

TUES  
1503  
C1982  
2001  
Ej. 2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO  
PÉNDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXIÓN POR  
IMPACTO EN MATERIALES METÁLICOS”

PRESENTADO POR:  
MANUEL ROBERTO CAMPOS PÉREZ  
LUIS JAIME DÍAZ VEGA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE :  
INGENIERO MECÁNICO



5010

15100780

CIUDAD UNIVERSITARIA, MARZO DE 2001

*Rec. 23 de marzo 2001*

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA :  
Dra. María Isabel Rodríguez

SECRETARIA GENERAL :  
Lcda. Lidia Margarita Muñoz Vela

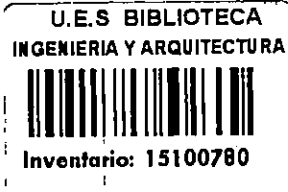
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :  
Ing. Alvaro Antonio Aguilar Orantes

SECRETARIO :  
Ing. Saúl Alfonso Granados

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR :  
Ing. José Francisco Zuleta Morataya



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al grado de:  
INGENIERO MECÁNICO

Título :

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA TIPO  
PÉNDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXIÓN POR  
IMPACTO EN MATERIALES METÁLICOS”

Presentado por :

MANUEL ROBERTO CAMPOS PÉREZ  
LUIS JAIME DÍAZ VEGA

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Coordinador :

Ing. Saturnino Gámez Guadrón

Asesor :

Ing. Rigoberto Velásquez Paz

San Salvador, Marzo de 2001

Trabajo de graduación aprobado por:

Coordinador:

*Gómez Guadrón*  
Ing. Saturnino Gámez Guadrón

Asesor :

*Velásquez Paz*  
Ing. Rigoberto Velásquez Paz



## AGRADECIMIENTO

Extendemos nuestro agradecimiento al Coordinador de este trabajo de graduación Ing. Saturnino Gámez Guadrón y al Asesor Ing. Rigoberto Velásquez Paz, por su valioso aporte para la finalización de este trabajo de graduación.

LOS AUTORES

## DEDICATORIA

Este triunfo alcanzado lo dedico especialmente:

A DIOS CREADOR DE TODO: Por darme las fuerzas para seguir adelante e iluminar mi mente hasta llegar alcanzar esta meta. Porque Jehová da la sabiduría y de su boca viene el conocimiento y la inteligencia.

A MIS PADRES: Manuel de Jesús y María Cecilia que con tanto amor y sacrificio me han brindado todo su apoyo y aliento para seguir adelante y así poder ver culminado nuestros sueños.

A MI ABUELA: Julita por confiar en mi y darme el aliento necesario para seguir adelante hasta llegar a alcanzar este triunfo.

A MIS HERMANOS: Zulma Arely, Cecilia Concepción , David Arturo, Joel Enrique y mi novia Rosi por estar siempre a mi lado, dándome su comprensión y ayuda; así como también a mis sobrinas Wendy y Jaqueline.

A MIS PROFESORES: Por guiarme a través de esta carrera, brindándome los conocimientos necesarios para culminar este grado académico.

A mis amigos , compañeros y familiares, especialmente a mi tío Jorge Pérez.

MANUEL CAMPOS

## DEDICATORIA

Dedico este triunfo:

A DIOS: Por ser el creador de todo lo que tengo, por darme la sabiduría que necesito para lograr las metas trazadas en mi vida.

A MI MADRE: Luz Elena Vega, quien me ha apoyado en todos los momentos de mi vida, gracias por todas sus oraciones y sacrificios para lograr este triunfo.

A MIS HERMANOS: Carlos Oswaldo, Ana Luisa y Odilia Elena, quienes me han dado palabras de aliento y apoyo para lograr este grado académico.

A MIS PROFESORES: Que compartieron su sabiduría sin egoísmo.

A MIS ABUELOS: Zoila Elena, Manlio, quienes me han dado palabras de aliento y apoyo para lograr este grado académico.

A MI NOVIA, AMIGOS, COMPAÑEROS Y FAMILIARES: Que estuvieron pendiente de esta meta y me dieron palabras de aliento para culminarla, especialmente a Ing. Edgar Augusto Cerón y Lcda. Sandra Esther Gómez.

LUIS JAIME

## INDICE

	Pág.
Introducción .....	i
CAPITULO I	
1.0 Investigación bibliográfica sobre la mecánica de fracturas y ensayos de materiales .....	1
1.1 Mecánica de fractura .....	1
1.1.1 Fractura dúctil .....	1
1.1.2 Fractura frágil .....	4
Factores básicos que contribuyen a la fractura frágil	6
A. Clivaje .....	6
B. Teoría de Griffith .....	8
C. Velocidad de Agrietamiento .....	10
D. Ecuación de Griffith .....	12
E. Nucleación de las grietas de clivaje .....	13
F. Propagación de las grietas de clivaje .....	16
G. Efecto de los límites de grano .....	20
H. Efecto del Estado de Esfuerzo .....	25
I. Fragilidad de Revenido .....	27
J. Fragilidad por el hidrógeno .....	28
1.1.3 Fractura por Fatiga .....	30
1.1.3.1 Definición .....	30
1.1.4 Termofluencia y Ruptura por esfuerzo .....	31
1.1.5 Fracturas por Esfuerzo y Corrosión .....	34
1.2 Ensayos en Materiales .....	35
1.2.1 Ensayos o pruebas no destructivas .....	36
A. Radiografía .....	36
B. Inspección por corrientes eléctricas parásitas de Eddy	38



C.	Ensayo Ultrasónico .....	38
D.	Ensayos por partículas magnéticas .....	40
E.	Ensayo por líquidos penetrantes .....	43
1.2.2	Ensayos o pruebas destructivas .....	45
A.	Ensayo de Tensión .....	45
B.	Ensayo de Fatiga .....	50
C.	Ensayo de Dureza .....	52
D.	Ensayo de Impacto .....	56
E.	Ensayos de flexión lenta .....	60
F.	Ensayos especiales para determinar temperaturas de Transición .....	62
a)	Significado de la temperatura de transición .	64
b)	Factores Metalúrgicos que afectan a la temperatura de transición .....	68

## CAPITULO II

2.0	Generalidades del ensayo de impacto .....	73
2.1	Cargas Dinámicas .....	73
2.2	Alcance y aplicabilidad de los ensayos de Impacto .....	75
2.3	Aspectos Generales de las Máquinas de Impacto .....	82
2.3.1	Máquinas de ensayos de metales .....	82
2.3.2	Máquinas para ensayos de maderas .....	86
2.4	El ensayo Izod .....	87
2.4.1	Máquina de Ensayo Izod .....	87
2.4.2	Normalización de la probeta .....	90
2.4.3	Procedimiento .....	94
2.5	El ensayo Charpy para metales .....	96
2.5.1	La máquina Charpy .....	96
2.5.2	Preparación de la máquina .....	105
2.5.3	Normalización de las probetas .....	105

2.5.4	Procedimiento y operación de la máquina .....	108
2.5.5	Ensayos Charpy a bajas temperaturas .....	110
2.6	Métodos de ensayo .....	111
2.6.1	Método Directo .....	111
2.6.2	Método Indirecto .....	125
2.7	Información obtenida del ensayo .....	127
2.8	Apariencia de la fractura .....	130
2.9	Elección del tipo de máquina a construir y la probeta a utilizar	132

### CAPITULO III

3.0	Diseño de elementos de la máquina para pruebas a flexión por impacto Charpy .....	134
3.1	Análisis de ruptura de la probeta.....	134
3.1.1	Dimensionamiento de la probeta.....	134
3.1.2	Selección del material de la probeta.....	135
3.1.3	Energía de ruptura de la probeta y capacidad de la máquina .....	135
3.2	Péndulo de la máquina .....	136
3.2.1	Masa del péndulo .....	136
3.2.2	Longitud del péndulo.....	138
3.2.3	Diseño de la barra del péndulo .....	139
3.2.4	Diseño del percutor .....	149
3.2.5	Diseño de los tornillos sujetadores de la barra del péndulo .....	152
3.2.6	Diseño del eje del péndulo .....	156
3.2.7	Ubicación del centroide .....	162
3.2.8	Selección de rodamientos .....	163
3.2.8.1	Selección del rodamiento .....	163
3.3	Diseño del cuerpo de la máquina .....	166
3.3.1	Dimensionamiento .....	166

3.3.1.1	Dimensionamiento del alojamiento de los Rodamientos.....	167
3.3.1.2	Dimensionamiento del cuerpo de la máquina	169
3.3.1.2.1	Dimensionamiento de los soportes de la estructura .....	169
3.3.1.2.2	Dimensionamiento de la base de la estructura de la máquina .....	171
3.3.2	Selección de materiales .....	172
3.3.3	Forma de fijación de la estructura .....	175
3.3.3.1	Fijación de los soportes a la base de la estructura .....	175
3.3.3.2	Fijación de la base de la estructura.....	184
3.4	Apoyo o soporte de la probeta .....	186
3.4.1	Distancia entre apoyos .....	187
3.4.2	Inclinación de los apoyos .....	187
3.4.3	Radio de curvatura del apoyo .....	188
3.4.4	Dimensiones del apoyo y selección del material .....	188
3.4.5	Forma de fijación .....	192
3.5	Diseño del medidor de energía .....	196
3.6	Diseño o selección del dispositivo de nivelación de la máquina .....	198

#### CAPITULO IV

4.0	Proceso de fabricación y ensamble de los elementos diseñados de la maquina .....	199
4.1	Proceso de fabricación .....	200
4.2	Ensamble y montaje de la máquina .....	215
4.3	Puesta a punto de la máquina .....	217
4.4	Costos de fabricación .....	217

## CAPITULO V

5.0	Pruebas en muestras de materiales y análisis de resultados .....	220
5.1	Selección de los materiales a someter a pruebas .....	220
5.2	Procedimiento .....	221
5.3	Realización de ensayos y tabulación de los datos .....	221
5.4	Análisis de los datos y resultados de las pruebas .....	223
5.5	Conclusiones .....	225
5.6	Observaciones y Recomendaciones .....	226

## CAPÍTULO VI

6.0	Manual de operación y mantenimiento .....	227
6.1	Manual de operación .....	227
6.2	Manual de mantenimiento .....	228

Referencias Bibliográficas .....	230
----------------------------------	-----

Glosario

Anexos

Planos Mecánicos

## INTRODUCCIÓN

La máquina de ensayos Charpy dará un soporte experimental en las investigaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica en la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales, que para nuestro caso corresponde a tenacidad.

El desarrollo de este libro comprende 6 capítulos. En el capítulo I se detalla las causas que originan la fractura de un material sometidos a cargas de impacto; tomando en consideración tanto la fractura dúctil como la frágil, así como también los diferentes factores mecánicos que inciden en la falla.

También se da a conocer las diferentes tipos de ensayos destructivos y no destructivos y su aplicación en el desarrollo de la ingeniería.

El capítulo II detalla los principales ensayos al impacto (Izod y Charpy), y al mismo tiempo se describen en forma general otros ensayos al impacto, que se utilizan en ingeniería; el capítulo III comprende en su totalidad el diseño detallado de todos los elementos constitutivos de la máquina para ensayos Charpy; el capítulo IV los procesos de fabricación de la máquina así como diagrama de ensamble, Gantt y los costos de fabricación; el capítulo V se presentan las pruebas y análisis de resultados; y el capítulo VI el manual de operación y mantenimiento

# CAPITULO I

## 1.0 TEORÍA BÁSICA SOBRE LA MECÁNICA DE FRACTURAS Y ENSAYOS DE MATERIALES.

### 1.1 MECÁNICA DE FRACTURA.

El análisis de la falla requiere de una combinación de conocimientos técnicos, observación meticulosa, labor detectivesca y sentido común. El conocimiento del comportamiento pasado del componente que falla, incluyendo el esfuerzo aplicado, el medio ambiente, la temperatura, la estructura y las propiedades y los cambios inesperados en cualquiera de estos factores, sirven para identificar en forma más fácil la causa de la falla.

El conocimiento de los mecanismos de fractura pueden también revelar la causa de la falla. En esta sección se tratará la identificación del mecanismo por el que fallan los metales cuando son sometidos a un esfuerzo.

#### 1.1.1 Fractura Dúctil

La fractura por ductilidad, o dúctil, ocurre normalmente en forma transgranular (a través de los granos) en los metales que tienen ductilidad y tenacidad satisfactorias. A menudo se observa una buena cantidad de deformación, inclusive con estricción, en la componente que falla. La deformación ocurre antes de la fractura final. Las fracturas dúctiles se deben normalmente a sobrecargas simples o a la aplicación de un esfuerzo excesivo en el material.

La fractura dúctil en una prueba de tensión simple se inicia con la nucleación, crecimiento y coalescencia de microhuecos en el centro de la muestra (figura 1.1). Los microporos se forman cuando un esfuerzo alto provoca la separación del metal en los límites de grano o interfaces entre el metal y las inclusiones. Cuando el esfuerzo local continúa incrementándose, crecen los microporos o microhuecos,

se comunican y producen huecos mayores. Finalmente, el área de contacto metal-metal es demasiado pequeña para soportar la carga y ocurre la fractura final.

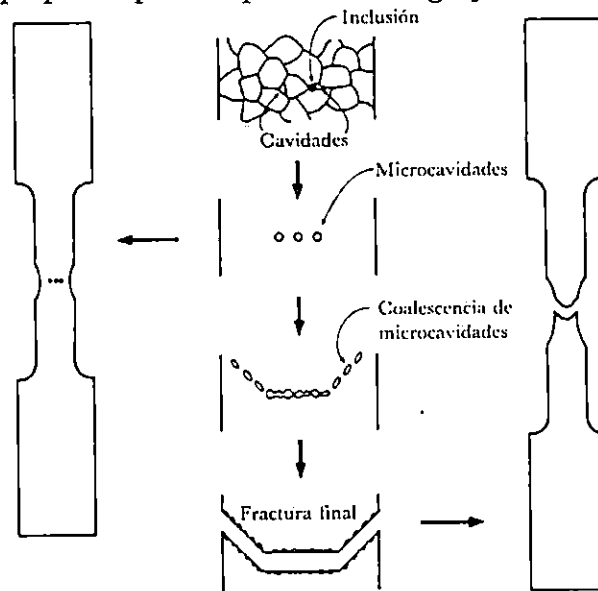


Figura 1.1 Cuando un material dúctil es sometido a un ensayo de tensión se origina una estricción y se forman microcavidades, iniciándose cerca del centro de la barra, por nucleación en los límites de grano o en las inclusiones. Conforme la deformación continúa, se puede formar un borde de corte a  $45^\circ$ , produciéndose una fractura final del tipo de copa y cono.

