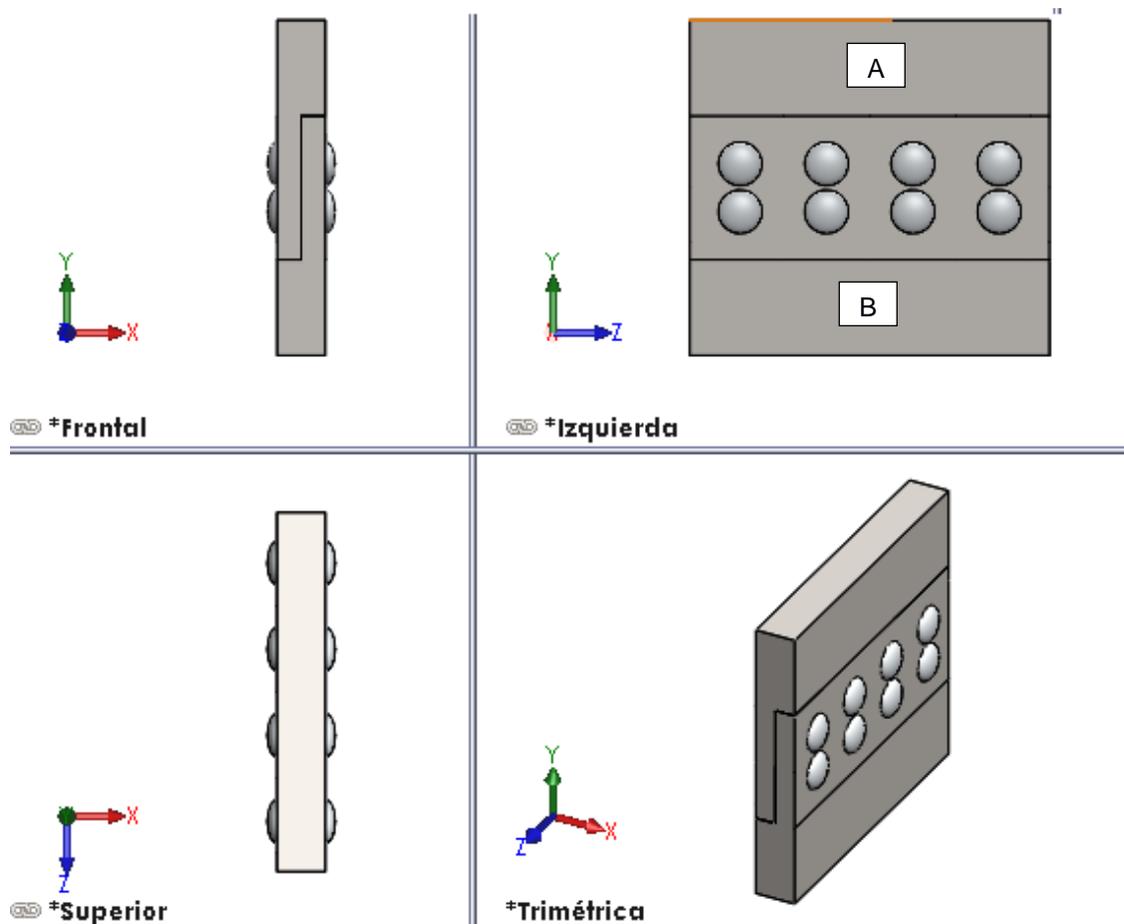


Figura 2.1. Vistas del modelo propuesto para el dispositivo para ensayar uniones remachadas.

Los planos utilizados para fabricar el dispositivo se exponen en el Anexo 2. En este se detallan las distintas dimensiones.

### 2.3. Caracterización del material.

El material que se utilizó para fabricar las planchas fue acero CT3. Este pertenece al grupo de los aceros para construcción. Este grupo presenta un contenido de carbono en porcentaje de (0,08 - 0,7). Estos aceros se dedican a la construcción de elementos de máquinas, deben de tener amplias propiedades mecánicas como resistencia a la rotura, alto límite de fluencia y resistencia al desgaste. Los aceros para construcción se subdividen varios grupos, dentro de los cuales se encuentran los aceros de bajo porcentos de carbono al cual pertenecen los aceros CT3 que dentro del mismo pertenece al grupo de aceros para estructuras. Estos aceros se dedican a la construcción de puentes, gasoductos, oleoductos, armaduras, calderas, etc. Por lo general, todos los

aceros para estructuras son soldables y son de bajo contenido de carbono,  $C < 0,22-0,25\%$ . El aumento de su resistencia se consigue aleándolo con elementos baratos, como el manganeso y el silicio. En este caso y siendo bajo el contenido de carbono, el límite de fluencia aumenta hasta 400 MPa – 500 MPa y la resistencia a la rotura hasta 500 MPa - 600 MPa (Guliaev, 1979). (Guliaev A, P. Metalografía. Tomo I. Moscú, Editorial Mir, 1979). Para fabricar los remaches puede utilizarse cualquier material. Se sugiere que sea uno que tenga menor límite de fluencia y de resistencia que el acero CT3. Esto se hace para garantizar que el fallo ocurra en los remaches y no en las planchas, de esta manera se protege a las planchas. Entonces el material de los remaches puede ser aluminio, duraluminio, cobre.

