

TECNOLOGÍA DE LOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

Ensayo de Tracción en Barras de Acero Liso y Conformado

Objeto: Determinar la carga de rotura y la carga de donde se produce la fluencia del material. Determinar el módulo E

Norma a considerar: Norma IRAM – IAS U 500-102, parte I y parte II

Para que las máquinas y estructuras funcionen apropiadamente, su diseño requiere que entendamos el comportamiento mecánico de los materiales usados. Por lo general, la única manera de establecer el comportamiento de los materiales cuando están sometidos a cargas, es llevar a cabo experimentos en el laboratorio. El procedimiento usual es colocar pequeñas probetas del material en máquinas de prueba, aplicar las cargas y medir las deformaciones resultantes (como cambios de longitud y diámetro).

El Ensayo de Tracción es un ensayo estático que consiste en aplicar a una probeta de forma y dimensiones normalizadas, o no, en la dirección de su eje longitudinal y en el sentido de alargarla, un esfuerzo creciente, hasta alcanzar la rotura.

Con este ensayo podemos verificar el comportamiento de los metales cuando están sometidos a cargas estáticas, pues no solo permite deducir algunas de sus propiedades tecnológicas más importantes (tenacidad, ductilidad, etc) si no que también se puede obtener el límite de elasticidad, la carga máxima y la consiguiente resistencia estática, en base a cuyos valores se puede determinar la tensión admisible o de trabajo. En resumen mediante el ensayo de tracción es posible determinar los siguientes parámetros característicos de un metal:

1. Resistencia a Tracción (σ_r).
2. Límite de Fluencia (cuando el comportamiento plástico del metal así lo permite (σ_f)).
3. Alargamiento específico de rotura (δ).
4. Contracción específica de rotura (estricción) (ψ)

Preparación de la probeta

Se denomina probeta al trozo de material que reúne las condiciones para ser sometido al ensayo.

Desde el punto de vista del fin perseguido por el ensayo, las probetas pueden clasificarse en:

- Probetas industriales
- Probetas calibradas

Se denominan **probetas industriales** aquellas que se extraen de un lote entregado por un proveedor.

Las **probetas calibradas** son las empleadas en ensayos más rigurosos de determinación de las características físicas de un material.

En este caso vamos a ensayar una barra lisa y una barra conformada de un diámetro a determinar.

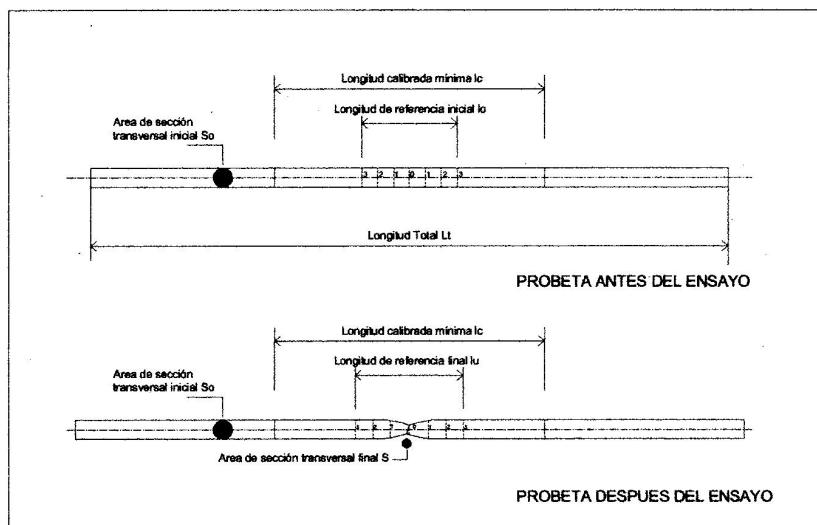


Figura 1

Medidas

La longitud calibrada (l_c) de las probetas mecanizadas no debe ser menor que $l_o + d/2$ para probetas de sección circular, ni menor que $l_o + 1.5 \sqrt{S_o}$ para probetas de sección prismática.