La deformación por deslizamiento contribuye también a la fractura dúctil de un metal. Se sabe que el deslizamiento ocurre cuando el esfuerzo cortante resultante alcanza el valor del esfuerzo cortante crítico y que los esfuerzos cortantes son mayores a un ángulo de  $45^\circ$  con el esfuerzo de tensión aplicado (Ley de Schmid)<sup>1</sup>

Estos dos aspectos de la fractura dúctil confieren a la superficie que falló cualidades características que sirven para determinar cuándo un metal falla por fractura dúctil. En las secciones metálicas gruesas se espera encontrar evidencia de estricción, con una parte importante de la superficie de la fractura teniendo una cara plana donde nuclean primero los microporos y coalescen, y un pequeño labio de corte, donde la superficie de la fractura se encuentra a  $45^\circ$  respecto del esfuerzo aplicado. El labio de corte, indicando que ocurrió un deslizamiento,

<sup>1</sup> Referencia 8, pág. 229



confiere a la fractura una apariencia de copa y cono (figura 1.2). La simple observación macroscópica de esta ruptura puede ser suficiente para identificar la falla como fractura dúctil.



Figura 1.2 Fractura del tipo de copa y cono de una barra de acero 1048 sometida a un ensayo de tensión.

El examen de la superficie de la fractura a gran aumento, quizá utilizando un microscopio electrónico de barrido, revela en la superficie de fractura una apariencia picada, que se produce por la coalescencia de los microvacíos que origina la deformación local durante el proceso de falla transgranular (coalescencia de microvacíos). En la figura 1.3, se presenta una fractura dúctil como se ve en el microscopio de transmisión de electrones (MTE) y en el microscopio de barrido electrónico.

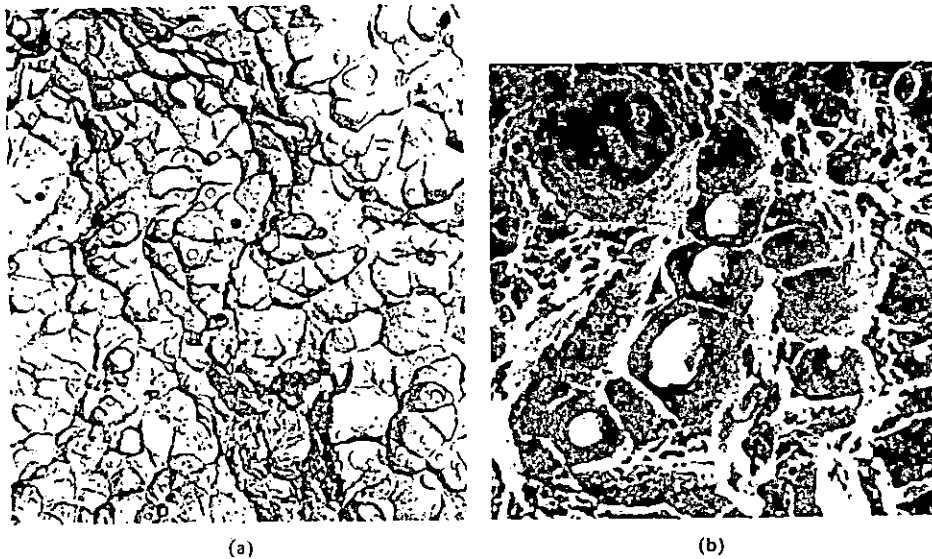


Figura 1.3 Exámenes microscópicos con el microscopio electrónico de fallas dúctiles. (a) Réplica de transmisión que muestra picaduras equiaxiales (200 x). (b) Micrografía de barrido electrónico (MBE) que muestra inclusiones no metálicas asociadas con las picaduras (vacíos) a 1000 x.

### 1.1.2 Fractura Frágil

La fractura por fragilidad, o frágil, ocurre en los metales de alta resistencia o en los de baja ductilidad y tenacidad. Incluso, los metales fallan de modo frágil a bajas temperaturas, en secciones gruesas, con altas proporciones de deformación (como en un impacto), o cuando las rayaduras desempeñan un papel importante (concentradores de esfuerzo). Las fracturas frágiles se observan con frecuencia cuando la falla es causada por un impacto en lugar de una sobrecarga.

En la fractura frágil se presentan poca o ninguna deformación plástica. El inicio de la grieta ocurre normalmente en pequeñas rayaduras que causan una concentración de esfuerzos. La grieta puede moverse a una velocidad cercana a la del sonido en el metal. Normalmente la grieta se propaga más fácilmente a lo largo de planos cristalográficos específicos, siendo a menudo los planos  $\{100\}$ , por agrietamiento o CLIVAJE. En algunos casos, sin embargo, la grieta puede tomar una trayectoria intergranular (a lo largo de los límites de grano), particularmente cuando la segregación o las inclusiones debilitan los límites de grano.

La fractura frágil puede identificarse observando las características de la superficie que falla. Normalmente, la superficie de la fractura es plana y perpendicular al esfuerzo aplicado en una prueba de tracción (figura 1.4). Si la falla ocurre por clivaje, la superficie de fractura en cada grano es plano, con orientaciones diferentes y proporciona una apariencia cristalina o de "azúcar cristalizada" a la superficie de la fractura (figura 1.5).

Otra característica común de la fractura es el patrón galoneado (figura 1.6), producida por frentes de grieta separados que se propagan en diferentes niveles en el material. Se extiende desde el origen de la grieta un patrón de marcas superficiales radiales. El patrón galoneado es visible a simple vista o con lente de

aumento y ayuda a identificar tanto la naturaleza frágil del proceso de falla como el origen de la misma.

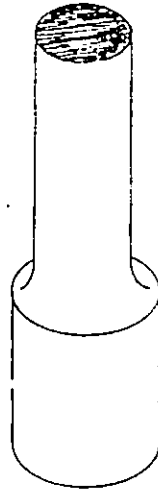


Figura 1.4 Fractura frágil (o por fragilidad) de una barra de acero 1080 sometida a tensión.



Figura 1.5 Micrografía electrónica de barrido de una superficie de fractura frágil en un acero 1080 templado.

La teoría de la fractura frágil se basa en gran parte en la obra de Griffith, quien hizo muchas de las mediciones cuantitativas iniciales de la resistencia de fractura.

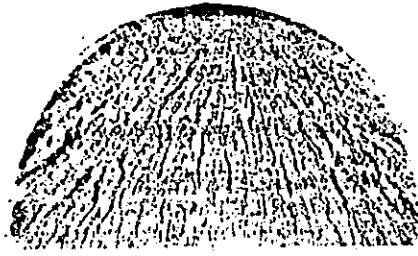


Figura 1.6 "Patrón galoneado" que se presenta en un acero 4340 templado. El acero falló de modo frágil por impacto.

## FACTORES BÁSICOS QUE CONTRIBUYEN A LA FRACTURA FRÁGIL

### A. Clivaje

Bajo ciertas condiciones, es posible dividir cristales en dos piezas a lo largo de planos de índices bajos. Supongamos que el bloque en la figura 1.7 A, Un cristal de zinc simple. Ahora supongamos que a lo largo de un plano basal se introduce una cuña o el filo de una cuchilla en la manera indicada en la figura y se le da un golpe con un pequeño martillo sobre el borde de la cuchilla. Si la temperatura a que se efectúa la operación es suficientemente baja, el cristal se dividirá o clivará, en dos partes, siguiendo la separación el plano basal. (véase la figura 1.7B). Esta operación se llama clivaje y el plano sobre el cual ocurre se conoce como plano del clivaje del cristal. En el caso del zinc, éste es, por supuesto, el plano (0001).

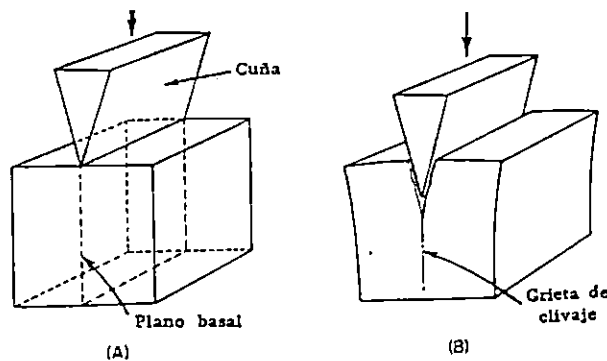


Figura 1.7 Clivaje de un cristal de zinc

Un hecho interesante relacionado con el clivaje de los cristales de zinc es que la fractura sigue al plano basal aún en un cristal doblado o distorsionado. Así, si se dobla primero un cristal y después se le somete a clivaje, como se muestra en la figura 1.8, la superficie de la fractura mostrará la curvatura del plano basal.

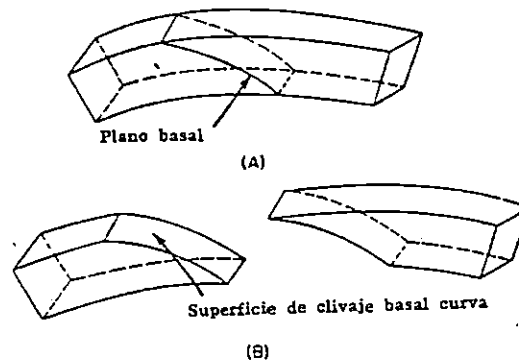


Figura 1.8 Cristal de zinc distorsionado clivado. El clivaje sigue la superficie curvada del plano basal.

Debido a que el clivaje basal es un fenómeno muy conocido en los cristales de zinc, se cree por lo común que otros metales hexagonales se clivan sobre el plano basal con tanta facilidad como el zinc.

La clase de metales más importante en los que con más frecuencia se observa el clivaje es en la de los metales cúbicos centrados en el cuerpo, aunque los metales alcalinos (sodio, potasio, etc), son cúbicos centrados en el cuerpo, y no clivan. El plano de clivaje en la forma reticular centrada en el cuerpo es usualmente  $\{100\}$ , aunque hay ejemplos en los cuales se ha indicado que se prefiere el clivaje a lo largo de  $\{110\}$ .<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Referencia 3, pág. 96



Mientras que la mayoría de los metales comercialmente importantes no están sujetos a clivaje, todavía es un asunto significativo debido al hecho de que el hierro es un metal cúbico centrado en el cuerpo que cliva. La fragilidad a baja temperatura de los aceros puede ser atribuida directamente a este hecho. Cuando en el hierro o acero policristalino ocurren fracturas por clivaje transcristalino, se gasta muy poca energía en la propagación de las fracturas, por lo que recuerdan estrechamente a las que ocurren en el vidrio o en otros sólidos frágiles de elasticidad alotrópica.<sup>3</sup>

#### B. Teoría de Griffith, Versión de Orowan

La resistencia observada en el vidrio de ventana ordinario es menor a una centésima parte de su resistencia teórica. Esta discrepancia entre la resistencia observada de ordinario y la resistencia teórica condujo a Griffith a postular que las bajas resistencias observadas se debían a la presencia de pequeñas grietas o fallas en vidrio de baja resistencia. En la consideración de este problema utilizaremos primero el método de Orowan. El método de Griffith será dado en la sección E.

Debido a que los extremos de las grietas tienen la habilidad de actuar como elevadores de esfuerzos, Griffith supuso que el esfuerzo teórico se alcanzó en los extremos de una grieta, aun cuando el esfuerzo promedio estaba todavía muy por debajo de la resistencia teórica. De acuerdo con este concepto, la fractura ocurre cuando el esfuerzo en los extremos de las grietas excede al esfuerzo teórico. Cuando esto ocurre, la grieta es capaz de extenderse rápidamente.

---

<sup>3</sup> Alotropía: Fenómeno reversible mediante el cual ciertos metales pueden existir en más de una estructura cristalina.

Al calcular el esfuerzo en los extremos de una grieta no utilizaremos el método de Griffith, sino el de Orowan<sup>4</sup>. En ambos casos, sin embargo, se considero una placa plana conteniendo una grieta de sección transversal elíptica. Tal falla se muestra en la figura 1.9, en donde se puede observar que la longitud de la grieta es  $2c$  y que el eje de esfuerzos es perpendicular al eje mayor de la elipse. El esfuerzo y la deformación alrededor de un agujero elíptico de este tipo, con la orientación indicada del esfuerzo de tensión, han sido calculados por Inglis. De acuerdo con estos cálculos, el esfuerzo  $\sigma_e$  en el extremo de la grieta es:

$$\sigma_e = 2\sigma \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2}$$

en donde:

$2c$ : es la longitud del eje mayor del agujero elíptico,

$\sigma$ : es el esfuerzo aplicado promedio, y

$\rho$ : es el radio de curvatura en los extremos de la elipse.

Donde la ecuación siguiente pronostica esfuerzos extremadamente grandes en teoría para sólidos elásticos isotrópicos:

$$\sigma_{\text{ésima}} = \left( \gamma \frac{E}{a} \right)^{1/2}$$

Si la fractura se extiende,  $\sigma_e$  debe ser igual a  $\sigma_{\text{ésima}}$ , y

$$2\sigma \left( \frac{c}{\rho} \right)^{1/2} = \left( \gamma \frac{E}{a} \right)^{1/2}$$

Esta relación puede ser resuelta ahora para  $\sigma$ , produciendo

$$\sigma_f = \left[ \frac{\gamma E}{4c} \left( \frac{\rho}{a} \right) \right]^{1/2}$$

En donde:

$\sigma_f$ : es el esfuerzo aplicado promedio,

---

<sup>4</sup> Referencia 12, Pág. 4.

- $\gamma$  : es la energía de superficie específica,  
 $E$  : es el módulo de Young,  
 $a$  : es la distancia interatómica media a través del plano de fractura a un esfuerzo cero

Esta relación es la versión de Orowan del criterio de Griffith para la fractura de fragilidad. Difiere sólo ligeramente de la relación original de Griffith. Obsérvese que según aumenta la longitud de la grieta, disminuye el esfuerzo para mantenerla en movimiento. Esto significa que una vez la grieta comienza a moverse, es capaz de acelerar a velocidades elevadas.