#### **2.4. Simulación del comportamiento del dispositivo.**

La evaluación del comportamiento mecánico del dispositivo ante la acción de las cargas es muy importante. Se realizó la simulación del ensayo de la unión remachada, lo que permitió conocer el estado tensional–deformacional del dispositivo ante la acción de una carga de tracción. Es importante destacar que la tracción ocurre solo sobre las planchas. La geometría del dispositivo provoca que en los remaches aparezcan tensiones de cizallamiento y de aplastamiento. Estas últimas también aparecen en los orificios de la plancha debido a la Tercera Ley de Newton, que establece la acción y reacción entre dos cuerpos en contacto.

#### **2.5. Modelo geométrico del dispositivo**

El modelo geométrico propuesto para realizar el estudio se muestra en la figura 2.2, mientras que en la figura 2.3 está una vista explosionada del modelo. En ambas figuras se observa la configuración del dispositivo y la relación existente entre las planchas y los remaches para garantizar que las primeras trabajen a tracción y los segundos a cortante. También aparecen tensiones de contacto entre las caras de los remaches y de los orificios. Un aspecto importante es el posible desgarramiento que puede tener lugar en las planchas, debido al debilitamiento que tiene lugar por la presencia de los agujeros. En estos se produce el fenómeno de la concentración de tensiones que es perjudicial en las estructuras. Según Stiopin (1978) en los orificios aparecen tensiones máximas  $\sigma_{max}$ , que por el efecto de la concentración, son el triple de las tensiones nominales  $\sigma_{nom}$ .

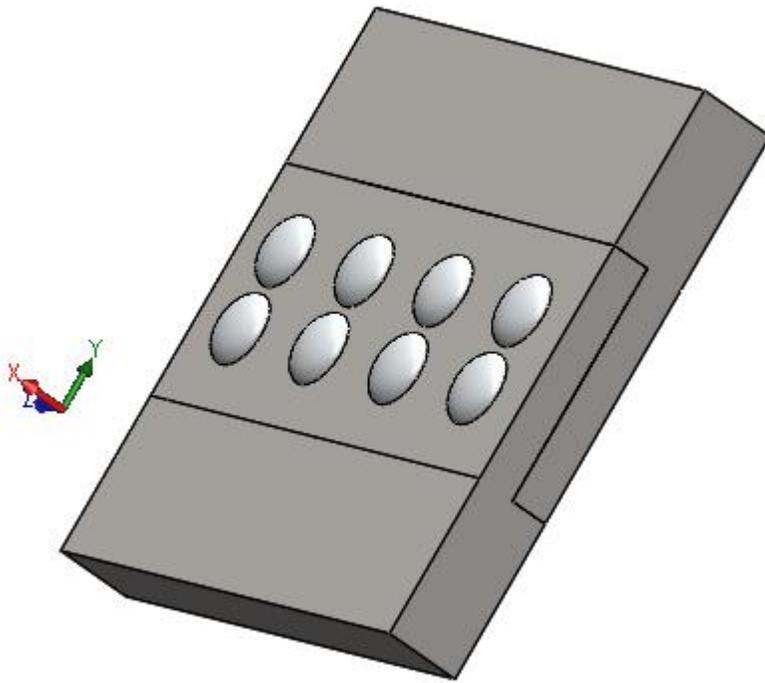


Figura 2.2. Modelo geométrico del dispositivo para ensayar uniones remachadas.

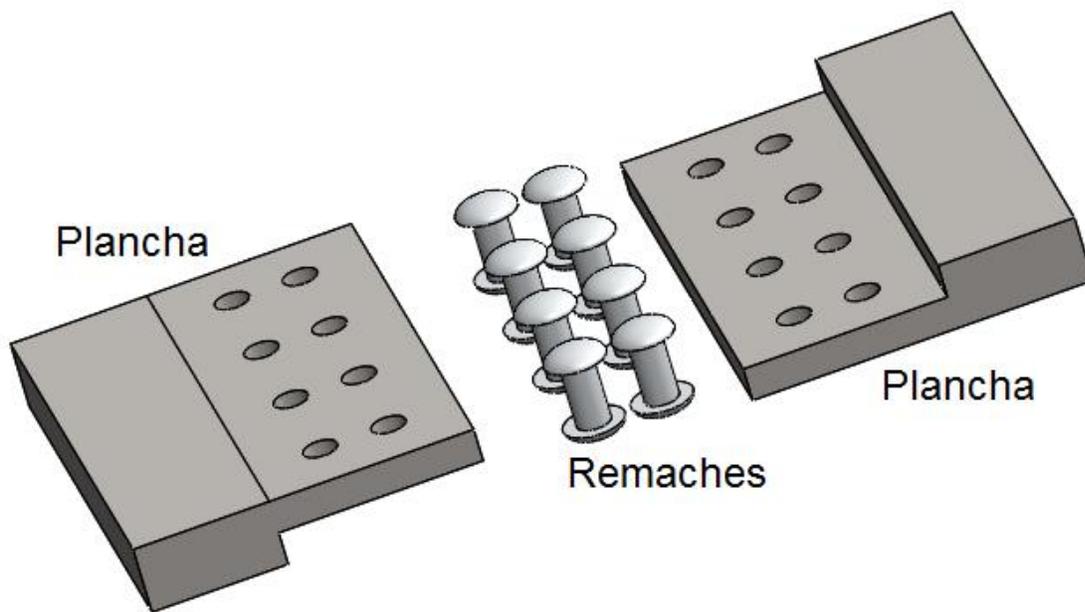


Figura 2.3. Vista explosionada del dispositivo.

En la simulación realizada para las planchas se utilizó un acero CT3. Las propiedades más importantes para efectuar la simulación son el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson que tienen un valor de 200 GPa y 0,29, respectivamente. Para los remaches la propuesta es un aluminio 1060 con un Módulo de Elasticidad de 69 MPa y el Coeficiente

de Poisson igual a 0,33. En la Tabla 2.1 se hace un resumen de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la simulación.

