

Capítulo III

Propiedades Mecánicas

Como se ha mencionado, la Ingeniería y específicamente el área de materiales ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. La creación de nuevos materiales y la capacidad de modificar las propiedades de algunos ya existentes, han generado que la selección de materiales en cualquier diseño sea una de las principales consideraciones. En este capítulo se analizarán las propiedades mecánicas con las que cuentan los dispositivos de Acero Inoxidable 316L y los de Titanio Ti-6Al-4V^a (ASTM grado 5).

3.1 Pruebas de Dureza

Se define como dureza a la resistencia de un material a ser deformado plásticamente, de igual forma se puede decir que es la resistencia de un material a ser penetrado [6]. La dureza de un material depende de diferentes factores físicos, existen distintos métodos para calcularla y cada uno ellos utiliza distintos parámetros en consideración. Los métodos que más se utilizan en la actualidad son tres:

- a) **Prueba de penetración:** La prueba de penetración es la más utilizada hoy en día, básicamente todas las pruebas de dureza realizadas a los metales es

por este método, la prueba consiste en penetrar la probeta por medio de penetradores estándar y bajo la acción de una carga conocida.

b) **Prueba de rebote:** Para esta prueba, la dureza se determina de acuerdo a la altura que alcanza una bola de acero endurecida después de ser lanzada desde una cierta altura y rebotar sobre la probeta que se analiza. En este caso lo que se analiza es la capacidad de absorber energía por el material a la hora de ser impactado.

c) **Prueba de rayado:** En este caso la dureza del material, es determinada de acuerdo a una comparación realizada en base a una serie de materiales estándar, que van desde polvos o talcos, considerados como los materiales mas suaves, hasta el diamante considerado el mas duro.

En el desarrollo de esta investigación y para el análisis de los dispositivos quiroprácticos, se utilizo la prueba de penetración, por lo que es necesario analizar de una forma más extensa la forma en la que se lleva a cabo. Las dos pruebas de penetración mas utilizadas y reconocidas mundialmente son: Brinell y Rockwell., aunque cabe mencionar que también existe la prueba tipo Vickers y la prueba Knoop (microhardness) [6].

En la prueba de dureza Brinell, una bola de acero endurecida es forzada a penetrar el material bajo la acción de una carga conocida, utilizando formulas o tablas y de acuerdo a la penetración y al diámetro de la misma, es calculado un cierto valor empírico llamado Número de dureza Brinell (BHN).

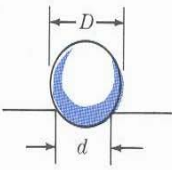
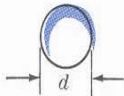
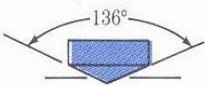
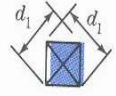
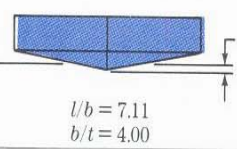
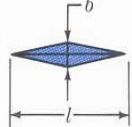
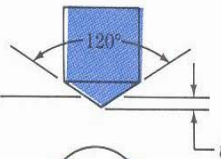

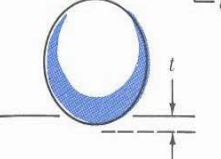

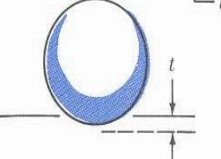

La prueba de dureza Rockwell es muy similar a la prueba Brinell, con excepción de que los penetradores que se utilizan en este caso son diferentes, esto se debe a que la dureza Rockwell utiliza dos escalas principalmente: **B** y **C**. La escala B, utiliza un penetrador de acero en forma de bola con un diámetro de 1/16 de pulgada y bajo la acción de una carga de 100 Kg. La escala C, utiliza como penetrador un cono con punta de diamante y bajo la acción de una carga de 150 Kg. Es importante mencionar que en este tipo de prueba no es necesario calcular el resultado, ya que este se obtiene directamente por medio de un indicador integrado en la maquina de prueba.

La prueba de dureza Vickers utiliza como penetrador una punta de diamante en forma de pirámide, y al igual que en el la pruebe Brinell se utilizan formulas y tablas para calcular un valor empírico llamado número de dureza Vickers (VHN).

A continuación se presenta una tabla en la que se muestran los diferentes tipos de pruebas de dureza y las características generales de las pruebas como son [6]:

- a) El tipo de penetrador.
- b) La forma geométrica del penetrador.
- c) La carga que se utiliza.
- d) Formulas que se utilizan para calcular el número de dureza.

Figura 3.1 Tipos de Pruebas de Dureza

Test	Indenter	Shape of indentation		Load	Formula for hardness number	
		Side view	Top view			
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			P	$BHN = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$	
Vickers	Diamond pyramid			P	$VHN = \frac{1.72P}{d_1^2}$	
Knoop microhardness	Diamond pyramid			P	$KHN = \frac{14.2P}{l^2}$	
Rockwell						
A } C } D }	Diamond cone			60 kg 150 kg 100 kg	$R_A =$ $R_C =$ $R_D =$	100-500f
B } F } G }	1/8-in-diameter steel sphere			100 kg 60 kg 150 kg	$R_B =$ $R_F =$ $R_G =$	
E	1/8-in-diameter steel sphere			100 kg	$R_E =$	130-500f

Source: After H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, "The Structure and Properties of Materials," vol. III, Wiley, 1965, p. 12.