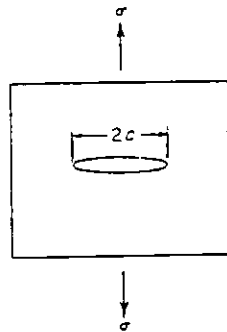


Figura 1.9 Grieta de Griffith

### C. Velocidad de Agrietamiento

Cuando se somete a esfuerzos un material elástico, se almacena energía potencial en el material. La magnitud de esta energía de deformación, por la teoría de la elasticidad simple, es:

$$\text{Energía de deformación} = \frac{\sigma^2}{2E}$$

en donde:

- $E$  : es el módulo de Young y  
 $\sigma$  : es el esfuerzo de tensión aplicado.



De acuerdo con la solución de Inglis<sup>5</sup> para el esfuerzo y deformación alrededor de una grieta elíptica en una placa plana de grueso unitario, la presencia de una grieta reduce la energía de deformación total por la cantidad:

$$\text{Disminución en la energía de deformación} = \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E}$$

En otras palabras, según aumenta la longitud ( $2c$ ) de la grieta, se dispone de más energía cada vez para la propagación de ésta. Parte de esta energía se gasta en la formación de las superficies de la grieta. La energía remanente se transforma en energía cinética. Según se mueven hacia adelante los extremos de la grieta, el material a los lados de la misma se separa con una velocidad determinada y se puede asociar una energía cinética con este movimiento del material cerca del extremo de la grieta. En cualquier instante, por tanto, tenemos:

Ganancia en energía cinética = pérdida en energía de deformación + ganancia en energía de superficie

o

$$\frac{d}{dt}(\text{energía cinética}) = \frac{d}{dt} \left( \frac{\pi c^2 \sigma^2}{E} - 4\gamma c \right)$$

y la solución tiene la forma de:

$$v_c = kv_1 \left( 1 - \frac{c_0}{c} \right)^{1/2}$$

En donde:

- $v_c$ : es la velocidad de la grieta,
- $v_1$ : es la velocidad longitudinal del sonido en ese material,
- $c_0$ : es la mitad de la longitud crítica de la grieta de Griffith,
- $\gamma$ : es la energía de superficie específica,
- $c$ : es la mitad de la longitud de la grieta en cualquier instante, y
- $k$ : es una constante sin dimensión.

<sup>5</sup> Inglis, C.E., Trans. Inst. Naval Arch. Pág. 55, 219 (1913)

La ecuación anterior muestra que la grieta gana velocidad según se expande desde la longitud de agrietamiento crítica. Muestra también que la velocidad se acerca a un valor máximo ( $kv$ ) cuando la longitud de la grieta se hace muy grande.

El valor de la constante de la ecuación anterior ha sido calculado en 0.38, lo cual significa que la velocidad límite calculada con la que se podría mover la grieta en un sólido elástico es de 0.38 la velocidad del sonido en el mismo material.

#### D. Ecuación de Griffith

Consideraremos ahora la derivación de Griffith del esfuerzo de fractura que fue derivado sobre una base termodinámica. Griffith observó que cuando una grieta es capaz de propagarse en forma catastrófica, la ganancia en energía de superficie debe ser igual a la pérdida en energía de deformación. Así, considerando de nuevo una ranura elíptica en una placa plana y utilizando la relación de Inglis para esta energía de deformación dada en la sección precedente, se tiene:

$$\frac{\partial}{\partial c} \left( \frac{\pi \sigma_f^2 c^2}{E} \right) = \frac{\partial}{\partial c} (4c\gamma)$$

o

$$\frac{2\pi \sigma_f^2 c}{E} = 4\gamma$$

y

$$\sigma_f = \left[ \frac{2\gamma E}{\pi c} \right]^{1/2}$$

Esta relación debe compararse ahora con la ecuación siguiente que fue derivada con anterioridad de las consideraciones sobre la concentración de esfuerzos en los extremos de la grieta

$$\sigma_f = \left[ \frac{\gamma E \left( \frac{\rho}{a} \right)}{4c} \right]^{1/2}$$

Ahora se considera normalmente que estas dos relaciones representan dos criterios diferentes para la expansión inestable de una grieta, y ambas deben ser satisfechas. Las dos ecuaciones producen el mismo esfuerzo de fractura cuando el radio de curvatura en la raíz de la grieta  $\rho = (8/\pi) a \approx 3 a$ . Para grietas muy agudas ( $\rho < 3a$ ), el criterio de energía de deformación (relación de Griffith) debe controlar el avance de la grieta, mientras que para grietas con  $\rho > 3 a$ , la concentración de esfuerzos en el extremo de la grieta (relación de Orowan) determinaría el punto en el cual la grieta es capaz de moverse de manera inestable.

La relación de Griffith dada en los párrafos anteriores se aplica en forma específica a una grieta elíptica sobre una placa plana. Se han hecho cálculos para grietas de otras formas en sólidos con diferentes geometrías materiales, así como cálculos basados en consideraciones atómicas más precisas. Los resultados de estos cálculos confirman por lo general la relación funcional

$$\sigma_f \approx \left( \frac{\gamma E}{c} \right)^{1/2}$$

y puede, en consecuencia, ser considerados como de significado general en relación a la fractura por fragilidad.

#### E. Nucleación De Las Grietas De Clivaje

El vidrio, a la temperatura ambiente, puede ser considerado como un material que es incapaz de presentar deformación plástica. La aseveración anterior no es cierta para los metales, que son capaces de deformación por deslizamiento y maclaje aun a temperaturas que se acercan al cero absoluto. También se ha observado que cuando un metal falla por clivaje de fragilidad, casi siempre se produce cierta cantidad de deformación plástica antes de la fractura. Esto ha sido interpretado por muchos como evidencia de que los metales no sufren fractura como resultado de la existencia previa de grietas de Griffith, sino que las grietas

de clivaje son nucleadas probablemente por un proceso de deformación plástica. Como confirmación a este punto de vista se cuenta con el hecho de que algunas veces puede hacerse que ocurra el clivaje en el interior de probetas policristalinas reconocidas; probetas en las cuales hay poca probabilidad de que existan grietas pequeñas antes de la aplicación del esfuerzo. En un metal bien recocado, las grietas deberían autorregenerarse y desaparecer.

Aunque es bastante posible nuclear fracturas de clivaje en cristales metálicos con un cincel y un martillo, esto nos dice muy poco sobre la formación de núcleos de fractura en probetas de metal bajo condiciones de carga normales. Es de más interés cómo comienza una grieta en una probeta de cristal simple bajo tensión.

Las superficies de fractura de los cristales simples de hierro nunca son clivajes perfectos, aun cuando el metal puede fallar en una manera frágil por completo. Así, aunque una superficie puede ser un plano macroscópico liso, la observación bajo un microscopio o aun a una amplificación relativamente baja muestra una cantidad considerable de detalle superficial. En la figura 1.10 se muestra una superficie típica de fractura por clivaje. En esta fotografía, el diseño de bloque rectangular es ocasionado por la intersección de maclas mecánicas con la superficie de clivaje. En casos tales como éste, parecería que el frente de la fractura se mueve a través de la probeta en forma discontinua, siendo obstaculizado por las maclas que se forman enfrente del mismo, teniendo que ser renucleadas continuamente las grietas sobre el lado opuesto de las maclas para mantener el movimiento.

Cuando se ensayan en tensión a temperaturas sobre  $-100^{\circ}\text{C}$ , los cristales simples de hierro recocidos de todas las orientaciones son completamente dúctiles.

Según se hace descender la temperatura por debajo de  $-100^{\circ}\text{C}$ , la naturaleza de la fractura se vuelve dependiente de la orientación, de manera que a  $-183^{\circ}\text{C}$  una fracción relativamente grande de los cristales falla por clivaje frágil. El resto falla todavía en una forma dúctil por deslizamiento. Las orientaciones que clivan son aquellas en las cuales el eje de esfuerzo de la probeta queda cercano a una dirección  $\langle 100 \rangle$ .

Al analizar las fracturas por fragilidad en el hierro, es importante considerar el efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de cizallamiento crítico resuelto (figura 1.11). En los metales cúbicos centrados en el cuerpo, tales como el hierro, la dependencia sobre la temperatura del esfuerzo cizallante crítico resuelto para deslizamiento es muy grande, variando por un factor de casi ocho en el intervalo de temperaturas desde la temperatura ambiente hasta  $-196^{\circ}\text{C}$ . Tanto el clivaje como el maclaje requieren nucleación, y los altos niveles de esfuerzos necesarios para deformar plásticamente el hierro a temperaturas bajas favorecen estos procesos de nucleación.



Figura 1.10 Superficie fracturada por clivaje en un cristal de hierro

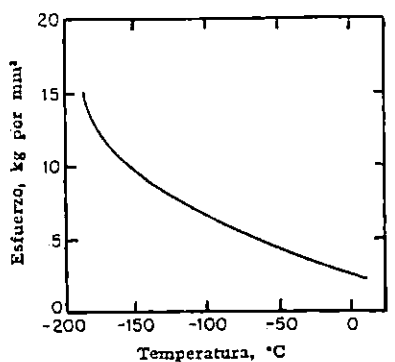


Figura 1.11 Dependencia sobre la temperatura del esfuerzo cizallante crítico resuelto en cristales simples de hierro. Datos correspondientes al esfuerzo en el punto de cedencia superior.

#### F. Propagación de las Grietas de Clivaje

En los sólidos elásticos (vidrio frío), la energía de deformación que se libera según se propaga una grieta se convierte en la energía de superficie de las caras de la grieta y en la energía cinética del material en movimiento a los lados de la grieta.

Para la propagación de las grietas de clivaje cristalino debe considerarse un término de energía adicional. Este término está asociado con la deformación plástica que acompaña usualmente al movimiento de las grietas a través de los cristales.

La baja temperatura y las elevadas velocidades de deformación tienden a elevar los puntos de cedencia (límite elástico) de los metales y a suprimir la deformación plástica.

La deformación plástica asociada con una grieta en movimiento es más capaz de ocurrir precisamente delante de la grieta. En esta región, el metal está en realidad en un estado de esfuerzo tensión uniaxial muy elevado, con el eje de esfuerzos normal al plano de la grieta. Un simple esfuerzo de tensión de este tipo es equivalente a un juego de esfuerzos cizallantes sobre planos a  $45^\circ$  con el eje del

esfuerzo de tensión, como se indica en la figura 1.12. Debido a que estos esfuerzos cizallantes son grandes, es muy posible nuclear dislocaciones adelante de la grieta sobre planos de deslizamiento que estén favorablemente orientados con respecto al esfuerzo cizallante.

Regresemos al efecto de la deformación plástica sobre la propagación de grietas de clivaje. Cuando se produce deslizamiento durante el movimiento de una grieta, la energía es absorbida en nucleación y dislocaciones en movimiento. Esta energía viene a expensas de la energía de deformación elástica que produce la grieta. Si el trabajo para vencer la deformación plástica es muy grande, la grieta puede desacelerar y detenerse, lo cual implica que los materiales cristalinos que clivan, deben lograr una velocidad mínima antes que la grieta se pueda mover libremente. Si la velocidad es muy lenta entonces se absorberá demasiada energía en la forma de deslizamiento.

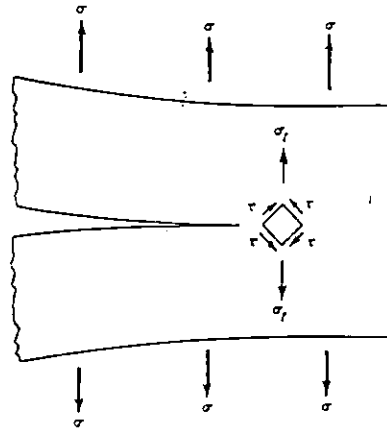


Figura 1.12 Cuando se aplica un esfuerzo de tensión ( $\sigma$ ) exterior a un cuerpo elástico que contiene una grieta, el material justamente adelante de la grieta es sometido a esfuerzos de tensión ( $\sigma_0$ ) muy grandes. Esto, a su vez, equivale a un esfuerzo de cizallamiento ( $\tau$ ) sobre planos a  $45^\circ$  con el plano de la grieta.

El término deformación plástica puede ser uno de los factores más importantes que hacen a ciertos metales incapaces de clivaje. A este respecto, es interesante recordar que los metales cúbicos centrados en las caras, con sus numerosos

sistemas de deslizamiento equivalente, no se ha observado que cliven. Además de la energía asociada con la formación y desarrollo de dislocaciones, hay otra manera de que las dislocaciones absorban energía de una grieta en movimiento. El corte de las líneas de dislocación por las grietas implica pérdidas de energía. Esto es cierto particularmente cuando las dislocaciones intersectadas se encuentran en una orientación helicoidal. Cuando una fractura de clivaje pasa a una dislocación helicoidal, la superficie de fractura recibe un escalón cuya altura es igual al vector de Burgers de la dislocación<sup>6</sup>. En la figura 1.13 se muestra la naturaleza del desarrollo de este escalón. Según progresa una grieta, los escalones que se obtienen, debidos a su intersección con las dislocaciones, tienden a correr juntos. Si los escalones son de dislocaciones del mismo signo, se combinan para formar escalones más grandes, mientras que si son de dislocaciones de signo opuesto se cancelan.

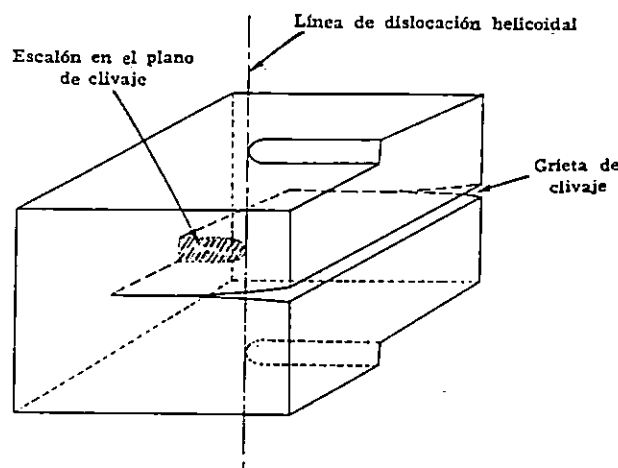


Figura 1.13 Producción de un escalón en el plano de clivaje cuando una fractura de clivaje intersecta a una dislocación helicoidal.