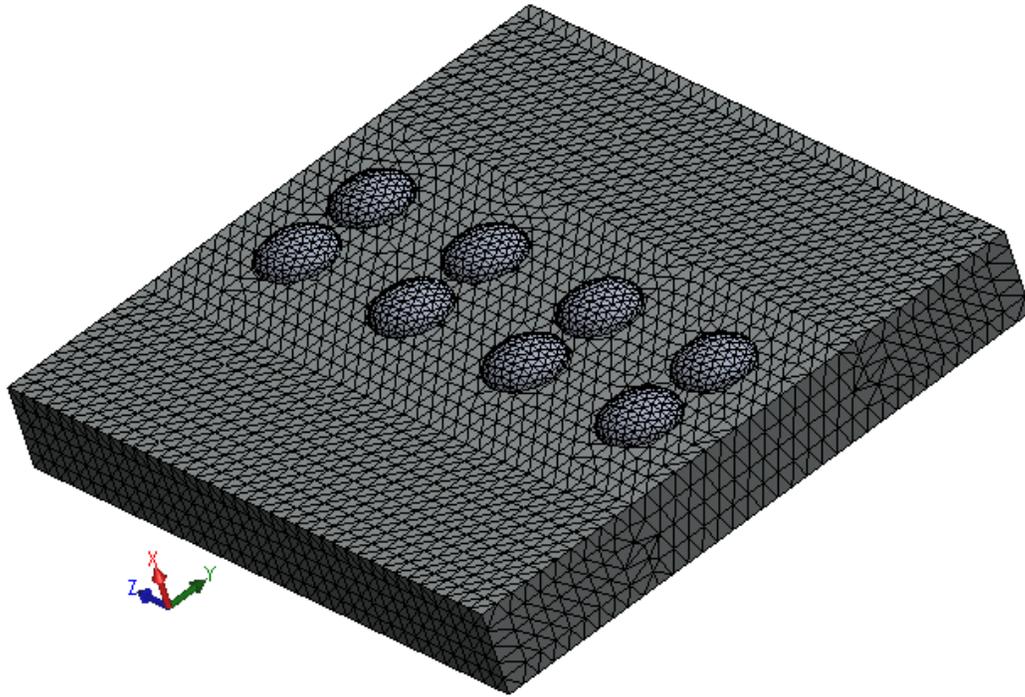
Tabla 2.1 Propiedades mecánicas de los materiales utilizados para la simulación.

Material	Límite de rotura $\sigma_r$ (MPa)	Límite de fluencia $\sigma_f$ (MPa)	Módulo de Young E (GPa)	Coefficiente de Poisson $\mu$
Acero CT3	385	325	200	0,29
Aluminio 1060	68,9	27,5	69	0,33

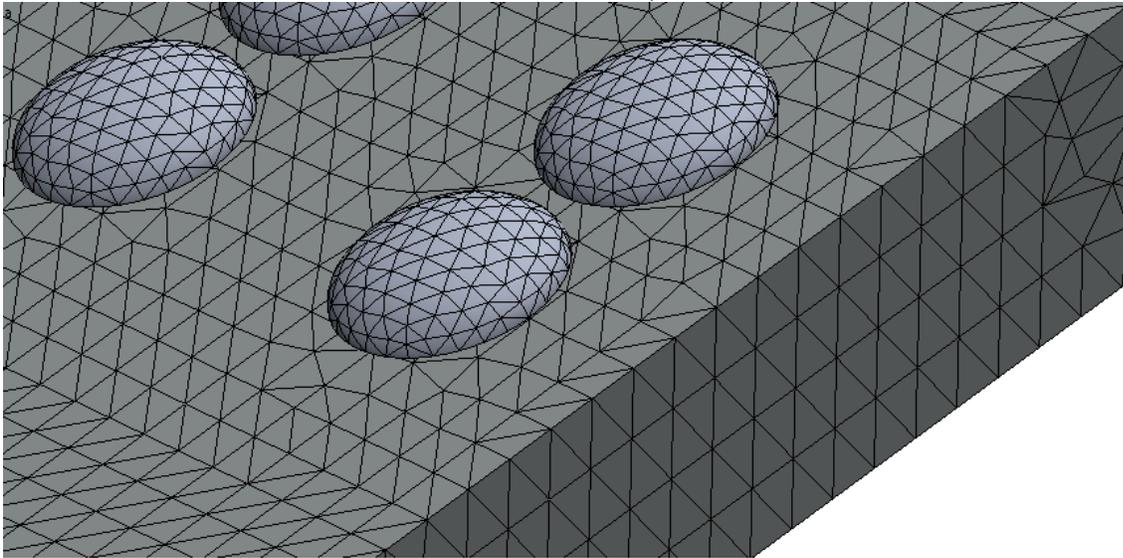
Para el material se seleccionó un modelo constitutivo elástico lineal. Para ello se considera que las tensiones se mantendrán dentro del dominio elástico y que la relación entre las cargas, tensiones y desplazamientos sigue un comportamiento lineal. El tipo de estudio es estático, debido a que se tiene en cuenta que existe equilibrio estático entre los diferentes componentes del dispositivo.