La longitud libre entre mordazas de la máquina será suficiente para que las marcas extremas de la longitud de referencia queden a una distancia de las mordazas no menor que dos diámetros equivalentes. (fig. 1)

Longitud de referencia inicial (l_o)

Probetas proporcionales normales

Son las probetas proporcionales donde la longitud de referencia inicial

$l_o = K \times \sqrt{S_o}$, se calcula con una constante de proporcionalidad $K = 5.65$.

$l_o = 5.65 \times \sqrt{S_o}$ para probetas de sección prismática

$l_o = 5 \times d$ para probetas de sección circular.

Las medidas recomendadas de las probetas proporcionales normales de sección circular son las que se indican en la tabla 1.

Tabla 1

| K | Diámetro d (mm) | Área de la sección transversal inicial S_o (mm^2) | Longitud de referencia inicial $l_o = 5.65 \times \sqrt{S_o}$ | Longitud calibrada mínima l_c (mm) | Longitud total l_t |
|------|-------------------|--|---|--------------------------------------|---|
| 5.65 | 20 | 314 | 100 ± 1.0 | 110 | Depende del método de fijación de la probeta en la mordazas de la máquina |
| | 12 | 113 | 60 ± 0.6 | 66 | |
| | 10 | 78.5 | 50 ± 0.5 | 55 | |
| | 5 | 19.6 | 25 ± 0.25 | 28 | |

Longitud de referencia final (l_u)

La existente luego de la rotura de la probeta, cuando las partes son cuidadosamente unidas y alineadas.

Diagrama característico

Consideremos una probeta cilíndrica sometida a un esfuerzo variable en forma lenta, gradual y progresivo. Para ello someteremos a la probeta a un sistema de dos fuerzas (P) iguales y contrarias, cuya dirección coincide con el eje de la misma; a cada valor de P le corresponderá un valor de la deformación, que en este caso será un alargamiento. Las máquinas utilizadas en este tipo de ensayo están equipadas generalmente con un dispositivo auxiliar que permitirá registrar las variaciones sucesivas de carga y deformación que alcanza la probeta, referidas a un sistema de ejes cartesianos coordinados ortogonales. Se obtiene de esta manera el **diagrama característico del ensayo de tracción**, que tiene una forma particular para cada metal, aleación u otro tipo de material.

El diagrama clásico corresponde a un acero de bajo tenor de carbono (acero dulce de 0.10% de carbono) SAE 1010 por ejemplo, es el que se ilustra en la figura 2.

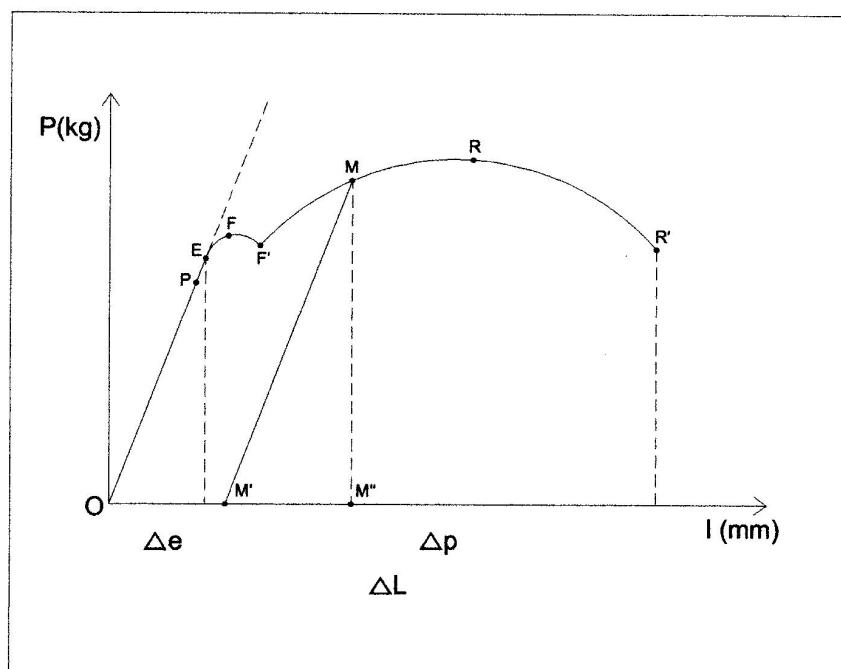


Figura 2

En el se distingue:

OP : es una zona dentro de la cual existe proporcionalidad entre las deformaciones y las cargas que las originan (ley de Hooke).