El escalón producido sobre el plano de clivaje por una dislocación helicoidal simple es, por supuesto, muy pequeño para ser visto. Sin embargo, si la grieta intersecta a un gran número de dislocaciones helicoidales del mismo signo, entonces, al combinarse, se pueden producir escalones lo suficientemente grandes para ser

<sup>6</sup> Referencia 1, pág. 677



vistos. Los cristales de  $\text{LiF}^7$  al crecer contienen con frecuencia límites de ángulo bajo que tienen una componente de torsión. Tales límites contienen un enrejado de dislocaciones helicoidales estrechamente espaciadas, todas del mismo signo, y cuando una grieta de clivaje cruza a uno de estos límites, se producen escalones de gran tamaño en el plano de clivaje.

En la figura 1.14 se muestra un excelente ejemplo de esto. Obsérvese como los escalones corren juntos en forma progresiva para formar escalones más pronunciados todavía. La configuración que forman los escalones sobre la superficie de clivaje se conoce como una configuración pluvial. En general, esta última corre normal al frente de la grieta, y con frecuencia es posible localizar el punto de origen de una grieta de clivaje siguiendo la configuración pluvial hasta su origen.

La configuración pluvial en las superficies de fractura frágil puede presentarse por cierto número de causas distintas al corte de las dislocaciones helicoidales por una grieta. Así, si se comienza una grieta de clivaje, digamos por un martillo y un cincel, en tal forma que la grieta no se estrictamente paralela al plano de clivaje, la fractura debe contener escalones para acomodar el desalineamiento. Las configuraciones pluviales se observan también sobre las superficies de fracturas en el vidrio. Como el vidrio es normalmente amorfo, la grieta no sigue un plano cristalográfico y no pueden existir dislocaciones en el sentido normal.

Hay varias razones para que sea más difícil para una fractura moverse a lo largo de una superficie escalonada. Primero, un plano de clivaje que contenga un gran número de escalones tiene un área de superficie mayor y, por tanto, un término de energía de superficie más grande. Segundo, el avance de la grieta no solo implica

---

<sup>7</sup> LiF, Fluoruro de Litio.

la separación del cristal a lo largo de segmentos del plano de clivaje sino también ocasiona el crecimiento continuado de las superficies de los escalones o pequeños cantiles. A menos que un plano de clivaje secundario, o plano de deslizamiento, sea casi normal a la superficie del plano de clivaje primario, la formación de los escalones implicará cierta cantidad de desgarramiento plástico de metal para formar las superficies de los escalones. Al hacer esto se gastará una gran cantidad de energía.

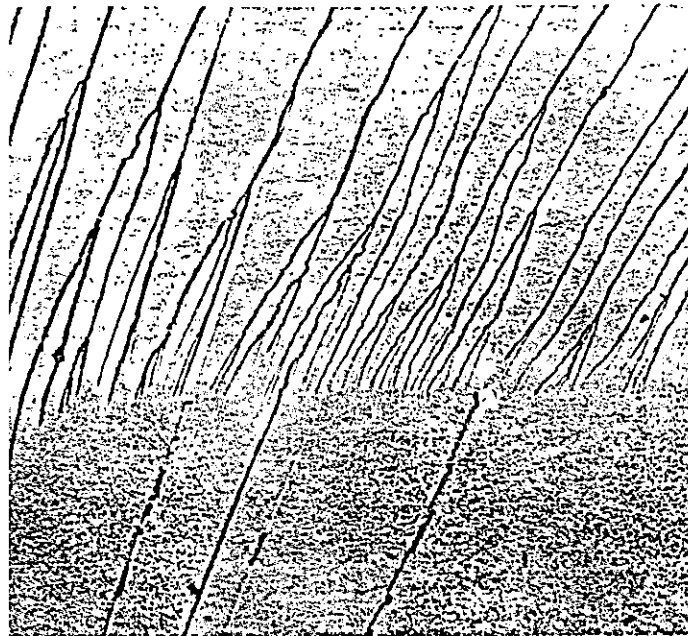


Figura 1.14 Escalones de clivaje resultantes de la intersección de una grieta de clivaje con un ángulo bajo conteniendo un enrejado de dislocaciones helicoidales del mismo signo. (Gilman, J. J., Trans. AIME, 212, [1958], Pág. 310) A 250 aumentos.

#### G. Efecto De Los Límites De Grano

Como se señaló en la sección precedente, un límite de torsión de ángulo pequeño (en un cristal simple) se suma a la dificultad de movimiento de una grieta de clivaje por la introducción de escalones en el plano de fractura. Los límites de grano en los metales policristalinos impiden también el movimiento de las grietas de clivaje, y hay mucha evidencia de que la magnitud del efecto es mucho mayor debido a que es posible encontrar grietas de clivaje en probetas policristalinas

deformadas por tensión que no son más grandes que un diámetro de grano. En la figura 1.15 se muestra tal microgrieta en una probeta de hierro policristalina.

Considérese primero el caso en donde la diferencia de orientación entre cristales adyacentes es de más de unos cuantos grados, pero aún no grande. En este caso, los planos de clivaje en los dos cristales, aunque alineados aproximadamente, formarán todavía un ángulo finito uno con el otro. Bajo estas condiciones, no es posible que la superficie de la fractura pase con suavidad a través del límite, y lo que ocurre probablemente es que se nuclea una serie de superficies de clivaje paralelas sobre diferentes niveles. El resultado final es que la superficie de fractura produce una serie de escalones que se originan en el límite de grano. En la figura 1.16 puede verse un ejemplo típico.

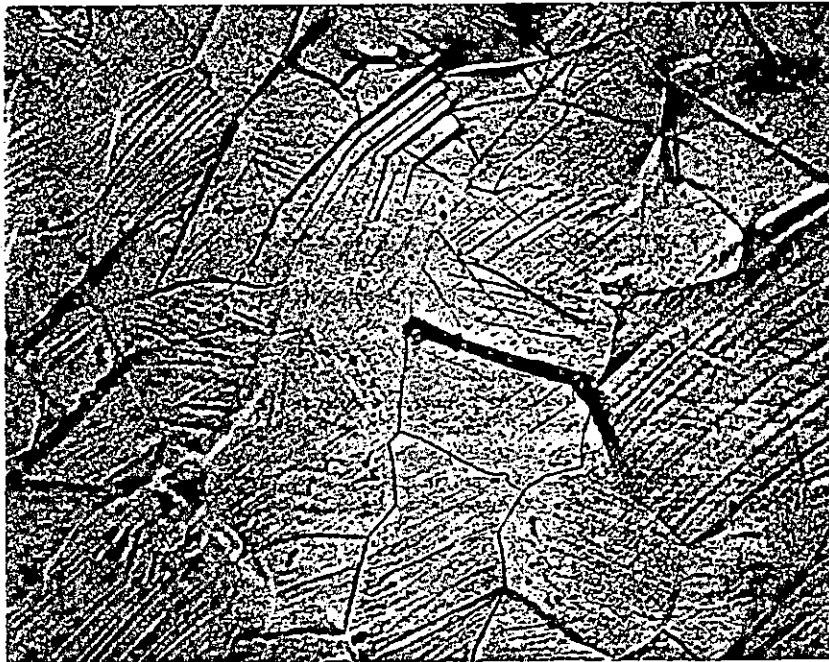


Figura 1.15 Grieta de clivaje que se detiene en los límites de un grano simple en una probeta de hierro policristalina. A 250 aumentos.

En la probeta policristalina promedio, el desalineamiento entre los granos es mayor que entre los cristales en la figura 1.16 y, en general, la superficie de la

fractura es mucho más irregular. Un estudio de las configuraciones pluviales de las superficies de fractura en probetas policristalinas muestra que la grieta se propaga también de manera errática, moviéndose algunas veces en una dirección opuesta a la dirección media de movimiento. Se encuentra también evidencia de una propagación discontinua de la grieta, significando que la rotura no es producida simplemente por el movimiento frontal de una grieta simple, sino que se forma cierto número de segmentos de grieta y entonces se unen. Como es posible que los segmentos individuales no se encuentren en el mismo nivel, esto implica usualmente un desgarre plástico entre los segmentos de la superficie de fractura.



Figura 1.16 Escalones de clivaje de gran tamaño que se producen cuando una grieta de clivaje pasa desde un cristal a otro. Probeta de aleación hierro-silicio al 3%, clivada a 78°K; la dirección de propagación de la grieta es de arriba hacia abajo. A 250 aumentos.

La información anterior demuestra que las grietas de clivaje son más difíciles de propagar a través de un material policristalino que a través de un cristal simple.

Sin embargo, esto no debe ser tomado como evidencia de que las fracturas por clivaje frágil no puede moverse fácilmente a través del material policristalino. Más bien, esto puede limitar el tamaño inicial al cual puede desarrollarse una

grieta de clivaje, de manera que las grietas se pueden formar con desarrollo en diámetro de sólo el tamaño de un grano simple, o al de varios granos en diámetro. El desarrollo posterior de estas microgrietas se impide por la dificultad para que la grieta pase a través de un límite de grano de ángulo grande. Sin embargo, a un esfuerzo suficientemente elevado, es concebible que se extienda la grieta de manera rápida. Las condiciones bajo las que ocurre esto son de gran interés, puesto que la expansión de las microgrietas conduce a fractura por fragilidad. Como una aproximación, podemos considerar que la microgrieta promedio tiene una longitud igual a un diámetro de grano. Ahora puede ser aplicado el criterio de Griffith para la expansión de una grieta.

$$\sigma_f = \left[ \frac{2\gamma E}{\pi c} \right]^{1/2}$$

si suponemos que  $\gamma$ , la energía de superficie específica, puede ser reemplazada por una correspondiente energía de superficie efectiva  $\gamma_p$ . Esta última cantidad toma en cuenta no sólo la energía de superficie verdadera, sino también la energía de deformación plástica gastada en forzar a la grieta a través de un agregado policristalino. Para las condiciones dadas, el criterio de Griffith se vuelve

$$\sigma_f = \left[ \frac{4\gamma_p E}{\pi d} \right]^{1/2}$$

en donde:

$\gamma_p$ : es la energía de superficie específica efectiva,

$d$ : es el diámetro de grano promedio,

$\sigma_f$ : es el esfuerzo aplicado promedio,

$E$ : es el módulo de Young.

Esta relación pronostica que la resistencia de los metales policristalinos que fallan por clivaje frágil variará según el recíproco de la raíz cuadrada del diámetro de grano promedio. Se ha informado sobre relaciones empíricas de esta naturaleza, tanto para el zinc como para el hierro.

Según se incrementa el diámetro, se alcanza un diámetro crítico sobre el cual es menor el esfuerzo necesario para extender una microgrieta que el esfuerzo para formar o nuclear una grieta en el interior del cristal. Cuando esto ocurre, es concebible que la primera grieta que se forme ocasione la fractura de la probeta. Para cuando se haya desarrollado la grieta a un tamaño igual al diámetro de grano, será lo suficientemente grande para pasar a través del límite y continuar creciendo. Por encima del diámetro crítico el esfuerzo de fractura es controlado por el esfuerzo requerido para nuclear grietas en cristales, y por debajo del diámetro crítico, por el esfuerzo requerido para propagarlas a través de un agregado policristalino. Como las grietas de clivaje no se nuclean hasta que se ha alcanzado el límite elástico del metal, deberá producirse la fractura casi simultáneamente con la cedencia a diámetros mayores que el diámetro crítico.

Gilman ha hecho un resumen de las conclusiones anteriores en un diagrama esquemático. (véase figura 1.17). Obsérvese que esta figura está trazada en términos del recíproco de la raíz cuadrada del diámetro del grano.

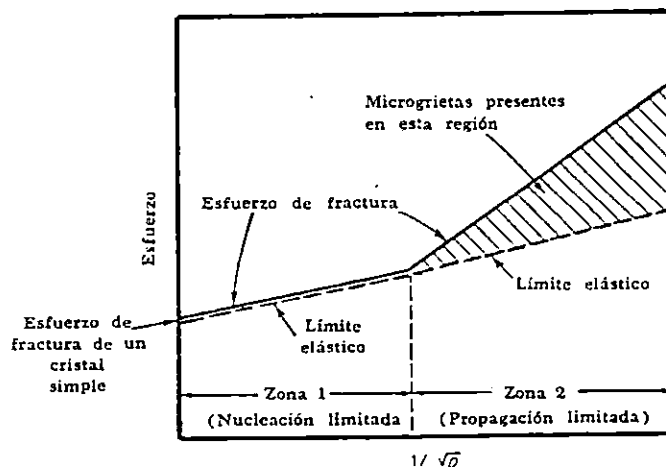


Figura 1.17 Resumen de resultados experimentales mostrando el efecto del tamaño de grano  $D$  sobre los límites elásticos y de fractura de metales policristalinos. (Según Gilman, J. J., Trans. AIME, 212, [1958], Pág. 783)

## H. Efecto Del Estado De Esfuerzo

Tanto la nucleación como la propagación de las grietas de clivaje son favorecidas por esfuerzos grandes de tensión. Por otra parte, el deslizamiento requiere esfuerzos de cizallamiento. Sin embargo, cuando la deformación ocurre por deslizamiento, el esfuerzo aplicado tiende a ser relevado. En otras palabras, es difícil alcanzar grandes esfuerzos cuando un metal se deforma fácilmente por deslizamiento. De estas consideraciones podemos concluir que cualquier sistema de esfuerzo capaz de producir una combinación de grandes esfuerzos de tensión y pequeños esfuerzos de cizallamiento favorece el clivaje. Claramente, la naturaleza del estado de esfuerzo en una probeta de metal es una importante consideración en el proceso de fractura.

En un estado de simple tensión uniaxial puede verse al esfuerzo como equivalente a un juego de esfuerzos cizallantes orientados a  $45^\circ$  con el eje del esfuerzo de tensión. Esta relación se muestra en las figuras. 1.18 A y 1.18 B, en donde, en un caso se supone al esfuerzo de tensión horizontal y en el otro vertical. Si se aplican simultáneamente los dos esfuerzos (a  $90^\circ$  uno de otro, como se muestra en estos dibujos) a la misma probeta, las componentes del esfuerzo cizallante se opondrán unas a otras. En los dos casos bidimensionales ilustrados, es evidente que bajo un estado de tensión biaxial se reduce el esfuerzo cizallante en el material. Además, si se aplica un tercer esfuerzo de tensión normal al plano de los dos esfuerzos anteriores, y se suponen iguales todos los esfuerzos de tensión, se producirá un estado de tensión hidrostática en el cual el material no experimentará esfuerzo cizallante alguno.