## 2.6. Mallado del modelo

El mallado del modelo se realizó con una malla sólida, con cuatro puntos jacobianos y se activó el control de malla para garantizar mejor calidad de la malla en las zonas de interés. El tamaño de los elementos es de 3,77769 mm y la tolerancia es igual a 0,188885 mm. El tipo de elementos finitos es cuadráticos de alto orden. La malla tiene un número total de nodos de 104 458 y la cantidad de elementos es igual a 64 876. Para completar esta malla fueron necesarios cinco segundos. La malla obtenida se muestra en la figura 2.5. Se observa como la malla en el remache es más pequeña. Esto se hace para lograr mejores aproximaciones en la solución numérica del estado tensional–deformacional.



a)



b)



c)



d)

Figura 2.4. Mallado del modelo. a) Modelo completo. b) Unión entre remache y la plancha. c) Remache. d) Plancha.

## 2.7. Cargas y restricciones

En la figura 2.5 se muestran las cargas y restricciones aplicadas al modelo. En el extremo izquierdo hay restricciones fijas que simulan la acción del cabezal fijo de la máquina de ensayos, mientras que en el extremo derecho actúa una carga igual a 10 kN, que se corresponde con la acción del cabezal móvil.

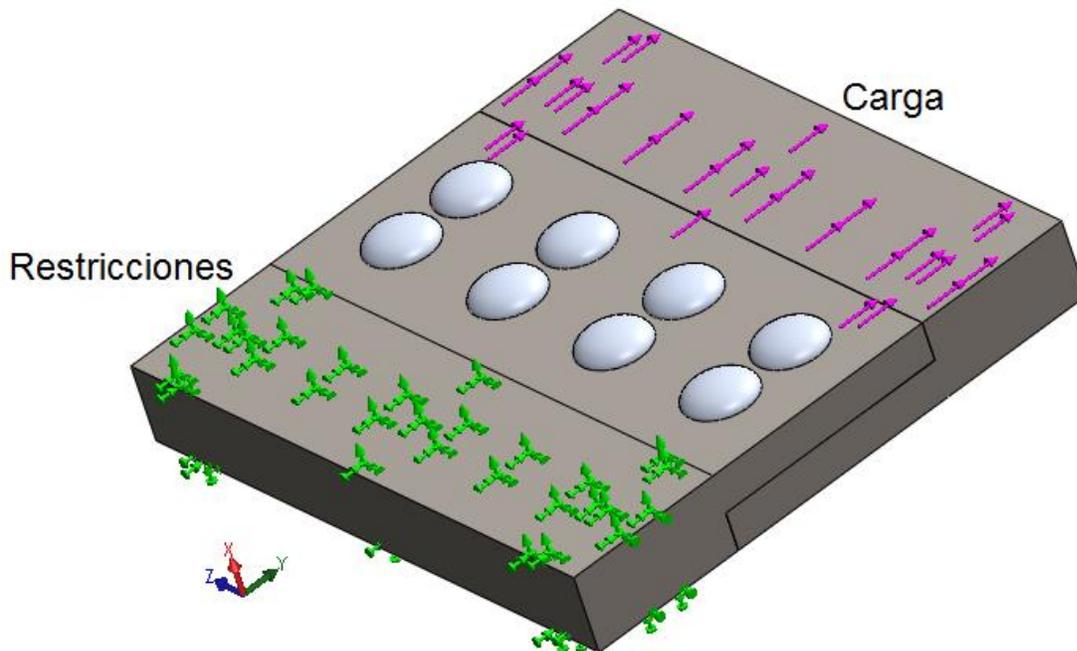


Figura 2.5. Cargas y restricciones aplicadas al modelo.

Cuando se aplican las cargas y restricciones indicadas en un experimental real a una unión remachada como la estudiada en esta tesis ocurre que entre las dos planchas tiene lugar un desplazamiento relativo en la dirección longitudinal de las mismas. Este

desplazamiento es el que provoca que sobre los remaches aparezcan fuerzas cortantes en el área que se corresponde con la superficie donde se unen una plancha con la otra. Para lograr este efecto fue preciso definir un contacto entre superficies sin penetración (Figura 2.6).

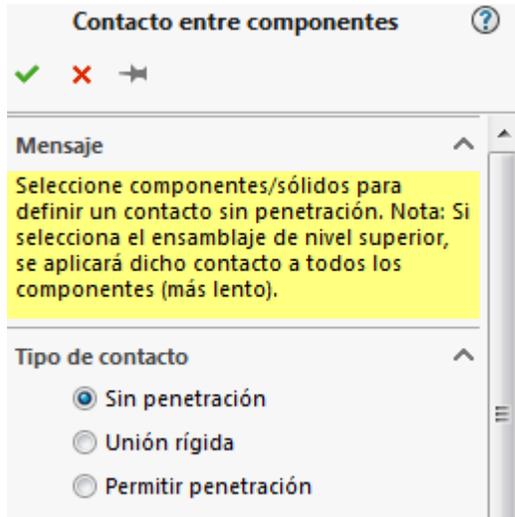


Figura 2.6. Definición del contacto sin penetración entre las planchas.

## 2.8. Estado tensional–deformacional del dispositivo

El estado tensional que ocurre en el modelo completo se muestra en la figura 2.7. Se observa como existen zonas con elevados valores de tensiones normales en la dirección del eje Y, o sea, que provocan la tracción de las planchas. Es necesario analizar el efecto de estas sobre los remaches. El valor máximo de la tensión es de 308,38 MPa y el mínimo es de -282,22 MPa. Las primeras son de tracción, mientras que las segundas son de compresión.