Procedimiento y Resultados

Para el análisis de dureza de los elementos se realizaron cinco penetraciones en cada una de las probetas y bajo las siguientes condiciones:

- 1.- Tipo de prueba penetración.
- 2.- Escala Rockwell C.
- 3.- Penetraciones en la parte central de la probeta.
- 4.- Condiciones atmosféricas (temperatura, medio ambiente).

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron del penetrador en cada una de las probetas, además de mostrar en forma gráfica en la que se comparan los resultados:

Probeta de Acero Inoxidable 316LS

Penetración # 1 = 27 Rockwell C.

Penetración # 2 = 26 Rockwell C.

Penetración # 3 = 27 Rockwell C.

Penetración # 4 = 28 Rockwell C.

Penetración # 5 = 26 Rockwell C.

Promedio de dureza del material = 26.8 Rockwell C.

Probeta de Titanio Ti-6Al-4V^a (ASTM grado 5)

Penetración # 1 = 31 Rockwell C.

Penetración # 2 = 31 Rockwell C.

Penetración # 3 = 32 Rockwell C.

Penetración # 4 = 33 Rockwell C.

Penetración # 5 = 32 Rockwell C.

Promedio de dureza del material = 31.8 Rockwell C.

Prueba de dureza

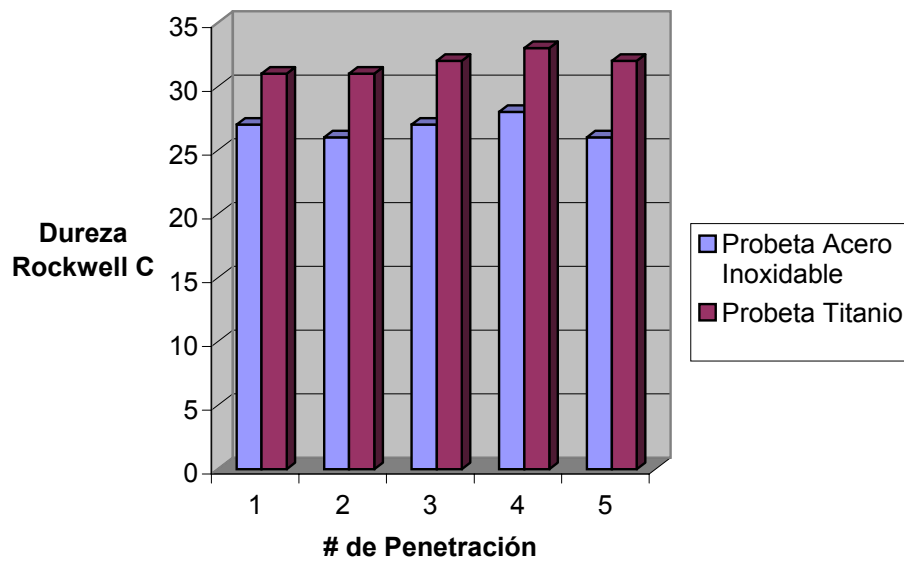


Figura 3.2 Gráfica Comparativa de Durezas.

3.2 Pruebas de Tensión

Las propiedades mecánicas de un material determinan el comportamiento de este durante la aplicación de alguna carga o fuerza, este comportamiento se denomina esfuerzo, existen diferentes tipos de esfuerzos : tensión, compresión, cortante y a torsión.

Durante los últimos años, la prueba de esfuerzo a tensión se ha convertido en una de las más utilizadas y eficaces pruebas par obtener información de las propiedades mecánicas del material. Dentro de estas propiedades se encuentran [6]:

a) **Esfuerzo de cedencia:** El esfuerzo de cedencia se define como el punto en el cual, el material sufre una deformación plástica, es decir, el material pasa la zona de deformación elástica y queda deformado permanentemente. Para el caso del diseño de elementos, este tipo de esfuerzo es considerado muy importante, ya que el diseño tiene el riesgo de fallar en cualquier momento una vez que se excede este valor. La forma más común de definir este valor, es por medio de una gráfica que resulta de aplicar una prueba de tensión al material, la gráfica Carga (eje y) contra Elongación (eje x), es la base para obtener una serie de datos de gran utilidad.

El esfuerzo de cedencia, se obtiene al trazar una línea paralela a la zona elástica en la gráfica Carga VS Elongación, pero con un desplazamiento del 2 %

sobre el eje X, el punto en el que esta línea se intersecta con la gráfica, es el valor del esfuerzo de cedencia. A continuación se muestra un ejemplo [6]:

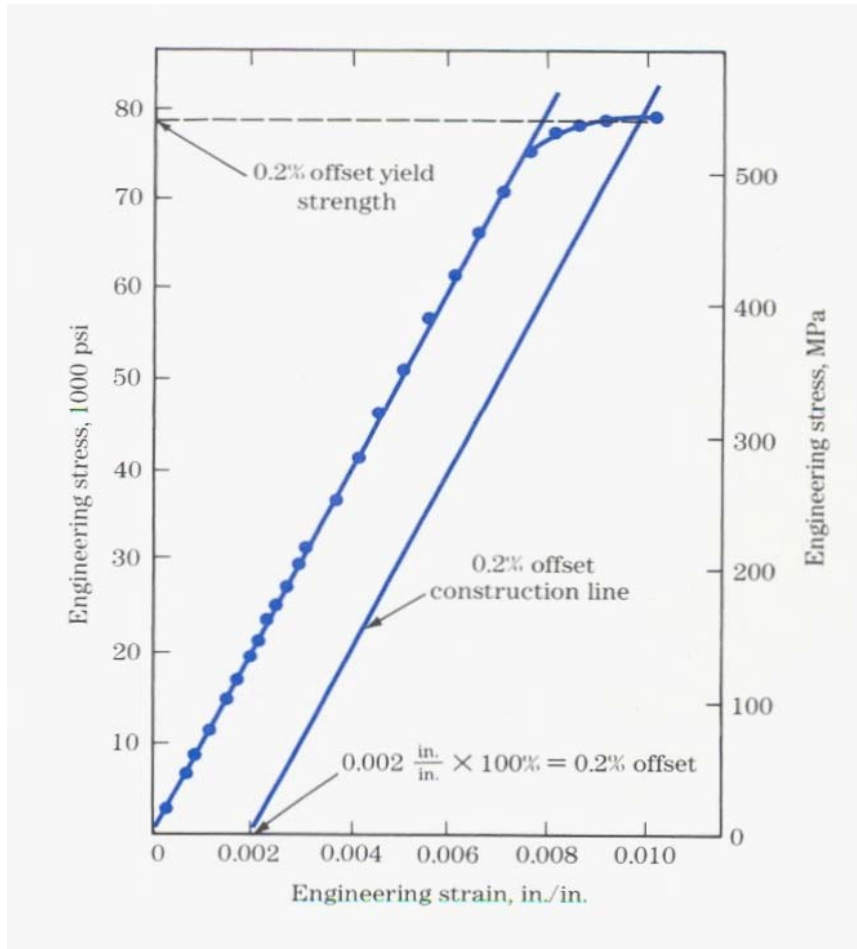


Figura 3.3 Esfuerzo de Cedencia sobre una Gráfica de Tensión

b) **Esfuerzo a tensión:** Este se define como la relación de la máxima carga soportada durante la prueba de tensión entre el área de la sección transversal original. Si seguimos el comportamiento que tiene la probeta durante la prueba, observaremos que al llegar a la carga de cedencia la probeta sufre una reducción de

área en su sección transversal ocasionando lo que llamamos **cuello de botella** y por consiguiente, la carga que la probeta resiste comienza a decrecer hasta llegar a la ruptura de esta.

c) **Módulo Elástico:** El módulo elástico ó módulo de Young, se determina la rigidez de un material, la cual se define como la capacidad de resistencia a la deformación, esto nos indica la capacidad que tiene el material a ser deformado elásticamente. Este valor se obtiene a partir de la gráfica Carga VS Elongación, al dividir un incremento del esfuerzo entre un incremento de elongación pertenecientes a la zona elástica, las unidades de este valor son PSI en el sistema ingles y Páscales en el sistema métrico.

$$\text{Módulo de elasticidad } E = \frac{\Delta \text{ esfuerzo}}{\Delta \text{ Elongación}}$$

d) **Porcentaje de Elongación:** El resultado de esta evaluación nos indicara la ductilidad con la que cuenta el material, esto significa la capacidad que tiene el material para deformarse antes de llegar al punto de ruptura del mismo. El porcentaje de elongación se define restando la longitud final de la probeta menos la longitud inicial de la misma y el resultado se divide entre la longitud inicial y se multiplica por cien. Esto es:

$$\% \text{ de Elongación} = \frac{L_f - L_i}{L_i} * 100$$

e) **Porcentaje de Reducción de Área:** La ductilidad de un metal también se puede expresar en términos del porcentaje de reducción de área que sufre el material durante la prueba. El porcentaje de reducción de área se define restando al área final de la probeta el área inicial de la misma y el resultado se divide entre el área inicial y se multiplica por cien. Esto es:

$$\% \text{ de Reducción de Área} = \frac{A_i - A_f}{A_i} * 100$$

Resultados Prueba de Tensión

Una vez que hemos analizado y justificado la importancia que tiene el realizar una prueba de tensión y las propiedades que podemos conocer en base a ella, se presentaran los resultados obtenidos durante la prueba de tensión realizada a probetas de acero inoxidable 316LS de 8, 9 y 10 mm de diámetro y de titanio Ti-6Al-4V^a (ASTM grado 5) de 13mm de diámetro. Además de los resultados obtenidos a partir del análisis práctico se muestran las gráficas obtenidas en cada una de las pruebas.

Acero Inoxidable 316LS

a) Esfuerzo y Carga de Cedencia.

Probeta 1: Carga de Cedencia = 3529 Kg.

Esfuerzo de cedencia = 688.8 MPa.

Probeta 2: Carga de Cedencia = 4447 Kg.

Esfuerzo de cedencia = 685.74MPa.

Probeta 3: Carga de Cedencia = 6441 Kg.

Esfuerzo de cedencia = 804.52MPa.

b) Esfuerzo a Tensión y Carga Máxima.

Probeta 1: Carga Máxima = 5000 Kg.

Esfuerzo a tensión = 975.92MPa.

Probeta 2: Carga Máxima = 6300 Kg.

Esfuerzo a tensión = 971.48MPa.

Probeta 3: Carga Máxima = 9125 Kg.

Esfuerzo a tensión = 1139.76MPa.

c) % de Elongación.

Probeta 1: 23.5 % de elongación ($l_i = 40\text{mm}$, $l_o = 49.4\text{mm}$).

Probeta 2: 18.8% de elongación ($l_i = 45\text{mm}$, $l_o = 53.5\text{mm}$).

Probeta 3: 16% de elongación ($l_i = 50\text{mm}$, $l_o = 58\text{mm}$).

d) % de Reducción de Área.