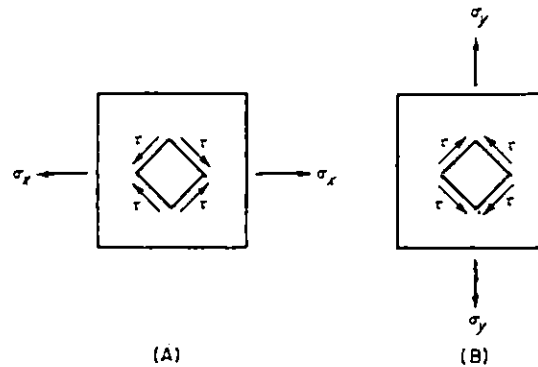


Figura 1.18 Los esfuerzos de tensión en ángulos rectos producen componentes de esfuerzo cizallante que se oponen unos a otros.

De lo anterior se puede concluir que siempre que se ensaye una probeta bajo condiciones de tensión biaxial o triaxial, tenderá a suprimirse el deslizamiento que requiera esfuerzo cizallante para producirse. Debido a esto, se obtendrá un alto grado de esfuerzo de tensión y se puede promover una fractura frágil por clivaje.

Un medio fácil de aproximación a un estado de tensión triaxial implica la colocación de una sencilla entalladura en "V" alrededor del perímetro de una probeta cilíndrica para ensayo de tensión. La figura 1.19 representa tal probeta.

Cuando se le carga en tensión, la sección reducida en la entalladura será la primera posición en ceder. Según se alarga esta sección (en la dirección del esfuerzo aplicado), su tendencia natural es la de contraerse en el plano horizontal. Esto, sin embargo, es tolerado por el metal que queda por encima y por debajo de la entalladura que todavía no ha cedido. En esta forma, el metal en la sección transversal de la entalladura es colocado bajo tres esfuerzos de tensión; el esfuerzo vertical aplicado y los dos esfuerzos horizontales inducidos a 90° uno de otro.



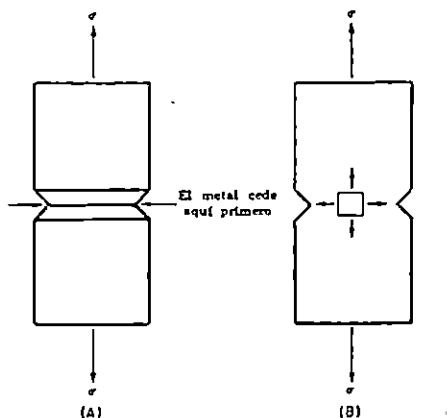


Figura 1.19 Una probeta entallada sometida a tensión cede primero en la entalladura, la cual produce un estado de tensión triaxial en la sección transversal de la entalladura. (A) Vista tridimensional. (B) Sección transversal mostrando la distribución de esfuerzos.

### I. Fragilidad De Revenido

La fragilidad de revenido se refiere a la pérdida en tenacidad a la entalla que sufren los aceros al carbono y aleaciones templadas cuando se someten a temperaturas superiores a los 350°C, pero inferiores a la de formación de austenita<sup>8</sup>.

Sin embargo, la tenacidad se mantiene si la pieza se temple en agua desde la temperatura de revenido. El mecanismo preciso que da lugar a la fragilidad de revenido no se ha establecido, aunque el comportamiento sugiere alguna fase que precipita a lo largo de las fronteras de grano durante el enfriamiento lento. Un alto contenido de manganeso, fósforo y el cromo parecen promover la susceptibilidad, en tanto que el molibdeno parece tener un efecto definido de retardo.

La fragilización es más rápida en el enfriamiento lento a través del intervalo de temperaturas que en los tratamiento isotérmicos. La fragilidad de revenido puede eliminarse completamente de un acero

<sup>8</sup> Referencia 12, pag. 413

calentándolo hasta la región austenítica, y enfriándolo rápidamente a través del intervalo de temperaturas de fragilización.

La presencia de la fragilidad de revenido suele determinarse estableciendo la temperatura de transición por medio de ensayos de choque sobre probeta entallada. La dureza y la resistencia a la tracción no son sensibles a la fragilidad de revenido, excepto en casos muy extremos, pero las temperaturas de transición pueden aumentar 100 °C aproximadamente, por los tratamientos térmicos fragilizantes ordinarios. La fractura de un acero con fragilidad de revenido es intergranular, mientras que la fractura frágil de un acero sin esa fragilidad es transgranular. Esto sugiere que el fenómeno se debe a un debilitamiento de los límites de grano.

#### J. Fragilidad Por El Hidrógeno

Cantidades de hidrógeno muy pequeñas pueden producir fragilidades intensas en muchos metales. Los metales más sensibles son los cúbicos centrados y los hexagonales compactos. Basta un 0.0001% en peso para producir agrietamiento del acero. Los metales cúbicos de caras centradas no suelen ser tan sensibles a la fragilización por el hidrógeno. Este elemento puede introducirse durante la fusión y quedar atrapado en la solidificación, o adquirirse durante los tratamientos térmicos, el electroplaqueado, el decapado con ácidos o la soldadura.

Las características fundamentales de la fragilidad debida al hidrógeno son la sensibilidad a la velocidad de deformación, la dependencia con la temperatura y la tendencia a la fractura diferida. A diferencia de la mayoría de los fenómenos de fragilidad, la debida

al hidrógeno se hace más patente para las velocidades de deformación pequeñas. A temperaturas bajas y altas es despreciable, pero es más severa para una determinada temperatura intermedia. En el caso de los aceros, la temperatura más peligrosa está próxima a la ambiente.

Un método corriente de estudiar la fragilidad debida al hidrógeno consiste en cargar con cantidades conocidas de hidrógeno probetas entalladas de tracción, someterlas a una tensión determinada en una máquina y observar el tiempo que transcurre hasta la fractura. En la figura 1.20 se muestra una curva típica de fractura diferida. Nótese que la resistencia a la tracción de una probeta cargada con hidrógeno puede ser mucho más pequeña que la de una exenta del mismo. Hay una zona en que el tiempo transcurrido hasta la fractura solo varía muy ligeramente con la tensión aplicada, y hay un valor crítico mínimo bajo el cual no se produce fractura diferida. La similitud de la curva de fractura diferida con una curva de fatiga ha llevado al empleo del término "fatiga estática" para el fenómeno de la fractura diferida. La tensión crítica mínima se llama "límite de fatiga estática"; aumenta al disminuir el contenido de hidrógeno o la severidad de la entalla. El contenido puede aminorarse por recocido del acero a temperaturas de 150° a 250°C.

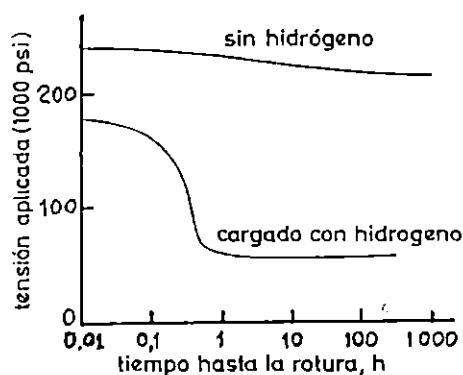


Figura 1.20 Curva de fractura diferida

### 1.1.3 Fractura por Fatiga

#### 1.1.3.1 Definición

Fatiga es, la condición por la cual un material se agrieta o falla como resultado de esfuerzos cíclicos o repetidos (figura 1.21 a y b).

También se define a la fatiga como el cambio estructural permanente localizado y progresivo que tiene un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes.

El efecto de los esfuerzos cíclicos es producir grietas microscópicas en las zonas de las concentraciones de esfuerzo dentro del material o en la superficie del mismo, lo cual, en forma consecuente, conduce al crecimiento y la diseminación de grietas, lo que produce la falla. La fatiga entraña procesos de flujo microscópico, y la extensión de grietas macroscópicas. En los metales, las grietas por fatiga se originan en los granos de la superficie que aparecen a partir de bandas de deslizamiento que se extienden a lo largo de planos de deslizamiento.

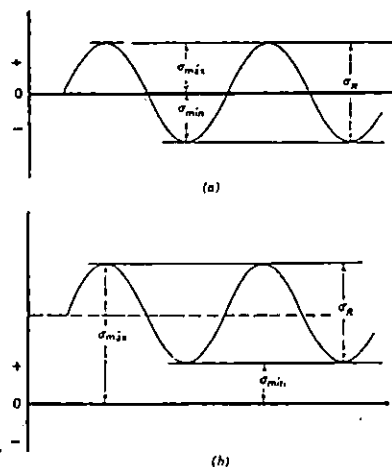


Figura 1.21 Esfuerzos cíclicos  $\sigma_{\max}$  y  $\sigma_{\min}$  son los valores máximo y mínimo de los esfuerzos repetidos. La fluctuación de los esfuerzos  $\sigma_r = \sigma_{\max} - \sigma_{\min}$

En la figura 1.22 se muestran las características macroscópicas de la fractura por fatiga. A pesar de que no existen dos grietas por fatiga que sean idénticas, éstas poseen rasgos características comunes. El área de la fatiga, marcada como la zona A, suele ser más uniforme y más lustrosa que el área de falla final (zona B), la cuál presenta una textura mucho más áspera. En el área de la fatiga puede distinguirse el punto del origen "o" de la grieta, al cual sigue una repetición periódica de zonas brillantes y opacas, las cuales indican la diseminación de la grieta.

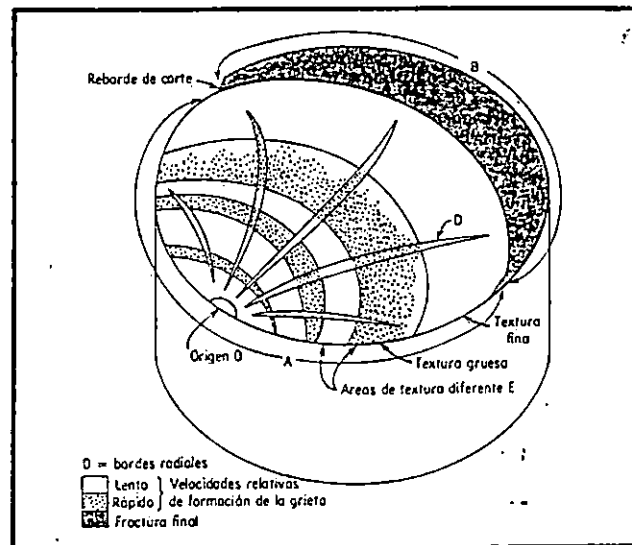


Figura 1.22 Fallas macroscópicas de una fractura por fatiga en los metales. (según Physical Basis of Metal Fatigue by P. J. Forsyth, Blackie and Son Limited, Bishopbriggs, Glasgow G64 2NZ).

#### 1.1.4 Termofluencia Y Ruptura Por Esfuerzo

Cuando un metal o una aleación esta bajo una carga o esfuerzo constante, éste podría sufrir una progresiva deformación plástica durante un cierto período de tiempo. Esta deformación dependiente del tiempo se conoce con el nombre de fluencia lenta. La fluencia de metales y aleaciones es muy importante para algunos tipos de

proyectos de ingeniería, particularmente aquellos que funcionan a elevadas temperaturas.

Consideremos la termofluencia de un metal policristalino puro a una temperatura por encima de la mitad de su punto de fusión absoluto,  $\frac{1}{2}T_f$  (termofluencia a alta temperatura). Consideremos además un experimento de termofluencia en el cual una muestra de tensión recocida se somete a una carga constante de suficiente magnitud para originar una deformación de termofluencia generalizada. Cuando el cambio de longitud de la muestra, por encima de un período de tiempo, se representa frente a incrementos de tiempo, se obtienen una curva de termofluencia tal como muestra la figura 1.23.

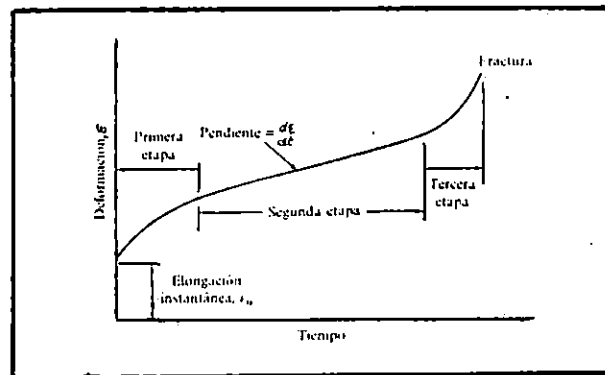


Figura 1.23 Curva típica de termofluencia para un metal. En la gráfica se representa el tiempo frente al comportamiento bajo deformación de un metal o aleación sometido a una carga constante a una temperatura constante. La segunda etapa de la termofluencia es la de mayor interés para el ingeniero por las condiciones en las cuales se produce la termofluencia generalizada

En la curva idealizada de termofluencia de la figura se produce primero una instantánea y rápida elongación de la muestra. Seguidamente, la muestra exhibe una etapa primaria en la que la rapidez de la deformación decrece progresivamente con el tiempo. La pendiente de la curva ( $d\epsilon/dt$ , o  $\dot{\epsilon}_0$ ) se llama rapidez de la

termofluencia. Así, durante la primera etapa, la rapidez de la termofluencia decrece con el tiempo. Después de la etapa primaria de termofluencia, tiene lugar una segunda etapa en la que la rapidez de la termofluencia se mantiene esencialmente constante y es por lo que también se refiere como termofluencia de estado estacionario. Finalmente, en la tercera fase, se produce un incremento exponencial de la rapidez de la termofluencia con el tiempo hasta la deformación para la que se produce la fractura. La forma de la curva de termofluencia depende fuertemente de la carga aplicada (esfuerzo) y de la temperatura. Esfuerzos y temperaturas elevadas aumentan la rapidez de la termofluencia.