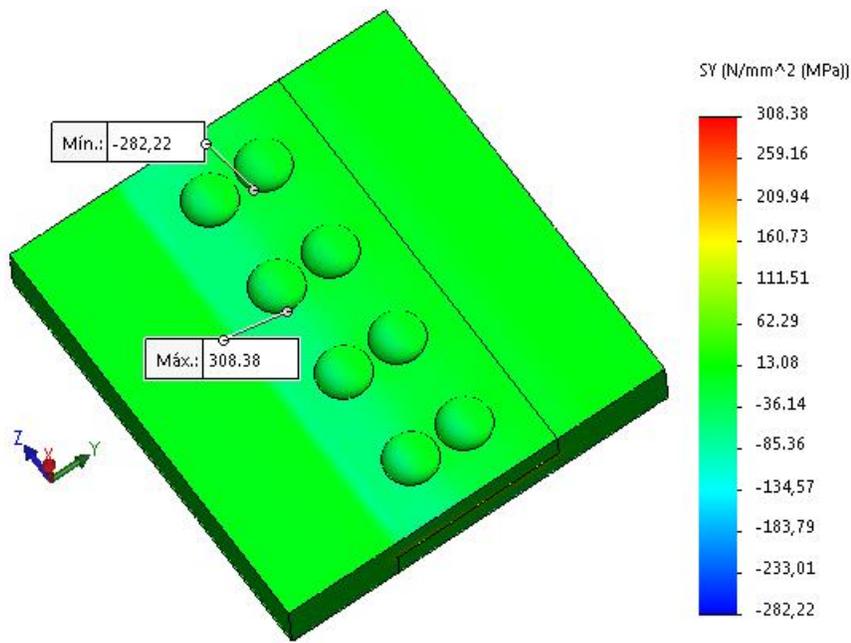


Figura 2.7. Estado tensional del modelo completo.

Por otro lado, en la figura 2.8 se encuentra el estado tensional de una plancha, producido por las tensiones normales en la dirección longitudinal de la plancha. Se aprecia como la mayor tensión, que es igual a 307,31 ocurre en un costado de un orificio. Como se observa en esa propia figura, las tensiones nominales están en el orden de los 110 MPa. El cociente entre la tensión máxima y la nominal es igual a 2,71, valor que está próximo al reportado por Stiopin (1978) para el coeficiente de concentración de tensiones en una plancha con un agujero. El menor valor de tensión es igual a -282,22 y se localiza en el frente del agujero. El signo negativo indica que esa tensión es de compresión. Se observa el elevado valor de las tensiones de contacto en esa zona, lo que justifica que la resistencia de las planchas debe ser mayor que la de los remaches para evitar que por el efecto del aplastamiento ocurran juegos en la junta, porque esta se afloje.

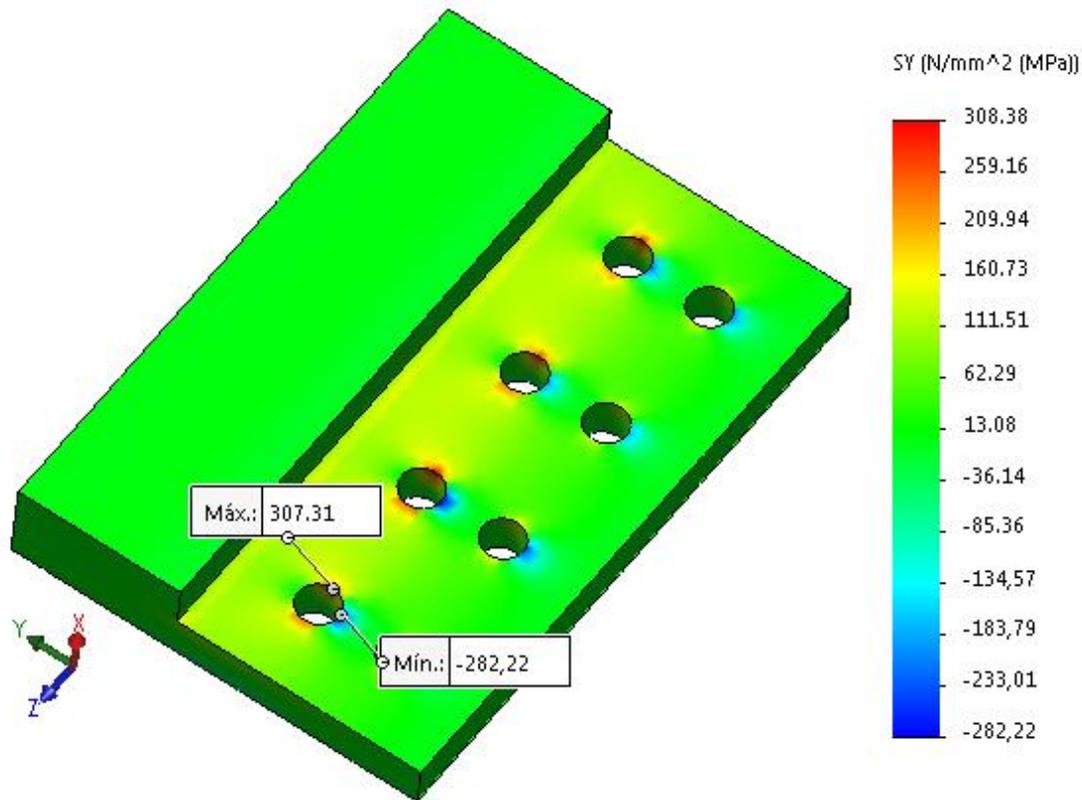


Figura 2.8. Estado tensional en una plancha.

La figura 2.9 muestra la distribución de las tensiones normales en la dirección del eje Y en los remaches. La tensión positiva mayor es igual a 107,78 MPa, mientras que la mayor tensión negativa (de compresión) ocurre en la zona donde el remache coincide con la plancha y se producen las mayores tensiones de aplastamiento.