Probeta 1: 45.125 % de reducción de área ($d_i = 8\text{mm}$, $d_o = 4.39\text{mm}$).

Probeta 2: 42.77 % de reducción de área ($d_i = 9\text{mm}$, $d_o = 5.15\text{mm}$).

Probeta 3: 44 % de reducción de área ($d_i = 10\text{mm}$, $d_o = 5.6\text{mm}$).

e) Módulo Elástico.

$E = 170 \text{ GPa}$. (valor teórico).

Aleación de Titanio Ti-6Al-4V^a (ASTM grado 5)

a) Esfuerzo y Carga de Cedencia.

Probeta 1: Carga de Cedencia = 5500

Esfuerzo de Cedencia =406.49MPa.

Probeta 2 (Datos Empíricos): Esfuerzo de Cedencia = 993MPa

b) Esfuerzo a Tensión y Carga Máxima.

Probeta 1: Carga de Máxima = 8375kg.

Esfuerzo a Tensión =618.98MPa

Probeta 2 (Datos Empíricos): Esfuerzo a Tensión = 924MPa

c) % de Elongación.

Probeta 1: % de Elongación = No se aplica

Probeta 2 (Datos Empíricos): % de Elongación = 14 %

d) % de Reducción de Área.

Probeta 1: % de Reducción de Área = No se aplica

Probeta 2 (Datos Empíricos): % de Reducción de Área = 30%

e) Módulo Elástico.

E = 117 GPa.

Es importante mencionar que la medida de evaluación para calcular el porcentaje de elongación fue 5 veces el diámetro de la probeta, esto debido a cumplir con la estandarización en las normatividad de la prueba de tensión. La clasificación de las probetas es la siguiente: Probeta 1: Probeta de 8mm de diámetro, Probeta 2: Probeta de 9mm de diámetro y Probeta 3: Probeta de 10mm de diámetro en el caso de las probetas de Acero Inoxidable 316LS y para el caso del Titanio Ti-6Al-4V^a ASTM grado 5 las probeta tienen un diámetro de 13mm.

En el caso de las probetas Titanio Ti-6Al-4V^a ASTM grado 5 es necesario aclarar que los resultados presentados con nomenclatura de probeta # 1, se obtuvieron de una probeta que constaba con dos barrenos en su parte inferior y aun y cuando los barrenos no se encontraban dentro de la longitud establecida a evaluar, la fractura se origino en uno de los barrenos, es por esto que en algunos casos aparece “No se aplica”. La probeta con nomenclatura # 2 era sólida en su totalidad y no se logro obtener ninguna información en base a la prueba, esto se debió a que la maquina de prueba de tensión no cuenta con las características necesarias para evaluar una aleación de este tipo. Se intento realizar la prueba en dos ocasiones pero en ninguna de las dos se logro un resultado satisfactorio, el principal problema se presento en la forma de sujeción del dispositivo. Por esta razón, aparecen datos empíricos que nos dan una idea de las características de la aleación [4] .

A continuación se presentan las gráficas que se obtuvieron de la prueba de tensión en cada una de las probetas.