E : es un punto límite; dentro del tramo OE el material se comportará como un cuerpo perfectamente elástico. Si dentro de ese tramo del diagrama, se

procede a la descarga de la probeta, la curva representativa de este periodo de descarga, coincidirá con la curva del periodo de carga.

Toda la deformación es elástica y por consiguiente no se observarán deformaciones permanentes. Pasado el punto E, existen deformaciones permanentes, vale decir, que si se descarga la probeta en un punto tal como el M, el diagrama de descarga seguirá la recta MM' sensiblemente paralela a OP.

La deformación total correspondiente al punto M (OM''), estará constituida por una deformación elástica (M'M''), y por una deformación permanente OM'.

FF': en este tramo se observa que los alargamientos aumentan notablemente, sin que se produzca un aumento en el esfuerzo, en algunos casos, como el de la fig. 2, el diagrama acusa una disminución del esfuerzo.

F'R': en este tramo la probeta continúa soportando los esfuerzos crecientes, pero con alargamientos notables. Para un aumento unitario del esfuerzo, los alargamientos correspondientes, serán mucho mayores que en el tramo OE.

RR': en el punto R, la probeta alcanza su resistencia máxima. Pasado dicho punto, la curva del diagrama desciende de acuerdo a la disminución de la resistencia de la probeta.

Durante el periodo OR, correlativamente a los alargamientos producidos según su eje longitudinal, se verifica una contracción según el diámetro de la probeta, vale decir, que bajo un esfuerzo P_x el diámetro será d_x , menor que el diámetro primitivo. Esta contracción es uniforme, cualquiera sea la sección de la probeta que se considere. Alcanzado el punto R y durante el tramo RR', la probeta presentará una contracción localizada, cuyo valor se hace mas notable a medida que avanza el ensayo. Esta contracción localizada se denomina **Estricción**. Alcanzado el punto R' se produce la rotura de la probeta en la sección de estricción.

Δe : deformación elástica.

Δp : deformación plástica permanente.

Δl : deformación total

El diagrama así establecido será únicamente valido para un determinado material y para un tipo de probeta determinado; pues es evidente que la carga máxima alcanzada dependerá de su sección, o sea, del diámetro de la probeta, y los alargamientos, de su longitud inicial. Para obtener valores independientes del tipo de probeta y que solamente dependa del tipo de material, es decir, coeficientes que nos indiquen características propias del material (que es el fin a perseguir en los ensayos), será necesario referir los esfuerzos producidos a la sección unitaria, y los alargamientos a la longitud unitaria, quedando así transformado el diagrama obtenido directamente del ensayo (fig. 2)

Transformación del diagrama

Refiriendo los esfuerzos a la sección inicial, y los alargamientos a la longitud inicial.

Coeficiente de dilatación y módulo de elasticidad

Consideremos que la probeta de ensayo, cuyo diagrama corresponde a la fig. 2, presenta antes de iniciar el ensayo, una sección transversal S_0 y una

longitud l_0 . Como longitud l_0 , no se considera la longitud total de la probeta, sino la distancia entre dos puntos de referencia tomados en el cuerpo calibrado de la misma.

De acuerdo a lo establecido anteriormente, referimos los esfuerzos P sufridos por la probeta, a la sección inicial, y sus alargamientos a la longitud inicial. Tendremos entonces:

$$\sigma = \frac{P}{S_0} \quad \epsilon = \frac{l}{l_0}$$

El valor de σ es, entonces el esfuerzo por unidad de sección y se lo denomina Tensión. Su unidad será Kg/cm^2 , kg/mm^2 , tn/cm^2 , MPa , etc, según las unidades de P y S_0 que se hayan adoptado.