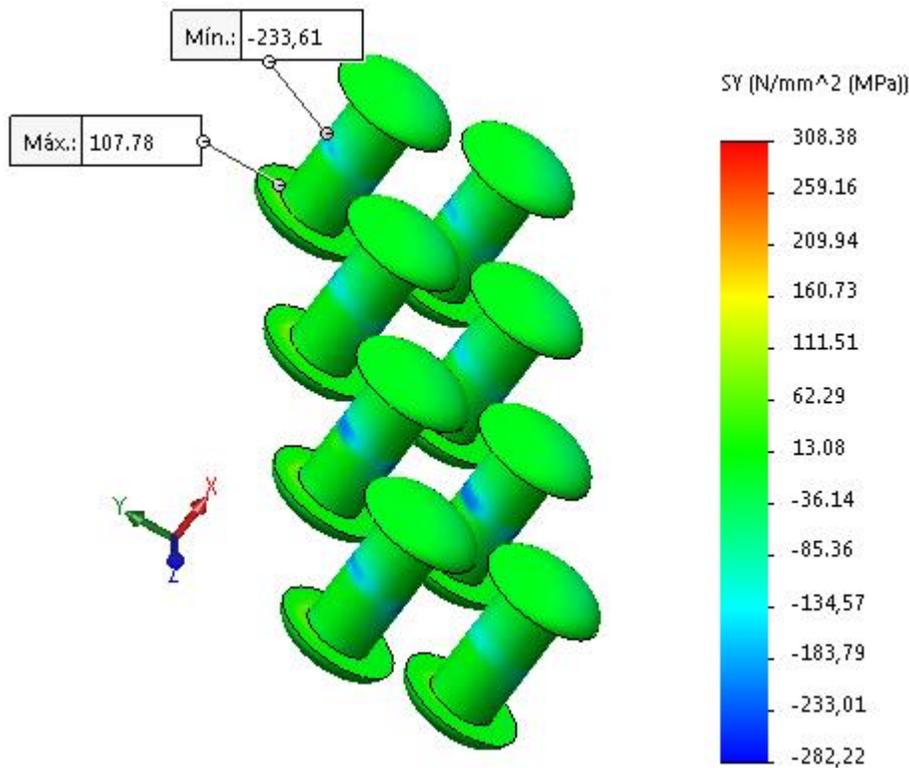


Figura 2.9. Distribución de las tensiones normales en los remaches.

La figura 2.10 es la distribución de las tensiones tangenciales en la plancha. Se observa que esta tiene valores pequeños, que no afectan el funcionamiento de la plancha.

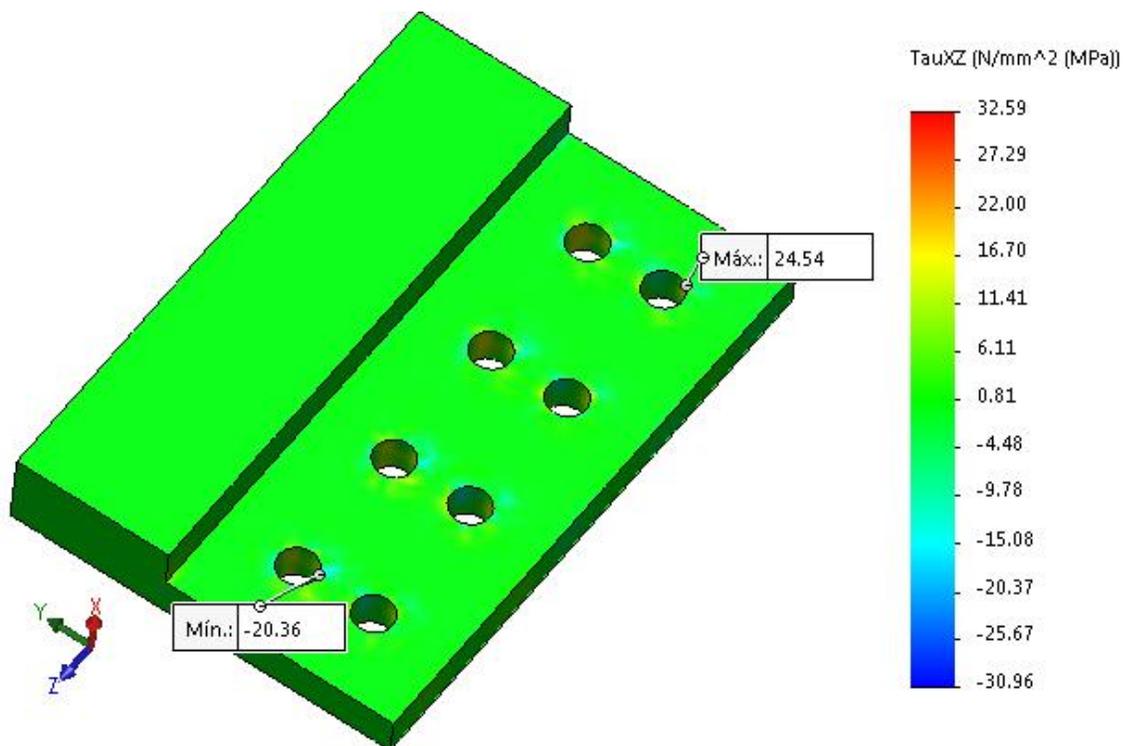


Figura 2.10. Distribución de las tensiones tangenciales en la plancha.