Prueba de Tensión

Barra de acero Inoxidable 316LS

Diámetro = 8mm

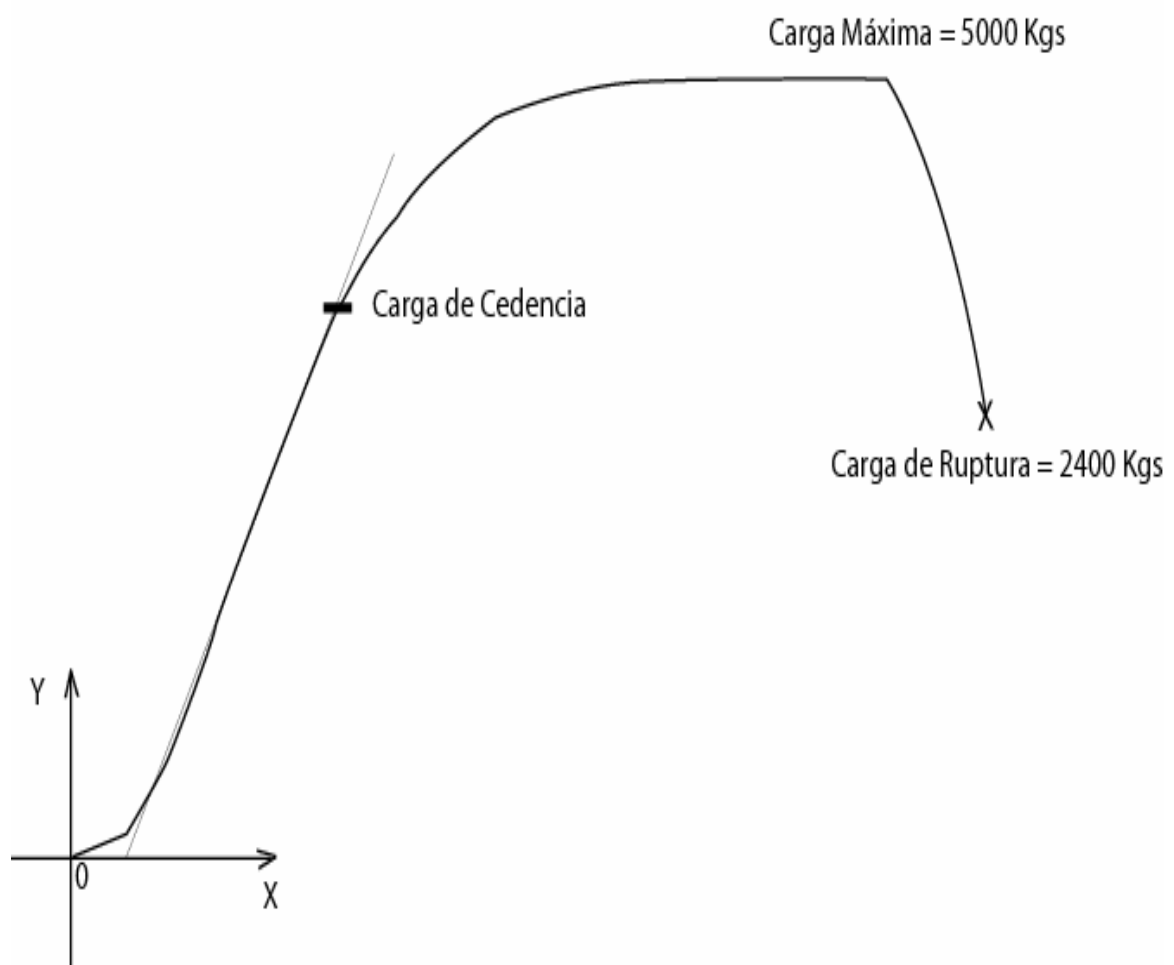


Figura 3.4 Gráfica de Tensión.

Prueba de Tensión

Barra de acero Inoxidable 316LS

Diámetro = 9mm

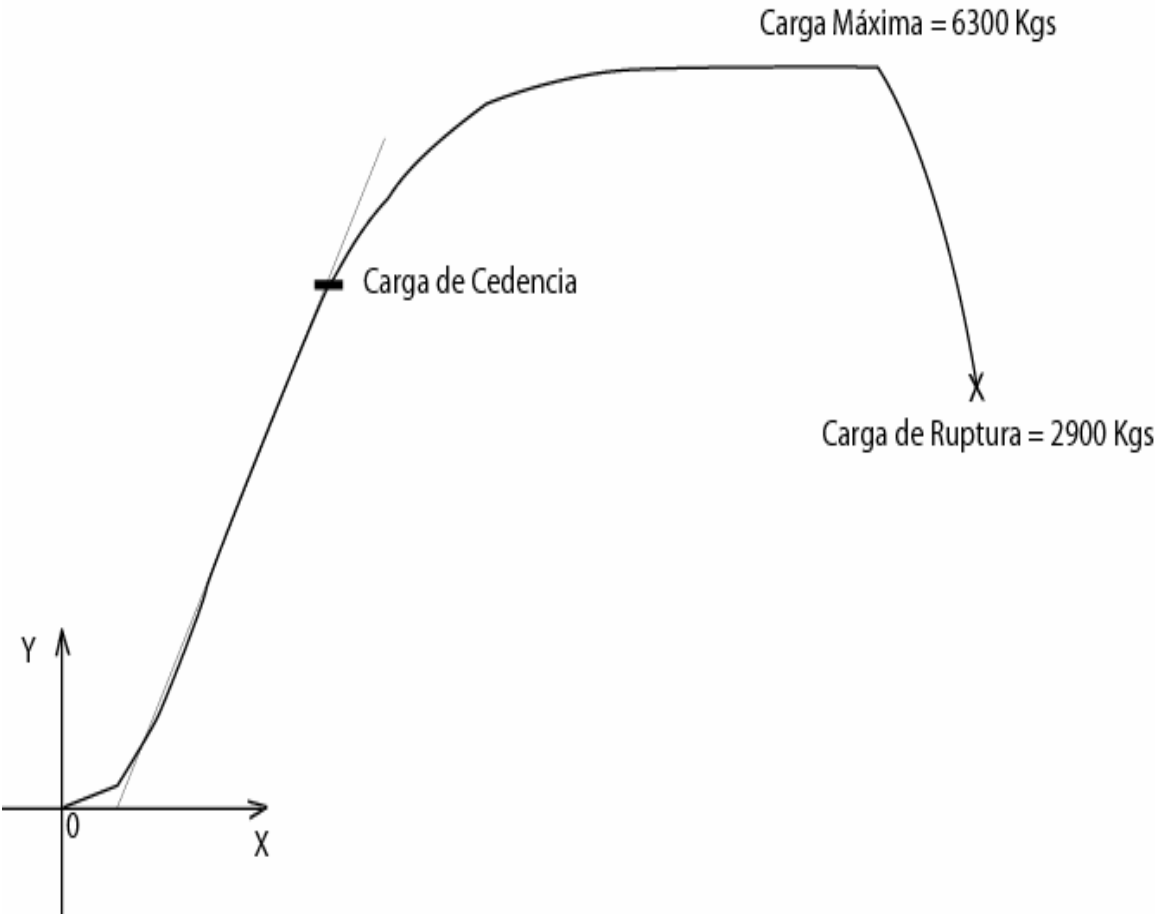


Figura 3.5 Gráfica de Tensión.