Durante la primera etapa, el metal se endurece por deformación para soportar la carga aplicada, y la rapidez de la termofluencia decrece con el tiempo a medida que el endurecimiento por deformación se hace cada vez más elevado: A altas temperaturas (por ejemplo, valores superiores a  $0.5T_f$  de metal) durante la segunda etapa, se restablece el proceso, involucrando dislocaciones muy móviles que contrarrestan el endurecimiento por deformación tanto que el metal continúa alargándose (termofluencia) a una velocidad de estado estacionario (figura 1.23).

Las fallas por termofluencia se definen como la deformación o distorsión excesiva de las partes metálicas, incluso si no ha ocurrido la fractura. Las fallas de ruptura por esfuerzo son definidas como la fractura real de la parte metálica.

Normalmente, las fracturas de ruptura por esfuerzo del tipo dúctil incluyen la estriación del metal durante la termofluencia terciaria y

la presencia de muchas fisuras que no tuvieron la posibilidad de producir la fractura final. Incluso, los granos cercanos a la superficie de la fractura tienden a alargarse. Las fallas de ruptura por esfuerzo del tipo dúctil son generalmente transgranulares y ocurren a velocidades de termofluencia altas, tiempos cortos de la ruptura y temperaturas relativamente bajas de exposición.

Las fallas de ruptura por esfuerzo del tipo frágil son normalmente intergranulares, muestran poca estricción y ocurren más frecuentemente a velocidades bajas de termofluencia y temperaturas altas. Se observan granos equiaxiales cerca de la superficie de fractura. La falla frágil ocurre normalmente por la formación de huecos en la intersección de tres límites de grano y la precipitación de huecos adicionales a lo largo de los límites de grano, a través de los procesos de difusión (figura 1.24).

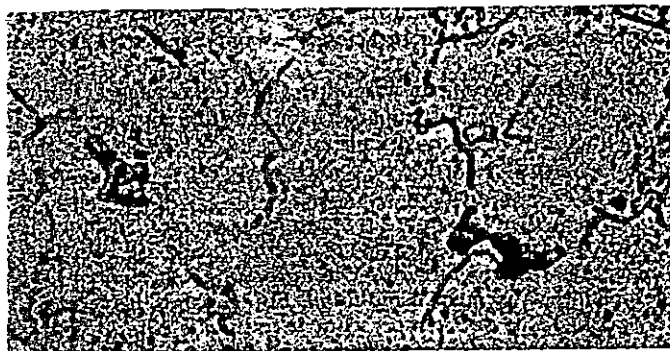


Figura 1.24 Cavidades de termofluencia en los límites de grano de un acero inoxidable austenítico. De Metals Handbook, vol. 7, 8ª. Ed., American Society for Metals, 1972.

#### 1.1.5 Fracturas por Esfuerzo y Corrosión

Estas fracturas ocurren a esfuerzos muy por debajo del valor de fluencia del metal, debido al deterioro por un medio corrosivo. Las grietas por corrosión profundas y finas se producen aun cuando el



metal como un todo muestra un deterioro poco uniforme. Los esfuerzos pueden ser aplicados externamente o ser esfuerzos residuales acumulados. Las fallas por esfuerzo y corrosión se identifican a través de un examen microscópico del metal contiguo. Por lo común, se observa una amplia ramificación de las grietas a lo largo de los límites de grano (figura 1.25). La ubicación en donde se iniciaron las grietas puede identificarse por la presencia de un producto de la corrosión.



Figura 1.25 Fotomicrografía de un metal próximo a una fractura por esfuerzo y corrosión, que muestra las numerosas grietas intergranulares que se forman como resultado del proceso de corrosión. De Metals Handbook, vol. 7, 8<sup>a</sup>, ed., American Society for Metals, 1972.

## 1.2 ENSAYOS EN MATERIALES

Los ensayos se aplican a los materiales, componentes y uniones. Consisten en la medición de las propiedades fundamentales o medición de las respuestas a influencias particulares tales como carga, temperatura y corrosivos. La inspección está relacionada en forma estrecha con las pruebas y también se aplica a materiales, componentes y ensambles. La inspección se refiere a la geometría de los objetos, la detección de defectos internos y los exámenes de rendimiento, acabado, color y apariencia en general.

El método de ensayo e inspección pueden ser o no destructivos del objeto que se examina y, por tanto, los ensayos se subdividen por lo común en dos áreas principales: ensayo destructivos y no destructivos.

### 1.2.1 Ensayos o Pruebas No Destructivas

La mayoría de los métodos de ensayos o pruebas no destructivas tienen el propósito de detectar defectos internos capaces de causar fallas a la fatiga o a cargas estáticas. Aunque en la mayoría de los casos, los ensayos no destructivos no dan una medición directa de las propiedades mecánicas.

Dichos ensayos se emplean para detectar materiales defectuosos antes de que las partes componentes sean formadas o maquinadas; para detectar componentes defectuosas antes de ensamblar; para medir el espesor de un metal u otros materiales; para estimar su vida residual; para identificar y clasificar materiales; y para descubrir defectos que pudieran desarrollarse durante el procesamiento o el uso. Las partes también pueden examinarse cuando están en servicio.

Los ensayos no destructivos se utilizan para hacer productos más confiables, seguros y económicos.

#### A Radiografía

Cuando se mencionan los ensayos no destructivos, la radiografía es generalmente el primer proceso en el cual se piensa.

La radiografía de metales se puede realizar mediante rayos X o rayos gamma, que son rayos electromagnéticos de longitud de onda corta

capaces de atravesar espesores de metal relativamente grandes. Los rayos gamma se pueden obtener ya sea de un material radioactivo natural (como el radio) o de un isótopo radioactivo (como el cobalto 60).

La radiación gamma es más penetrante que los rayos X, pero su sensibilidad inferior limita su aplicación.

La radiografía de rayos X y rayos gamma, actúa sobre un papel o película fotográfica sensitiva. La radiación se pasa, absorbe y dispersa por objetos opacos. Cuanto más grueso y denso sea el objeto, menor será la proporción de irradiación incidente que pasa a través de él. Por tanto, si un objeto tiene un defecto interno pasará más radiación a través del área defectuosa que a través de la región sólida, y el efecto se mostrará como un área oscura en la película. Desafortunadamente, la dispersión tiende a oscurecer el defecto, de modo que no pueden detectarse los defectos pequeños. Los defectos planos, tales como las superficies producidas por una grieta, no se detectan por rayos X, pero los defectos en tres dimensiones, como porosidad por gas en una fundición, se discernen con facilidad. La escoria y arena, que son muchos menos densas que el metal, también se detectan por radiografía con facilidad en las fundiciones o productos soldados.

En este proceso, se necesita equipo relativamente caro y poco portable o localizado permanente. Existe una necesidad estricta en el área de prueba para proteger a los trabajadores de los efectos nocivos de la radiación. Los operadores necesitan de un entrenamiento

extensivo en el uso del equipo y la interpretación del film (fotografía).

#### B. Inspección Por Corrientes Eléctricas Parásitas De Eddy.

Este método requiere de equipo especial que produzca un campo magnético alternante, para inducir corrientes pequeñas en el material de prueba.

La técnica por corrientes parásitas se utiliza para inspeccionar eléctricamente materiales conductores en busca de defectos, irregularidades en estructura y variaciones en composición.

Un empleo importante que se le da a la prueba es la inspección de materiales para detectar posibles variaciones con el tratamiento térmico o con posibles derivaciones en la composición química. Esta aplicación requiere el uso de dos bobinas. Una pieza estándar se coloca en una bobina y la pieza a prueba en la otra bobina. La aceptación o rechazo de la pieza a prueba puede determinarse comparando las gráficas de las dos piezas, que aparecen sobre la pantalla de un osciloscopio.

El ensayo por corrientes parásitas puede emplearse para detectar defectos superficiales y subsuperficiales, espesor de placas o tubos y espesores de capas de revestimiento electrolíticos.

#### C. Ensayo Ultrasónico

Este ensayo puede aplicarse a una amplia variedad de materiales y formas: metales, plásticos, cerámica, vidrio; laminado, fundiciones, soldadura, etc.

Las ondas ultrasónicas para ensayos no destructivos generalmente las producen materiales piezoeléctricos, los cuales sufren un cambio en su dimensión física cuando se someten a un campo eléctrico lo cual se traduce en vibración o golpeteo. Esta conversión de energía eléctrica a energía mecánica se conoce como efecto piezoeléctrico. Una onda ultrasónica se transmite a través de una sustancia o un medio y su acción se interpreta en tres formas para mostrar defectos. En la técnica pulso-eco, se utiliza un solo transductor<sup>9</sup> que sirve como transmisor y como receptor (ver figura 1.26), las ondas se reflejan en la superficie lejana y desde las superficies internas de defectos. Un osciloscopio traza las reflexiones (picos) indicando la posición y tamaño de los defectos (ver figura 1.27).

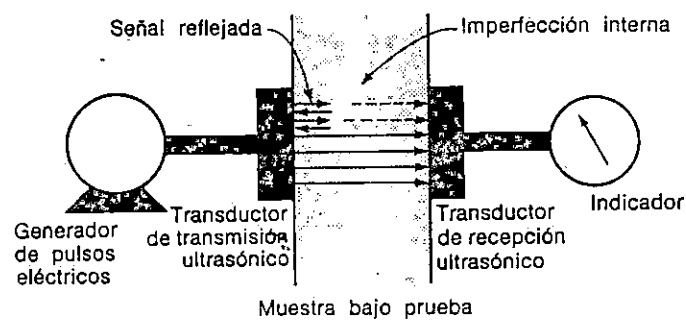


Figura 1.26 Métodos de inspección ultrasónica, el de transmisión y el de eco-pulsos.

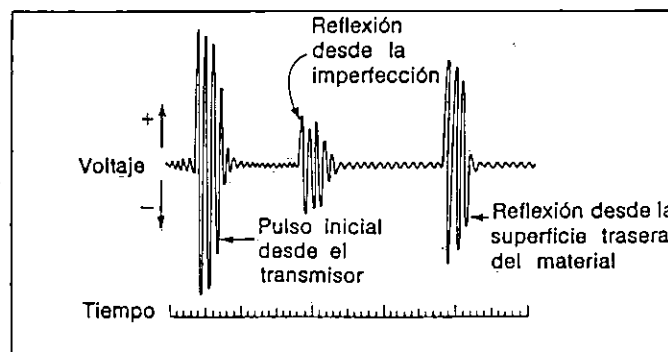


Figura 1.27 Gráfica en un osciloscopio por el método de eco-pulsos de inspección ultrasónica.

<sup>9</sup> Transductor: Es un dispositivo que convierte una forma de energía a otra

En la técnica de transmisión continua, se utiliza un transductor en cada lado del objeto que va a revisarse. Si al cristal transmisor se le aplica un pulso eléctrico de la frecuencia deseada, las ondas ultrasónicas producidas se desplazarán a través de la muestra hasta el otro lado, donde se encuentra el transductor de recepción (ver figura 1.26). La energía perdida en el tránsito debido a las reflexiones indica los tamaños y las posiciones de los defectos.

La técnica de resonancia aplica ondas ultrasónicas con frecuencias dentro de ciertos márgenes. La energía transmitida por el transductor aumenta la frecuencia resonante del espécimen. Si esta frecuencia es diferente de la observada en una parte estándar del mismo tamaño, indica un defecto.

El ensayo ultrasónico es útil para detectar y localizar defectos como cavidades de contracción (rechupes), vacíos y defectos profundos lo mismo que cercanos a la superficie.

Este ensayo involucra equipo costoso y requiere entrenamiento intensivo para desarrollar operadores calificados.

#### D. Ensayos Por Partículas Magnéticas

Este es un método para detectar la presencia de fisuras, recubrimientos, rasgones, inclusiones y discontinuidades en materiales ferromagnéticos como el hierro y el acero. El método detectará discontinuidades de la superficie demasiado finas para apreciarse a simple vista y también detectará discontinuidades ligeramente por debajo de la superficie. No es aplicable a materiales

no magnéticos. El principio básico de la inspección de partículas magnéticas es fácilmente entendido por que únicamente existen tres pasos:

1. Magnetización de la pieza
2. Aplicación de la partículas magnéticas
3. Interpretación de la distribución de las partículas

La inspección utilizando partículas magnéticas esta basada en el hecho de que cuando un material o parte que está siendo probada es magnetizada, las discontinuidades que se encuentran en dirección transversal al campo magnético distorsionará este campo causando un campo de fuga a través y directamente sobre la discontinuidad.

La presencia de este campo de fuga y por consiguiente la discontinuidad, es detectada por el uso de polvo magnético ferroso finamente dividido el cual es aplicado a la parte.

Entonces, estas, partículas magnéticamente sostenidas en su lugar, indicarán la ubicación de una discontinuidad, su tamaño, forma y extensión.

Las partículas pueden ser aplicadas mediante el uso del método seco y el método húmedo.

Un polvo seco es el preferido para ser utilizado en superficies con buen acabado y para detectar fallas superficiales. Es aplicado mediante un rociado o soplado. El polvo magnético está disponible en colores que contrastan con el color de la pieza que está siendo probada (polvos rojos o negros).

En el método húmedo, las partículas están suspendidas en una base líquida de aceite o agua y son aplicados bañando o sumergiendo la pieza. Estos pueden ser visibles a través de una variedad de colores o mediante el uso de polvos magnéticos fluorescentes, estos emiten luz cuando son inspeccionados con una lámpara de luz negra(ultravioleta).

Para este método es necesario emplear apropiadamente métodos de magnetización, para asegurar que el campo magnético formado esté perpendicular a la discontinuidad y lograr la indicación más clara, tal como se muestra en la figura 1.28.

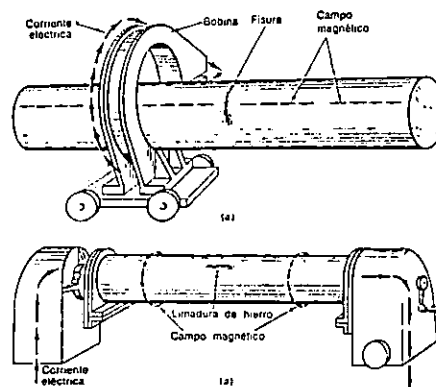


Figura 1.28 Ilustración de dos clases de magnetización: a) Magnetización longitudinal; b) magnetización circular. (Magnaflux Corporation; Chicago, III).