La figura 2.11 expone la distribución de las tensiones tangenciales en los remaches. La tensión mayor es igual a 32,59 MPa y la menor es igual a -30,96 MPa. Estos valores son pequeños en comparación con los de las tensiones normales. Esto indica que el fallo de la junta estudiada puede ocurrir por aplastamiento antes que por cortante. Se destaca que, aunque los valores máximo y mínimo de las tensiones tangenciales tienen signo contrario, su valor modular es similar y aparece una muy cerca de la otra. Esto está en correspondencia con la Ley de Reciprocidad de las tensiones tangenciales que expresa que estas siempre aparecen en pareja, de valor igual, pero signo contrario.

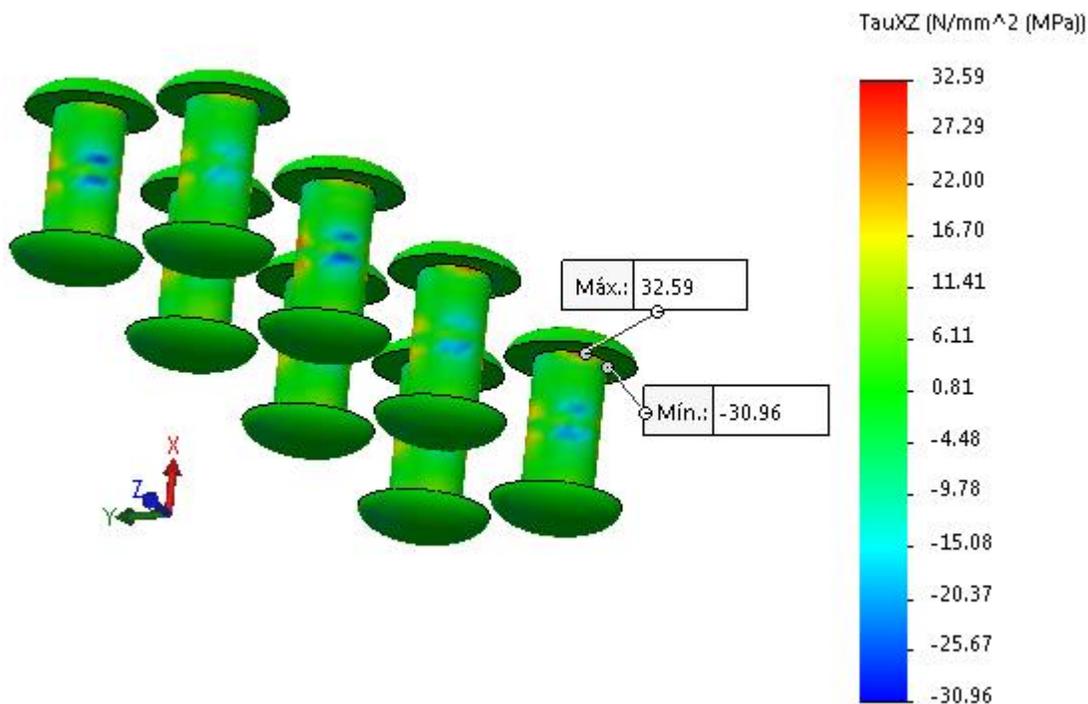


Figura 2.11. Tensiones tangenciales en los remaches.

La figura 2.12 muestra los desplazamientos que ocurren en la unión remachada. Estos tienen valores muy pequeños que no afectan el desempeño de la junta.

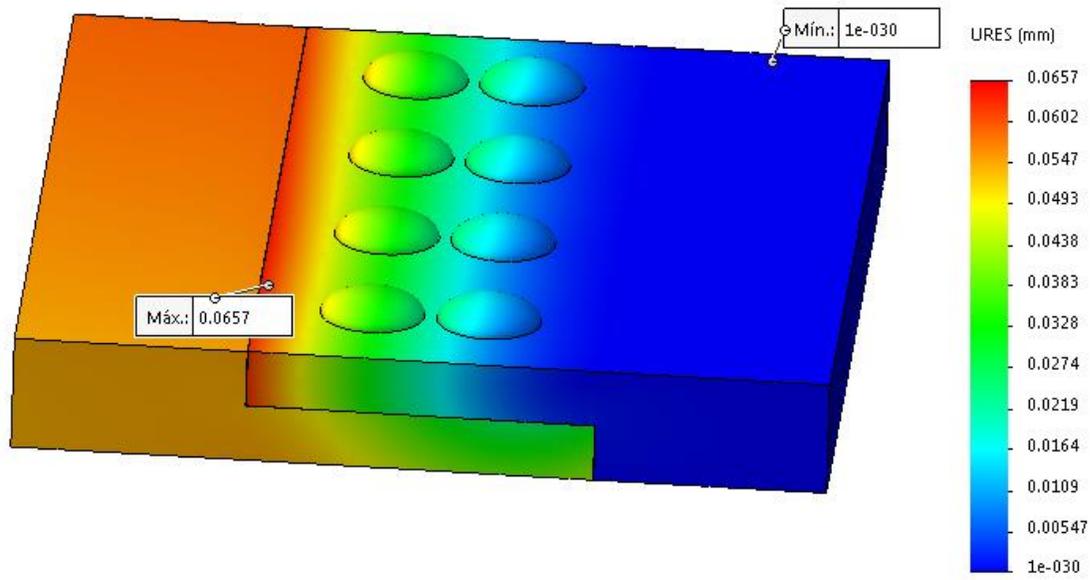


Figura 2.12. Desplazamientos en la unión remachada estudiada.