Prueba de Tensión

Barra de acero Inoxidable 316LS

Diámetro = 10mm

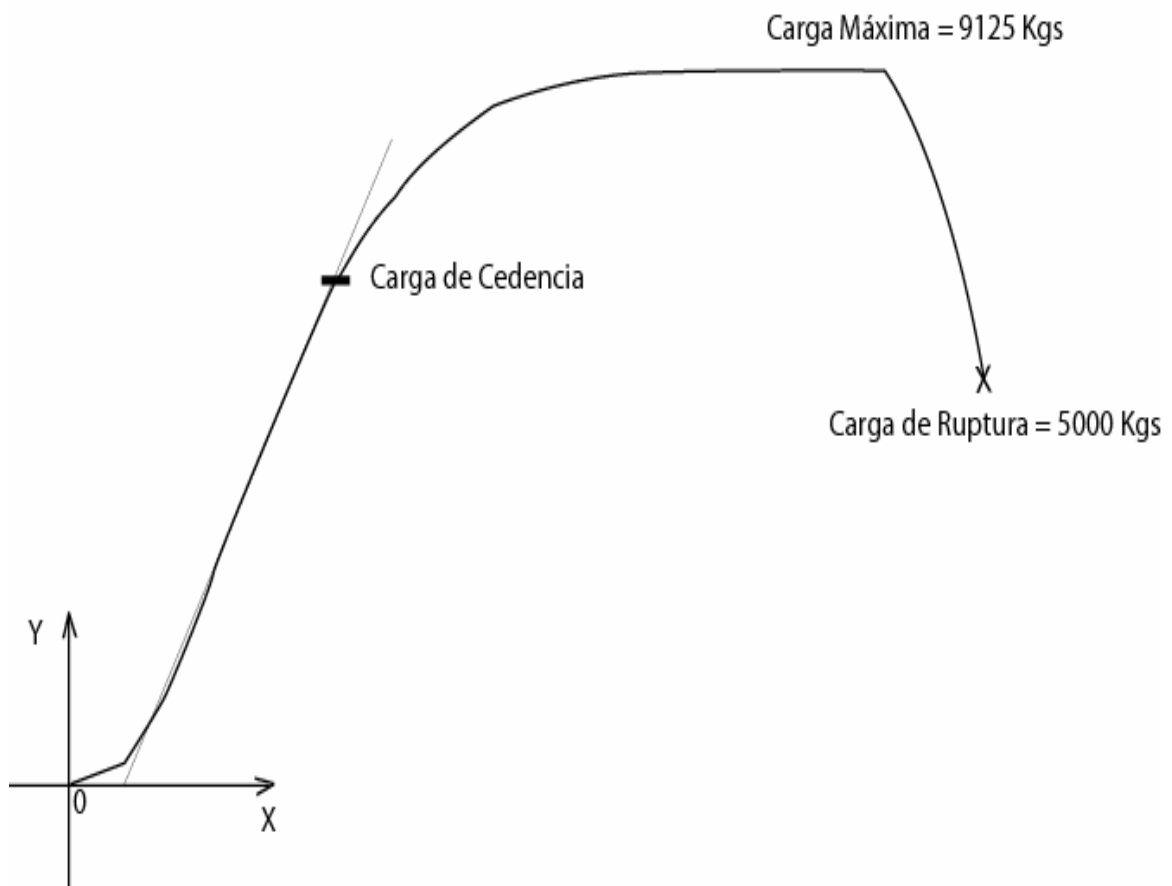


Figura 3.6 Gráfica de Tensión.