El valor de ϵ es el alargamiento unitario o específico, y será un número puro por cuanto l y l_0 estarán expresados en la misma unidad. Sustituyendo lo anterior, podemos expresar el diagrama obtenido en el ensayo (fig. 2) refiriéndolo a σ y ϵ , en lugar de P y l .

Por consiguiente la forma del diagrama no variaría, ya que estamos dividiendo por valores constantes (S_0 y l_0), solamente cambiarán las escalas. (fig. 3)

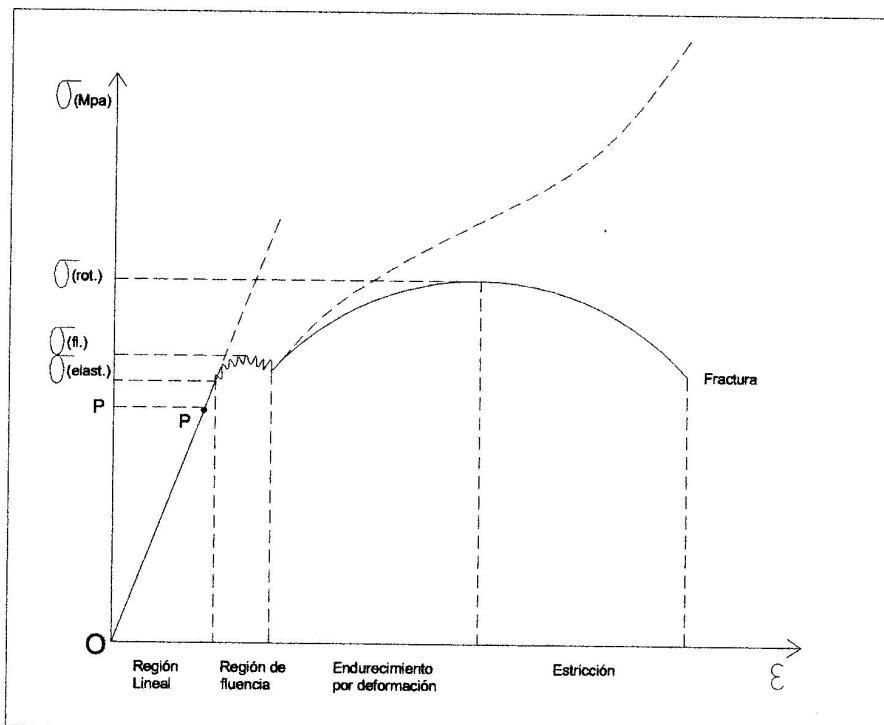


Figura 3

Para el punto P de la figura 3 tendremos una cierta tensión σ_P que se denomina Límite de Proporcionalidad. Hasta este límite (recta OP) podremos escribir:

$$\epsilon = \alpha \times \sigma, \text{ siendo } \alpha \text{ un coeficiente de proporcionalidad.}$$

Para $\sigma = 1$, $\alpha = \epsilon$; de donde se deduce que α representa el alargamiento unitario cuando la probeta sufre una tensión igual a la unidad. De acuerdo a este criterio α representa el coeficiente de dilatación elástica.

En general, en lugar de α , en los cálculos de resistencia de materiales, se utiliza con frecuencia el valor inverso, que llamaremos E , es decir

$$E = \frac{1}{\alpha}; \epsilon = \frac{\sigma}{E} \therefore E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

De acuerdo con esta última expresión, el valor de E estará representado por la tangente trigonométrica del ángulo que forma la recta OP con el eje de las abscisas. Lógicamente en ese tramo del diagrama E tendrá un valor constante.

El coeficiente E se denomina **MODULO DE ELASTICIDAD**, y tendrá la misma dimensión que la tensión, por ejemplo Kg/mm^2 , es necesario tener presente que no se trata de una tensión, sino que indica una característica del material en cuestión.