## CONCLUSIONES

Al concluir esta investigación se obtienen las siguientes conclusiones:

1. Se propuso el diseño de un dispositivo para evaluar el estado tensional en uniones remachadas.
2. El Método de los Elementos Finitos permitió evaluar el estado tensional–deformacional en la unión remachada. La combinación entre la experimentación y la simulación se presenta como una herramienta muy útil para la enseñanza de la Resistencia de Materiales.
3. La unión remachada estudiada es más propensa al fallo por aplastamiento que a cortante.
4. Con el dispositivo propuesto permite ampliar la gama de ensayos que se pueden realizar en los laboratorios de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín al mejorando el proceso docente educativo

## RECOMENDACIONES

Las recomendaciones que realizamos son las siguientes:

1. Diseñar y construir dispositivos para realizar otros ensayos.
2. Elaborar guías de estudio para vincular los métodos experimentales y la simulación numérica.
3. Evaluar distintas combinaciones de la disposición de los remaches.
4. Que se le dé continuidad a este trabajo en otros proyectos donde se realicen estudios con otras posibles variantes de diseño para otras solicitudes.
5. Que este trabajo se pueda generalizar a otras universidades donde no existan estos dispositivos para mejorar la docencia y la investigación.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM E 132 – 04. Standard Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature.
2. Cervera Ruiz, M., Blanco Díaz, Elena. (2005). Mecánica de estructuras. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España.
3. Colectivo de autores: Máquina Herramientas para Metales. Ciudad de La Habana. Editorial 15PSG, 1992
4. Catálogos de la Máquina Universal DNS – 200 para ensayos mecánicos, Fábrica CRIMT de la República Popular China.
5. CruzVelázquez, Y. (2012). Diseño y fabricación de un dispositivo para el ensayo de punzonado en miniatura. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
6. Díaz Hernández, Luis M. (2011). Montaje y puesta en marcha de la máquina universal DNS - 200 para ensayos de tracción – compresión y flexión en las asignaturas de Resistencia de Materiales. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
7. [ftp://servermec/docencia/instrumentación y mediciones técnicas](ftp://servermec/docencia/instrumentación%20y%20mediciones%20técnicas) Compendio de tablas de la asignatura Mediciones Técnicas.
8. Fernández Levy, Gilda. Resistencia de Materiales./Gilda Fernández Levy.-- Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación, 1981.-- 2 tomos
9. Ferras Moreno, A. (2012). Diseño y construcción de dispositivos para ensayos a flexión en cuatro puntos y a pandeo en la máquina universal DNS-200. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
10. Guliaev. A. P: Metalografía Tomo I Y II, Cap. Aceros de construcción. Editorial MIR. Moscú 1989
11. <http://moodle.uho.edu.cu/> Intercambiabilidad y mediciones técnicas.
12. <http://www.facing.uho.edu.cu/dptomec/disciplinas/mecaplic/Resistencia/Portal.htm> Sitio Web de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Holguín
13. Instruction Manual. DNS Series. TestExpert.NET Static Test Software. Changchun Research Institute for Testing Machines Co., Ltd.

14. Licea Arias, R. (2006). Preparación metodológica de las prácticas de laboratorio de cargas de impacto. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
15. Martínez Pérez, Francisco: Tecnología del Tratamiento Térmico. Un enfoque sintético/ Francisco Martínez Pérez. La Habana. Editorial Félix Varela, 2000.
16. Martínez Rosales, J. L. (2012) "Simulación numérica del comportamiento a fatiga de la unión soldada a tope de acero AISI 1015". (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
17. Matías Pacheco, A., Abarca Ortega, A. (2019). Esfuerzos de corte y aplastamiento. Curso Resistencia de materiales. Clase 2 Esfuerzos de corte y aplastamiento.
18. Mulet Ochoa, R. A. (2015). "Simulación del ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI1015 y electrodo E6013". (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
19. Nikolaev Anatoli: Máquina Herramienta I. Ciudad de la Habana. Editorial Pueblo y Educación, 1982.
20. Normas cubanas. NC 1630: Ajuste y tolerancia
21. NC. 10:72. Determinación de la resistencia a la compresión. Método de ensayo.
22. NC 04:01. Ensayos de tracción de metales
23. Otero Pereiro, L. (2006) "Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos", Facultad de Ingeniería Mecánica, CUJAE, La Habana, Cuba.
24. Pérez Arbellá, O. (2018). Propuesta de diseño de la estructura portante de un tanque elevado para agua en la localidad de Cristino Naranjo. (Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Mecánico). Universidad de Holguín.
25. Quesada, Ana María. (1988). Métodos de cálculos de las normas de tiempos de los procesos tecnológicos, Instituto Superior Técnico de Holguín.
26. Resistencia de juntas imples remachadas.  
(<https://es.scribd.com/document/235328782/Juntas-Remachadas>).
27. Rodríguez Hernández, Orlando: Dibujo Aplicado para Ingenieros tomo II. Editorial Pueblo y Educación, La Habana 1986.

28. Stioyin, P. A. Resistencia de Materiales./P. A. Stioyin.-- 6ta ed.—Moscú; Editorial Mir, 1976.
29. Shigley J. E. Diseño en Ingeniería Mecánica./J. E. Shigley, C. R. Mischke. México. Editorial Mc Graw Hill, 1990.
30. Vedia, L., Svoboda, H. (2001). Torsión ENSAYOS INDUSTRIALES Dpto. de Ingeniería Mecánica y Naval Facultad de Ingeniería Universidad de Buenos Aires.

## ANEXOS

Anexo 1. Máquina universal de ensayos DNS-200.



## Anexo 2. Planos del dispositivo.