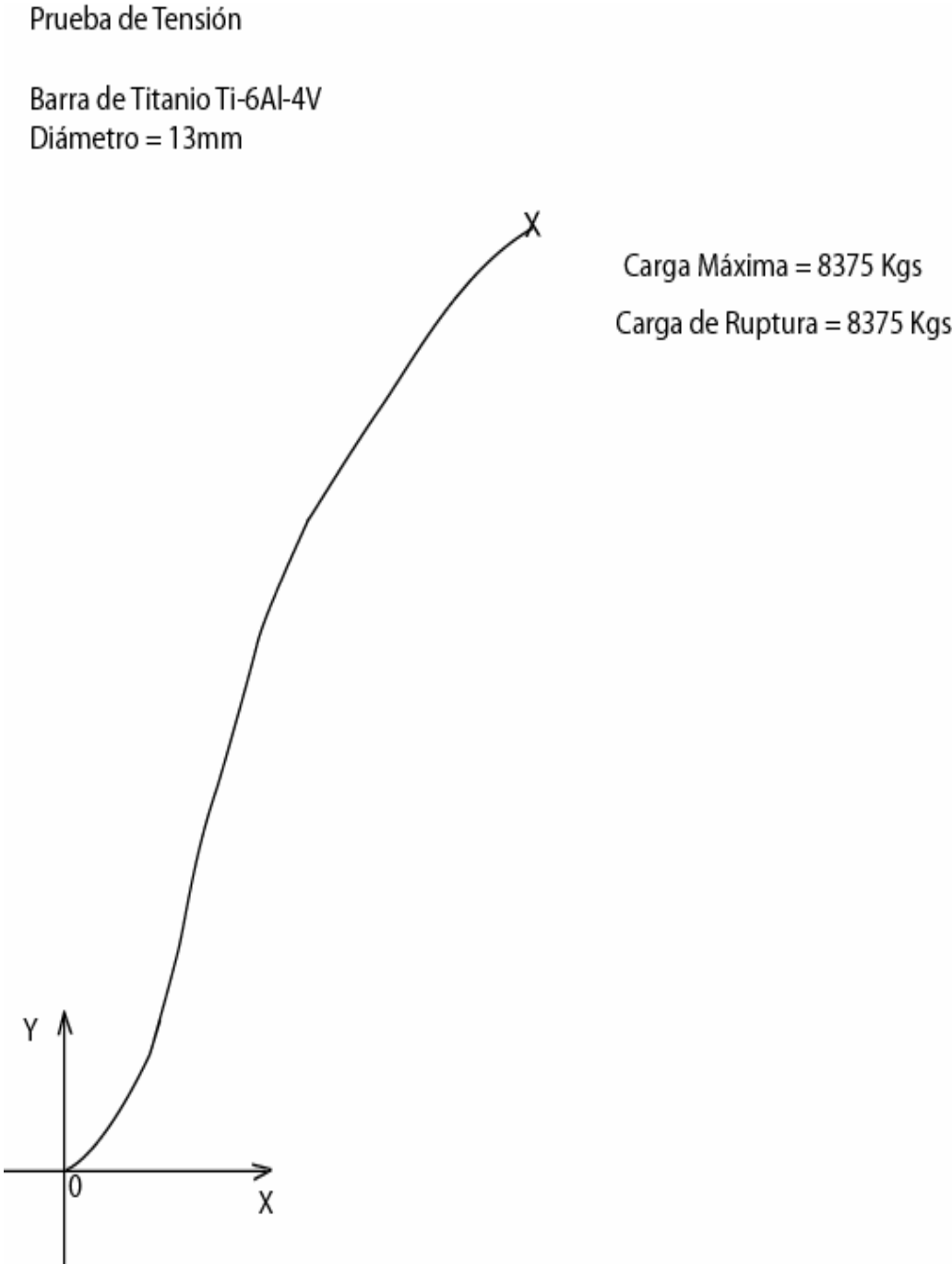


Figura 3.7 Gráfica de Tensión.

3.3 Prueba de Impacto

El objetivo principal de la prueba de impacto es observar el comportamiento de un material al ser impactado por un objeto en un punto específico. La prueba de impacto, es probablemente una de las más difíciles de interpretar en términos científicos, esto se debe a que hay que entender conceptos como energía y tenacidad para entender los resultados.

Se define como **Tenacidad** la cantidad de energía que puede absorber un material antes de fracturarse. Por otro lado, la **Energía** es la capacidad para realizar un trabajo debido a una fuerza que recorre una cierta distancia, de ahí el origen de la siguiente ecuación [7]:

$$W = F * D$$

Donde

W = Trabajo (Newtons por Metro o Libras por Pies).

F = Fuerza (Newtons o Libras).

D = Distancia (Metros o Pies).

Un ejemplo de una prueba de impacto consistiría en dejar caer un objeto de un peso conocido desde una cierta altura y que este impactara al material, para conocer la energía que el material absorbería utilizaríamos la siguiente ecuación:

$$E = W * h$$

Donde

E = Energía absorbida (Newtons por Metro o Libras por Pies).

W = Peso del objeto (Newtons o Libras).

h = Altura desde la que se deja caer el objeto (Metros o Pies).

Sin embargo este tipo de prueba no cumple con ninguna norma de estandarización, es por esto que existen dos tipos de pruebas estandarizadas [7]:

- 1) Prueba de Impacto Charpy
- 2) Prueba de Impacto Izod.

Estas pruebas de impacto consisten en golpear una probeta con un péndulo que es colocado a un cierto ángulo del punto de impacto. Las probetas que se utilizan para realizar esta prueba, tienen como característica principal una ranura en la parte posterior de donde se genera el impacto, el propósito principal de esto es que se genere una concentración de esfuerzos y la energía no se distribuya a lo largo de la probeta y se concentre en un solo punto, ya que de lo contrario la energía podría producir una deformación plástica provocando que la probeta se doblara y no que se rompiera.

Las principales diferencias entre las dos pruebas son la velocidad con la que se golpea la probeta y la posición de la probeta. En el caso de la prueba Izod, la probeta se sujeta de forma horizontal y es golpeada a una velocidad de 11.5 ft/s. Mientras tanto en la prueba Charpy, la probeta se sujeta de forma horizontal y se golpea a una velocidad de 17.5ft/s.

Procedimiento y Desarrollo

Para realizar la prueba de impacto el péndulo se coloca en un ángulo inicial, se libera y golpea la probeta. Si la trayectoria del péndulo fuera sin golpear la probeta, teóricamente el péndulo alcanzaría el ángulo de inicio en el extremo contrario, suponiendo que no se generara ninguna fricción. Con la probeta colocada en la trayectoria del péndulo, parte de la energía generada por la caída del péndulo será absorbida por la probeta, esto tendrá como resultado que el péndulo no alcance el mismo ángulo en el extremo contrario.

Para calcular la energía que la probeta absorbe utilizamos la siguiente ecuación [7]:

$$E = W * R * (\cos B - \cos A)$$

Donde:

E = Energía absorbida por la probeta (Newtons por Metro o Libras por Pies).

W = Peso del péndulo (Newtons o Libras).

R = Radio de giro del péndulo (Metros o Pies).

A = Angulo inicial (Grados).

B = Angulo final (Grados)

Resultados

Para el desarrollo de esta investigación se utilizo el concepto de la prueba de impacto Charpy, se utilizaron tres probetas de Acero Inoxidable 316LS y una de Titanio Ti-6Al-4V^a ASTM grado 5. A continuación se presenta el resultado obtenido en cada probeta:

Probeta # 1 Acero Inoxidable 316 LS

Datos de la probeta:

Probeta circular de 10mm de diámetro y 58mm de largo, esta probeta no tenía ranura en su centro. Para observar el comportamiento del dispositivo quiropráctico se utilizaron los barrenos del clavo como ejes de concentración de esfuerzos, estos barrenos tienen un diámetro de 4.34mm y se encuentran a una distancia de 5mm del centro de la probeta en ambas direcciones. El péndulo golpeo el centro de la probeta, o sea entre los dos barrenos.