Valores medios del módulo de elasticidad para diversos materiales:

| | Modulo de Elasticidad E |
|-----------|----------------------------|
| Acero | 2.100.000 kg/cm^2 |
| Fundición | 1.000.000 kg/cm^2 |
| Bronce | 800.000 kg/cm^2 |

De la ecuación $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, y siendo $\sigma = \frac{P}{S_0}$ y $\epsilon = \frac{l}{l_0}$ deducimos

$$l = \frac{P \times l_0}{S_0 \times E}$$

Ley de Hooke

Esta expresión, fundamental en los cálculos de resistencia, expresa que el alargamiento experimentado por la probeta, es proporcional al esfuerzo aplicado y a su longitud inicial, e inversamente proporcional a su sección inicial y al módulo de elasticidad. Esta ley es válida evidentemente en el periodo de proporcionalidad, acusado en el tramo rectilíneo del diagrama.

Esta expresión de la proporcionalidad entre tensiones y deformaciones específicas, como ya se ha visto, puede escribirse $\epsilon = \alpha \times \sigma$.

Pero la proporcionalidad no puede considerarse en todos los casos como una ley rigurosa, si bien es aproximadamente exacta para determinados materiales, tales como el acero por ejemplo; para otros ya no lo es, y debido a ello es que recurrimos en esos casos a la expresión de Bach: $\epsilon = \alpha \times \sigma^m$ que es de carácter más general, y en donde α como m son constantes que dependen del material.

Límites de elasticidad y de fluencia

Según se estableció anteriormente, existe un punto E en el diagrama hasta donde podemos, con buena aproximación, suponer la validez de la ley de Hooke. La tensión correspondiente a ese punto E se la denomina TENSIÓN LÍMITE DE ELASTICIDAD σ_E .

Igualmente, la tensión correspondiente al punto F en el cual el material comienza a fluir, es decir, a deformarse considerablemente sin aumento apreciable por parte del esfuerzo, se llama LÍMITE DE FLUENCIA σ_F .

El límite de fluencia es más o menos notable según el material que se considere; así por ejemplo es perfectamente definido en los aceros dulces, mientras que en los duros prácticamente no se revela.

Respecto al límite de elasticidad, existen tres maneras de determinarlo, a saber:

- 0 Límite teórico: es la tensión límite para la cual los alargamientos permanentes son nulos, o adquieren una valor suficientemente pequeño como para poder ser despreciable. En este caso se toma como valor límite de los alargamientos permanentes 0.001% de lo.
- 1 Límite aparente de elasticidad: es el valor de la tensión correspondiente al límite de fluencia.
- 2 Límite práctico de elasticidad: es la tensión que produce un alargamiento permanente de 0,2% de lo.

De acuerdo a lo que antecede, veamos los distintos métodos para determinar el LÍMITE DE ELASTICIDAD.

Para el límite teórico se precisa un elastímetro de precisión; se somete a la probeta a esfuerzos crecientes. Entre dos estados de carga, se descarga la probeta y se verifica si se han producido alargamientos permanentes. La mayor tensión que es posible alcanzar sin que se revelen alargamientos permanentes superiores al 0.001% de lo, es el límite teórico de elasticidad.

El límite aparente, que no es otra cosa que el límite de fluencia, se puede determinar directamente del diagrama, o bien cuando en el ensayo la aguja de la máquina (o el fiel de la bascula) se detiene o sufre un retroceso. La tensión indicada será la correspondiente al punto de fluencia.