Para fines de magnetización se utiliza la corriente directa, corriente alterna y la corriente alterna rectificada. La corriente directa es más sensible que la alterna para detectar discontinuidades no abiertas a la superficie. La corriente alterna detectará discontinuidades abiertas a la superficie y se emplea cuando la detección de este tipo de discontinuidad es el único fin de la prueba. Cuando la corriente



alterna está rectificadas proporciona un campo magnético más penetrante.

#### E. Ensayo Por Líquidos Penetrantes

Este método de ensayo no destructivo está generalmente disponible para materiales ferrosos y no ferrosos. Este proceso mostrará discontinuidades superficiales sin importar el tamaño; forma y dirección.

Este involucra la utilización de un penetrante en una base de aceite, el cual se introduce en aberturas superficiales mediante acción capilar. Debido a esta acción capilar, los ensayos con líquido penetrante son muy utilizados para detectar fisuras, contracciones, porosidades, laminaciones y discontinuidades similares en metales, plásticos, vidrio y cerámica.

Sin embargo, existen muchas desventajas en el proceso, únicamente revelará defectos que están abiertos a la superficie.

Para este método se utilizan cinco pasos básicos que son:

- 1.) Preparación de la superficie. De las partes a ser inspeccionadas deben ser limpiadas y secadas antes de la aplicación del penetrante.
- 2.) El penetrante es entonces aplicado, luego dejamos un tiempo para permitir el proceso de penetración bajo acción capilar.

- 3.) Después del período de penetración, el penetrante en exceso es removido mediante el uso de un lavado con agua o utilizando un solvente.
- 4.) Se aplica un agente revelador, el cuál absorbe el penetrante de cualquier falla o grieta y forma una indicación con contraste de colores.
- 5.) Inspección, entonces la pieza es examinada visualmente para ubicar discontinuidades.

Con el propósito de hacer la inspección más fácil, se utilizan tres tipos de penetrantes:

- 1) Penetrante Colorante, son visibles y producen un contraste de color de alta resolución (usualmente rojo) que proporciona un contraste con el tipo de revelador.
- 2) Penetrante Fluorescente. Son aquellos que brillan cuando son iluminados mediante el uso de luz negra (ultravioleta). Generalmente son más sensitivos que el método colorante penetrante.
- 3) Penetrantes de doble sensibilidad. Son aquellos que emplean el método visible y fluorescente. Estos son visibles en luz normal y luz negra (ultravioleta).

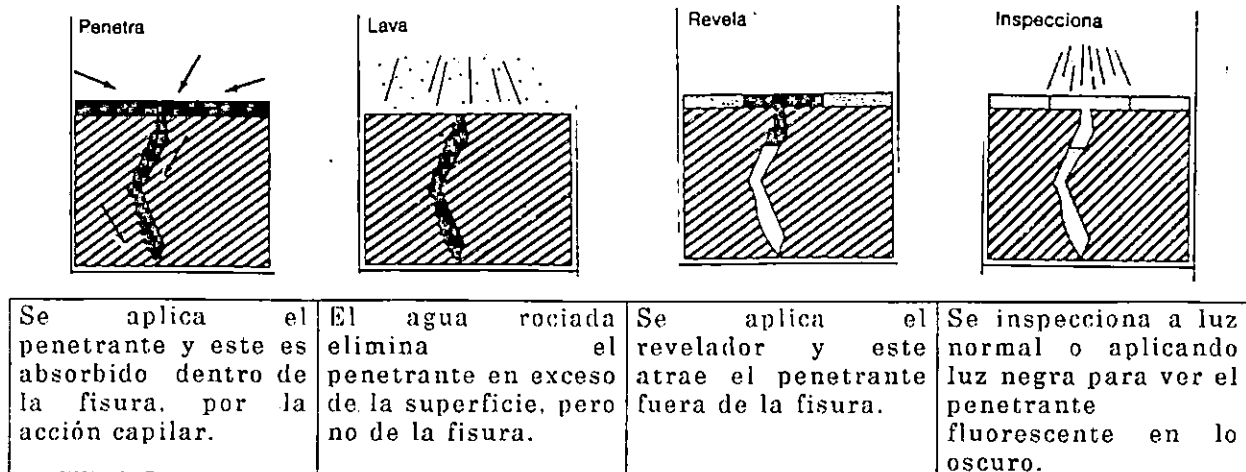


Figura 1.29 Pasos principales en el método de inspección por líquidos penetrantes.

### 1.2.2 Ensayos o Pruebas Destructivas

En esta sección se estudiarán diversos ensayos que se utilizan para medir cómo se comporta un material al aplicarle una fuerza. Los resultados de estas pruebas constituyen las propiedades mecánicas del material.

#### A. Ensayo De Tensión

El ensayo de tensión (o de tracción) mide la resistencia de un material a la aplicación gradual de una fuerza tensora. Un dispositivo de prueba se muestra en la Figura 1.30, una probeta típica tiene un diámetro de 0.505 plg y una longitud de calibración de 2 plg. La probeta se fija en la máquina de ensayo de materiales y se aplica una fuerza  $F$ , llamada carga. Un deformímetro o extensómetro se usa para medir el alargamiento de la probeta entre las marcas de calibración cuando se aplica la fuerza. Entonces, la deformación o

alargamiento unitario puede determinarse dividiendo la deformación medida entre la longitud original marcada en la probeta.

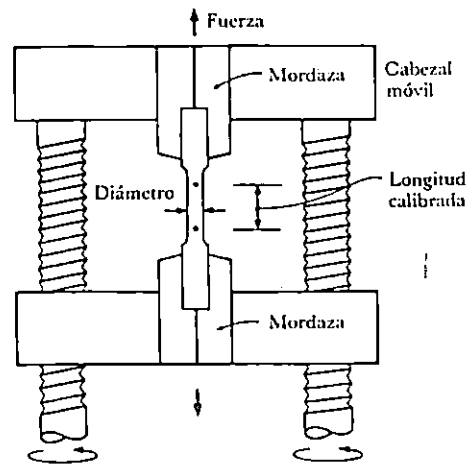


Figura 1.30 Se aplica una fuerza tensora por medio del cabezal móvil a una probeta o muestra de material en el ensayo de tensión.

La figura 1.31 muestra la relación entre esfuerzo unitario y deformación unitaria  $\epsilon$ , encontrada experimentalmente, mediante la gráfica esfuerzo y deformación para un material dúctil y la gráfica de la figura 1.32 para un material frágil.

Esfuerzo y deformación de uso en ingeniería. Los resultados de un ensayo simple pueden aplicarse a todos los tamaños y formas de probeta para un material dado si se transforma la fuerza a esfuerzo, y la distancia entre las marcas de calibración a deformación unitaria. El esfuerzo y la deformación de uso en ingeniería se definen mediante las siguientes ecuaciones.

$$\text{Esfuerzo} = \sigma = \frac{F}{A_0}$$

$$\text{Deformación unitaria} = \epsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

donde:

$A_0$ : es el área original de la sección transversal de la muestra antes de iniciar la prueba,

$l_0$ : es la distancia original entre las marcas de calibración y

$l$ : es la distancia entre las marcas después de aplicar la fuerza  $F$ .

La curva de esfuerzo-deformación se utiliza normalmente para registrar los resultados de un ensayo de tensión.

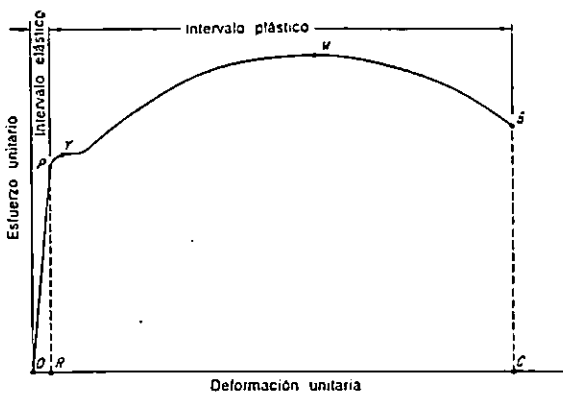


Figura 1.31 Gráfica esfuerzo vs. deformación para un acero dúctil

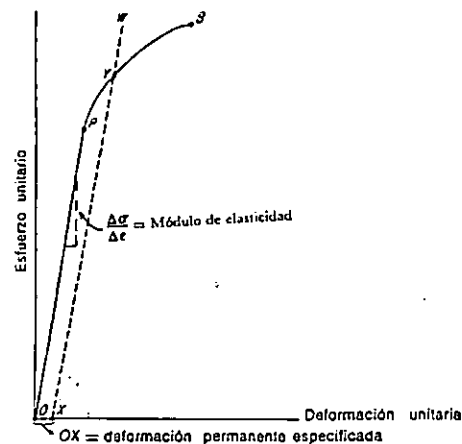


Figura 1.32 Gráfica Esfuerzo vs. deformación para un material frágil.

Las propiedades que se pueden determinar con un ensayo de tensión se explican a continuación:

- ✓ Límite Proporcional: Es el tramo de la recta OP de las figuras 1.31. y 1.32. En este intervalo, el esfuerzo y la deformación son proporcionales entre sí. El punto P se conoce como límite de proporcionalidad.
- ✓ Punto de Cedencia o Fluencia. Conforme la carga en la pieza aumenta más allá del límite elástico, se alcanza un esfuerzo al

cual el material continúa deformándose sin que haya incremento de carga. El esfuerzo en el punto Y de la figura 1.31 se conoce como punto de cedencia o fluencia. Este fenómeno ocurre sólo en ciertos materiales dúctiles.

- ✓ Resistencia de Cedencia o Fluencia. Por lo general, este valor se determina por el método de la deformación permanente. En la figura 1.32, la deformación especificada OX se marca sobre el eje de la deformación. A continuación, se traza la línea XW con el diagrama esfuerzo deformación. El valor de la deformación permanente está especificado entre 0.10 y 0.20% de la longitud calibrada.

La mayoría de los materiales no ferrosos y los aceros de alta resistencia no tienen un punto de cedencia definido.

- ✓ Resistencia límite. Es el esfuerzo máximo desarrollado por el material, basado en el área transversal original. Punto M de la figura 1.31. para un material frágil se rompe cuando es llevado hasta la resistencia límite (punto B de la figura 1.32), en tanto que el material dúctil continuará alargándose.
- ✓ Resistencia a la ruptura. Es el esfuerzo a la cual el material falla o se rompe (punto B).
- ✓ Ductilidad. La ductilidad mide el grado de deformación que un material puede soportar sin romperse. Existen dos procedimientos para describir la ductilidad:

Primero, se podría medir la distancia entre las marcas hechas en la probeta antes y después del ensayo. El porcentaje de alargamiento o elongación expresa la distancia que se estira una probeta antes de la ruptura.

$$\text{Elongación} = \frac{l_f - l_o}{l_o} \times 100$$

donde:

$l_f$ : es la distancia ente las marcas después de romperse la probeta.

$l_o$ : es la distancia original generalmente 2".

El segundo consiste en medir el cambio porcentual del área de la sección transversal en el punto de fractura antes y después de la prueba. El porcentaje de adelgazamiento o reducción de área describe la disminución del área transversal que experimenta la probeta durante la prueba de ruptura.

$$\text{Reducción de área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

donde:

$A_f$ : es el área transversal final en la fractura.

$A_o$ : es el área transversal inicial.

- ✓ Módulo de Elasticidad o Módulo de Young. Es la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica. Esta relación se denomina ley de Hooke (ver figura 1.32).

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \text{módulo de elasticidad}$$

El módulo de Young está estrictamente relacionado con las fuerzas que unen los átomos en el material.

## B. Ensayo De Fatiga

En muchas aplicaciones un componente se somete a la aplicación repetida de un esfuerzo inferior al de fluencia del material. Este esfuerzo repetido puede ocurrir como resultado de cargas de rotación, flexión, o aún de vibración. Aunque el esfuerzo sea inferior al punto de fluencia, el metal puede fracturarse después de numerosas aplicaciones del esfuerzo. Este tipo de falla es conocido como *fatiga*.

Se pueden efectuar pruebas de fatiga en laboratorios en cuatro tipos de máquinas de prueba:

- 1) eje-empuje (push-pull)(carga axial),
- 2) flexión con rotación (rotando una viga empotrada con una carga final estacionaria)
- 3) flexión invertida (aplicando un momento flexionante alterno a una muestra de placa plana);
- 4) torsión (aplicando una torsión)

Generalmente se mantiene constante el ciclo de esfuerzo durante la prueba.

Un método común par medir la resistencia a la fatiga es el ensayo de la viga en voladizo rotatoria (figura 1.33). El extremo de una probeta maquinada cilíndrica se monta en un dispositivo acoplado a un motor. En el otro extremo se suspende un peso. La muestra soporta inicialmente una fuerza de tensión que actúa en la superficie superior, mientras que la superficie inferior se comprime. Después de que la muestra gira  $90^\circ$ , los sitios que originalmente estaban en tensión y en compresión no reciben esfuerzo alguno sobre ellos. Después, a una rotación de  $180^\circ$ , el material que estaba



originalmente en tensión está ahora en compresión y viceversa. De aquí que el esfuerzo en cualquier punto de la probeta pasa por un ciclo completo que va de cero a máxima tensión, y de cero a máxima compresión.

Después de un número suficiente de ciclos, la muestra puede fallar. Generalmente, se ensayan varias muestras a diferentes esfuerzos aplicados y los esfuerzos se grafican en función del número de ciclos que lleva a la ruptura (figura 1.34).

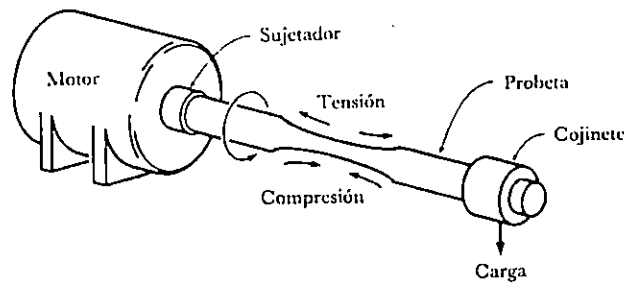


Figura 1.33 Dispositivo de prueba a la fatiga de viga en voladizo rotatoria.