Datos del péndulo:

$$W = 26.105 \text{ Kg.} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 256.09 \text{ N.}$$

$$R = 0.750\text{m}$$

$$A = 135^\circ$$

$$B = 76^\circ$$

$$\text{Energía Absorbida} = 185.5229 \text{ N*m}$$

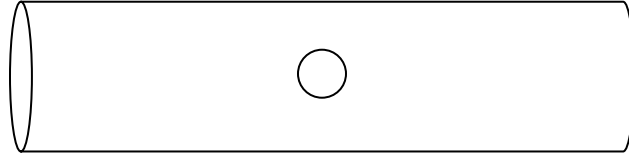
La fractura de la probeta fue de forma total y la falla se presentó en uno de los barrenos, los barrenos se encontraban colocados de frente al péndulo a la hora del impacto (de forma horizontal).

Probeta # 2 Acero Inoxidable 316 LS

Datos de la probeta:

Probeta circular de 10mm de diámetro y 58mm de largo, esta probeta no tenía ranura en su centro. Para observar el comportamiento del dispositivo quiropráctico se utilizó uno de los barrenos del clavo como ejes de concentración de esfuerzos, este barreno

tienen un diámetro de 4.34mm y se encuentra en la parte central de la probeta. El péndulo golpeo el centro de la probeta



Datos del péndulo:

$$W = 26.105 \text{ Kg.} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 256.09 \text{ N.}$$

$$R = 0.750\text{m}$$

$$A = 135^\circ$$

$$B = 3^\circ$$

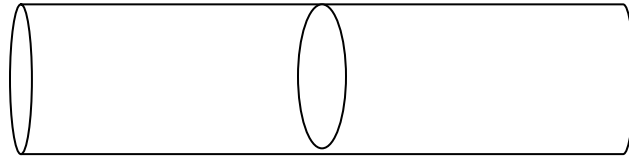
$$\text{Energía Absorbida} = 327.6166 \text{ N*m}$$

La probeta sufrió una fractura de forma parcial y presento una deformación plástica con origen en el barreno. El barreno se encontraba colocado de forma horizontal a la hora del impacto.

Probeta # 3 Acero Inoxidable 316 LS

Datos de la probeta:

Probeta circular de 10mm de diámetro y 58mm de largo, esta probeta tenía una ranura en su centro con una profundidad de 2mm. El péndulo golpeo el centro de la probeta por la parte posterior de donde se encontraba la ranura.



Datos del péndulo:

$$W = 26.105 \text{ Kg.} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 256.09 \text{ N.}$$

$$R = 0.750\text{m}$$

$$A = 135^\circ$$

$$B = 70^\circ$$

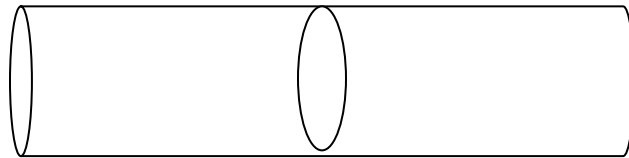
$$\text{Energía Absorbida} = 201.5032 \text{ N*m.}$$

La probeta se fracturo de forma total y la falla se presento en la ranura, se observa un poco de deformación plástica en la probeta.

Probeta # 1 Titanio Ti-6Al-4V^a ASTM grado 5

Datos de la probeta:

Probeta circular de 13mm de diámetro y 58mm de largo, esta probeta tenía una ranura en su centro con una profundidad de 2.5mm. El péndulo golpeo el centro de la probeta por la parte posterior de donde se encontraba la ranura.



Datos del péndulo:

$$W = 26.105 \text{ Kg} * 9.81 \text{ m/s}^2 = 256.09 \text{ N.}$$

$$R = 0.750\text{m}$$

$$A = 135^\circ$$

$$B = 61^\circ$$

$$\text{Energía Absorbida} = 228.9284 \text{ N*m.}$$

La probeta se fracturo de forma total y la falla se presento en la ranura, no se observa deformación plástica en la probeta.

Prueba de Impacto

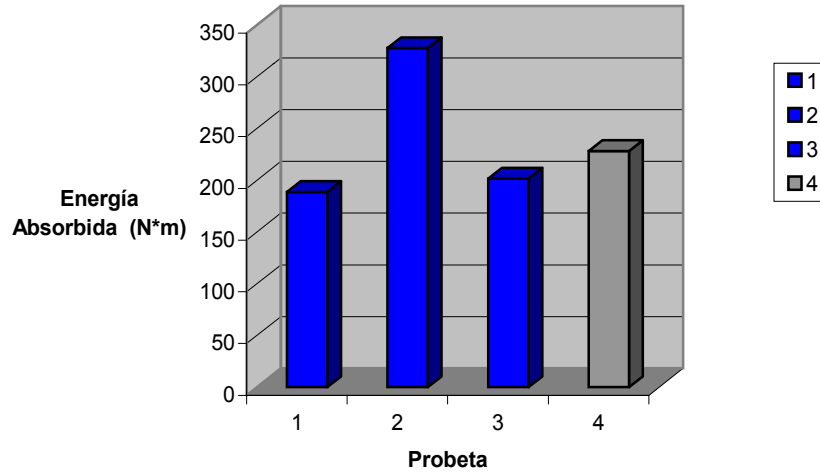


Figura 3.8 Gráfica de Prueba de Impacto.