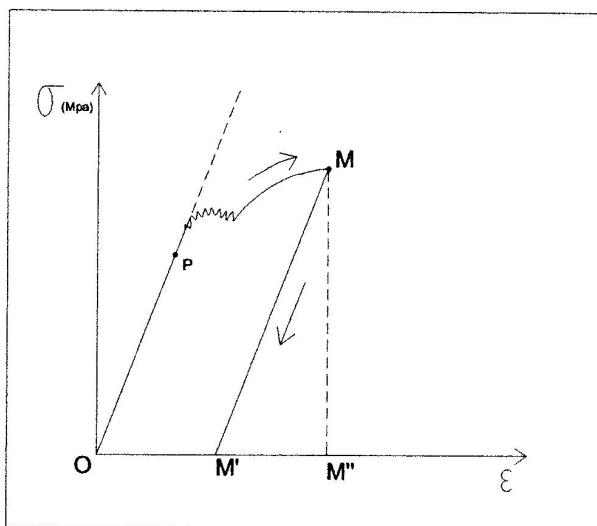


Figura 4

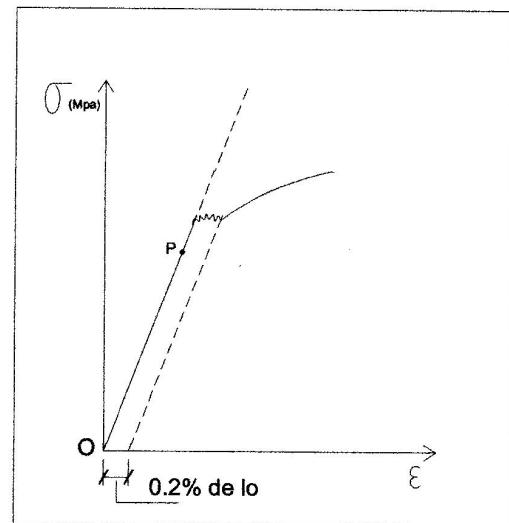


Figura 5

Para calcular el límite práctico de elasticidad, observamos que si durante el periodo de carga se llega a un punto cualquiera tal como el M (fig. 4) y se hace cesar el esfuerzo, la curva representativa del periodo de descarga MM', será sensiblemente paralela a OP y que el segmento OM' representará el valor de la deformación permanente correspondiente al punto M. Entonces para determinar el punto del diagrama cuyo alargamiento permanente es del 0.2 %, se procederá a la inversa, es decir dado un diagrama (fig. 5) se tomará sobre el eje de abcisas un segmento igual a 0.2% de lo y trazando por ese punto una paralela a OP, quedará determinado en su intersección con el diagrama el punto cuyo alargamiento permanente es precisamente del 0.2 % de lo. Este método es aplicable cuando se cuenta con un diagrama de ensayo suficientemente exacto.

Alargamiento de rotura

Producida la rotura de la probeta y habiendo cesado por consiguiente de actuar los esfuerzos sobre ella, el material habrá quedado con deformaciones permanentes, es decir que, si la longitud primitiva de la probeta era l_0 su longitud después de producida la rotura por tracción será l_f . Por consiguiente su alargamiento unitario de rotura será:

$$\epsilon = \frac{l_f - l_0}{l_0}; \text{ expresado en \% } \delta\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100$$

Estricción

Se había establecido ya que durante la marcha del ensayo, correlativamente al aumento de longitud de la probeta, se producía una disminución uniforme de su diámetro, contracción esta que, pasado el valor

máximo del esfuerzo (punto R de la figura 2), se localizaba en una sección en la cual se produciría luego la rotura.

Para determinar el valor de la contracción después de la rotura y siendo S_0 la sección primitiva de la probeta y S su sección en la zona de estricción, se

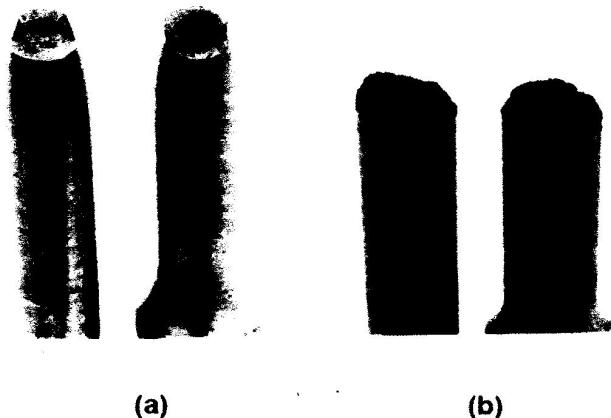
aplica la expresión: $\psi\% = \frac{S_0 - S}{S_0} \times 100$

Fractura copa y cono - Fractura plana.

Como resultado de la triaxialidad de tensiones producida por la estricción, se alcanza una situación en la que las pequeñas inclusiones no metálicas que contiene el material en la zona estriada o bien se fracturan o bien se decohesionan de la matriz metálica produciendo micro huecos que crecen gradualmente al ir progresando la deformación plástica, hasta coalescer. De este modo se genera una fisura interna plana en forma de disco orientada normalmente a la dirección del esfuerzo aplicado. Finalmente, la rotura se completa por corte a lo largo de una superficie cónica orientada a unos 45° del eje de tracción, dando origen a la clásica fractura copa y cono que se ilustra en la **Fig. (a)**.

La producción de la rotura a lo largo de la superficie cónica tiene su origen en el hecho que a medida que el vértice de la fisura plana en forma de disco se acerca a la superficie de la barra, se pierde triaxialidad de tensiones porque la tensión normal a la superficie libre es nula. Por lo tanto, la constricción plástica disminuye y consecuentemente las tensiones de corte a 45° del eje se tornan preponderantes, lo que conduce a la rotura plástica a lo largo de tales planos.

Si el material es frágil, o mediante una entalla superficial se induce un estado de triaxialidad superficial, tiende a suprimirse la zona cónica y se obtiene entonces una fractura plana como puede verse en la **Fig. (b)**.



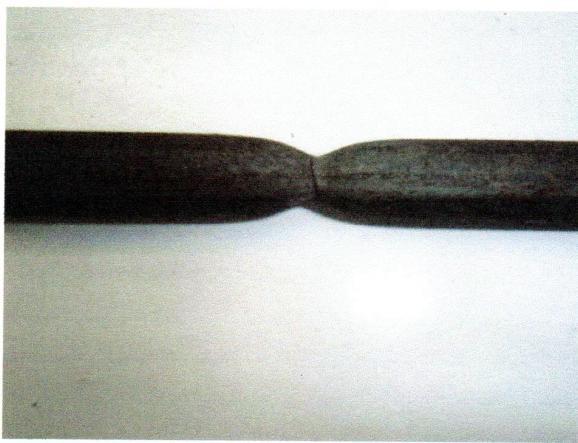


Foto 1 – Barra lisa vinculada



Foto 2 – Barra conformada vinculada

Máquina para el ensayo de tracción

Existen diversos tipos de máquinas para la realización de estos ensayos, con capacidad de carga variable desde el gramo a varios cientos de toneladas. La máquina de ensayo es una prensa hidráulica IBERTEST UIB con una capacidad de carga de 20.000 kg y graficador carga – desplazamiento. Esta además puede realizar ensayos de flexión y doblado. La misma consta de dos partes, la foto 3 corresponde al comando y la de la foto 4 es la máquina propiamente dicha, compuesta de un cilindro y un pistón movidos hidráulicamente. Las probetas son tomadas en unas mordazas que se encuentran en el cabezal fijo y en el móvil.



Foto 3 – Equipo de medición

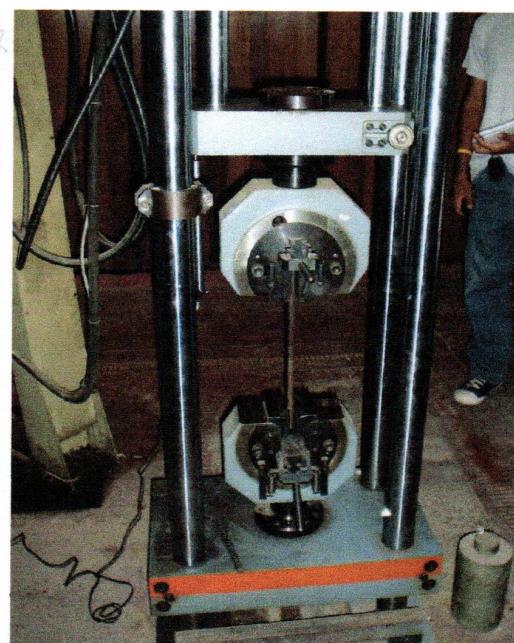


Foto 4 – Barra sometida a tracción