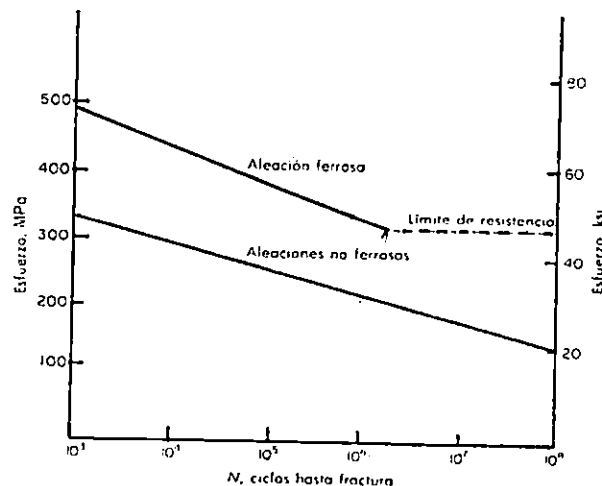


Figura 1.34 Curvas ideales de fatiga para aleaciones ferrosas y no ferrosas. Para las aleaciones ferrosas se alcanza un límite de resistencia cercano de  $10^6$  a  $10^7$  ciclos bajo el cual no ocurre falla por esfuerzo. Para las aleaciones no ferrosas no se alcanza un límite de fatiga aún más allá de  $10^8$  ciclos.

Los dos resultados más importantes de una serie de ensayos de fatiga son la duración a la fatiga para un esfuerzo en particular, y el límite de resistencia a la fatiga para el material. La duración a la fatiga indica cuánto dura un componente cuando un esfuerzo  $\sigma$  se aplica repetidamente al material.

El límite de resistencia a la fatiga es el esfuerzo por debajo del cual la falla por fatiga nunca ocurre.

Las pruebas de fatiga se utilizan ampliamente para estudiar el comportamiento de los materiales no sólo para observarlos bajo distintos tipos e intensidades de cargas fluctuantes, sino también para determinar el efecto de la corrosión, las condiciones de superficie, la temperatura, el tamaño y la concentración de esfuerzos.

### C. Ensayo De Dureza

Aunque la prueba de dureza no da en forma directa tanta información detallada como la prueba a la tensión, es tan rápida y conveniente que tiene un uso más amplio. Por lo común la dureza se define como la resistencia de un material a la penetración.

En las pruebas más aceptadas, se oprime un indentador en la superficie del material con una carga conocida aplicada lentamente, y la extensión de la impresión resultante se mide en forma mecánica u óptica. Una impresión grande hecha por un indentador con una carga dada indica un material suave, y una impresión pequeña indica un material duro.

La dureza principalmente es una función del límite elástico (esto es, resistencia a la cedencia) del material y, en menor extensión, una función del coeficiente de endurecimiento por trabajo. Además, ya que el límite elástico, la resistencia a la tensión, la ductilidad y la tenacidad, tienen una relación fija entre sí para un material dado que tiene una historia dada, es posible deducir estas propiedades mecánicas mediante lecturas de dureza en un material dado cuya historia es conocida. Las pruebas de dureza más comunes pueden clasificarse como pruebas de macro o microdureza. Las pruebas de macrodureza permiten escrutar un área grande aceptable de la superficie y sus impresiones pueden observarse a simple vista. Las impresiones de las pruebas de microdureza son muy pequeñas, de modo que se requiere un microscopio para verlas.

Entre las pruebas de macrodureza comúnmente usadas tenemos el ensayo Rockwell y el Brinell (ver figura 1.35).

En el ensayo de dureza Brinell; una esfera o bola de acero duro, normalmente de 10mm de diámetro, se presiona sobre la superficie del material. Se mide el diámetro de la marca producida en la superficie y se calcula el índice de dureza Brinell (BHN, de Brinell hardness number) mediante la ecuación siguiente.

$$\text{BHN} = \frac{F}{(\pi/2) D (D - \sqrt{D^2 - D_i^2})}$$

donde:

F : es la carga aplicada en kilogramos fuerza,

D : es el diámetro del penetrador en milímetros, y

D<sub>i</sub> : es el diámetro de la marca en milímetros.

El ensayo de dureza Rockwell; utiliza una bola de acero de diámetro pequeño para materiales suaves, y un cono de diamante (Brale) para materiales más duros. La profundidad de la penetración la mide automáticamente el instrumento de prueba, y es convertida a un índice de dureza Rockwell. Se utilizan muchas variantes del ensayo Rockwell, como se muestra en la Tabla 1.1.

TABLA 1.1 Comparación entre ensayos típicos de dureza

Ensayo	Penetrador	Carga	Aplicación
Brinell	Bola de 10 mm	3000 kg	Hierro fundido y acero
Brinell	Bola de 10 mm	500 kg	Aleaciones no ferrosas
Rockwell A	Cono	60 kg	Materiales muy duros
Rockwell B	Bola de 1/16 plg	100 kg	Latón, acero de baja resistencia
Rockwell C	Cono	150 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell D	Cono	100 kg	Acero de alta resistencia
Rockwell E	Bola de 1/8 plg.	100 kg	Materiales muy suaves
Rockwell F	Bola de 1/16 plg.	60 kg	Aluminio, materiales suaves
Vickers	Pirámide de diamante	10 kg	Materiales duros
Knoop	Pirámide de diamante	500 g	Todos los materiales

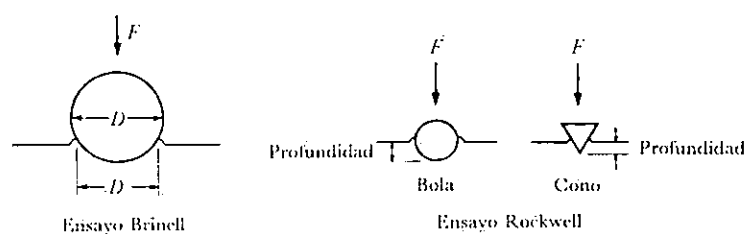


Figura 1.35 Ensayos de dureza Brinell y Rockwell

Las impresiones hechas por el probador Rockwell son mucho más pequeñas que las del penetrador Brinell. Por tanto, la prueba Rockwell no debe usarse en aleaciones no homogéneas como hierro

fundido, porque está sujeta a errores por puntos pequeños suaves o duros y por vacíos pequeños. Por otra parte, ya que las impresiones son tan pequeñas, la prueba se considera no destructiva en muchas aplicaciones. Además, los especímenes delgados pueden probarse por la prueba Rockwell mejor que con la prueba Brinell. La prueba Rockwell puede utilizarse para probar materiales en márgenes más amplios de dureza porque se dispone de muchas combinaciones de penetradores y carga. Puede usarse en plásticos lo mismo que en materiales metálicos.

Las pruebas de microdureza comúnmente usadas son el ensayo Vickers y Knoop.

Ensayo Vickers; utiliza un instrumento marcador piramidal de diamante de base cuadrada con un ángulo incluido de  $136^\circ$  entre las caras opuestas (véase figura 1.36), se presiona sobre la superficie de material. Luego se mide la diagonal de la marca producida en la superficie y se calcula el número de dureza piramidal Vickers (HV) por medio de la ecuación siguiente:

$$HV = \frac{1.854P}{d_1^2}$$

donde:

P : carga aplicada, en Kgf

$d_1$  : longitud de la diagonal del cuadrado de la impresión, en mm



Figura 1.36 Marcador piramidal de diamante Vickers

El intervalo de carga está generalmente entre 1 y 120 Kgf. El probador de dureza Vickers funciona bajo el mismo principio que el probador Brinell.

Ensayo Knoop; el marcador Knoop (ver figura 1.37) tiene forma piramidal que produce una impresión en forma de diamante, y tiene diagonales largas y cortas a una razón aproximada de 7:1. la forma piramidal empleada tiene incluidos ángulos longitudinales de  $172^{\circ}30'$  y ángulos transversales de  $130^{\circ}$ . La profundidad de impresión es como de  $1/30$  de su longitud. Como en la prueba Vickers, se mide la diagonal mas larga de la impresión producida en la superficie y se calcula el número de dureza Knoop (HK), mediante la fórmula siguiente:

$$HK = \frac{14.229P}{l^2}$$

donde:

P : es la carga aplicada, en Kgf

l : es la longitud de la diagonal mayor, en mm

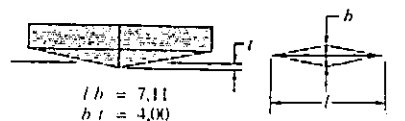


Figura 1.37 Marcador Piramidal Knoop de diamante

#### D. Ensayo De Impacto

Se ha observado que, aunque ciertos materiales presentan una considerable resistencia a las cargas estáticas, se fracturan con facilidad con cargas dinámicas. Un buen ejemplo es el vidrio, que

puede soportar considerables esfuerzos de tracción y compresión, pero se astilla con un golpe ligero con un martillo. Otros materiales que tienen el mismo comportamiento son los hierros fundidos, plásticos rígidos, cerámicas y aceros al alto carbono. Las pruebas de impacto se han creado para estudiar el comportamiento de los materiales al recibir un golpe. El propósito principal de las pruebas de impacto es determinar la energía absorbida por una muestra hasta ocasionar la fractura. La propiedad relacionada con las pruebas de impacto es la tenacidad, que se define como la capacidad de un material para resistir la fractura al someterlo a carga de impacto. Muchas partes y estructuras mecánicas como tornillos, ejes, martillos, yunques y matrices de forja se someten a pruebas de impacto o dinámicas.

Las pruebas de impacto son de tres tipos: *torsión*, *tensión* y *viga*, según la forma en que se aplique la carga a la muestra. Las pruebas de impacto de torsión se usan rara vez y suelen ser para aceros de herramientas. Las pruebas de impacto de tensión tienen cierto uso, pero hasta la fecha no se han normalizado. Las pruebas de impacto de viga o brazo son las más comunes y son de dos clases: *Izod* y *Charpy* y difieren en el modo de aplicar la carga a la muestra.

En la prueba Izod, se aplica la carga a una muestra colocada como viga en voladizo, soportada por un extremo y en donde se golpea el otro extremo (figura 1.38 a).

En la prueba Charpy la muestra se carga como un viga con apoyo sencillo o libre y se golpea en el lado opuesto a la muesca (figura 1.38b). En ambas pruebas se utilizan muestras con muesca o no (ver figura 1.39) que luego se fracturan por flexión. Las probetas con

muecas en V miden de mejor manera la resistencia del material a la propagación de la fractura.

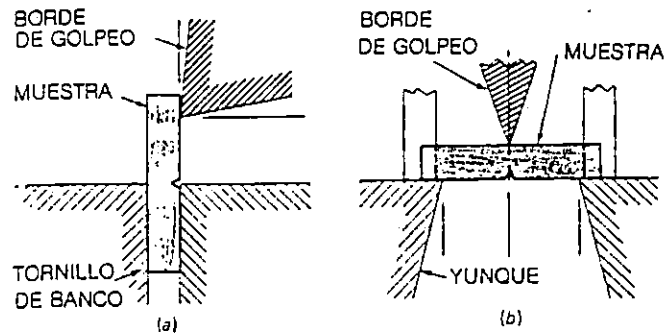


Figura 1.38 Métodos para pruebas de impacto, (a) Izod; (b) Charpy

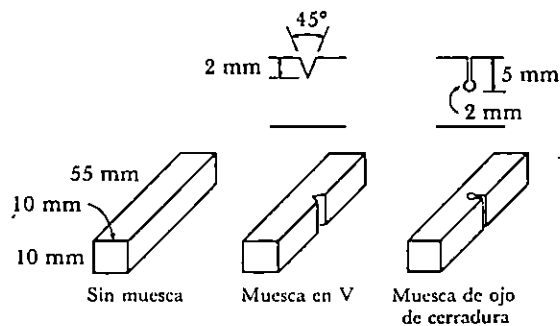


Figura 1.39 Muestras Típicas

Varias asociaciones (ASTM, UNE, IRAM-IAS, etc) han estandarizado las pruebas Izod y Charpy para materiales metálicos y plásticos.

La prueba de impacto Hatt-Turner se ha empleado para la madera, pero es de uso muy raro en la manufactura.

Existen diversos tipos de máquinas comerciales para pruebas de impacto (ver figura 1.40). Las máquinas universales para prueba de impacto están construidas para fracturar la muestra de un solo golpe



a una velocidad; es decir, entre 3-6 m/s (Según ASTM). Y tienen indicación directa en pies-libras o Julios de la energía absorbida por la muestra.

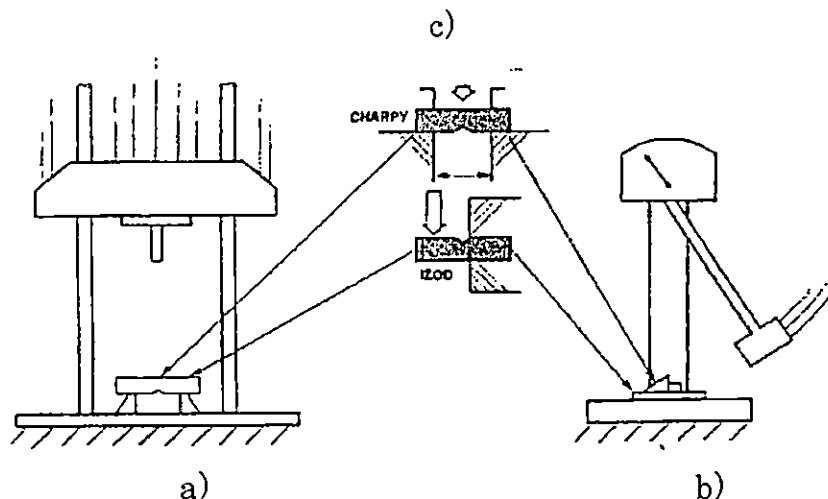


Figura 1.40 Máquinas Universales. (a) Máquina de caída libre; (b) Máquina tipo péndulo; (c) Probetas.

Los resultados de la prueba de impacto son útiles al comparar, para una composición dada, los efectos de la historia previa en la tenacidad. De interés particular a este respecto, es el efecto del tratamiento térmico en las propiedades del acero. El sobrecalentamiento del acero menoscaba su tenacidad. Esto puede detectarse con facilidad mediante una prueba de impacto en barra con muesca y por examen de la apariencia de la superficie fracturada. Otra aplicación importante es el estudio de los efectos de los ciclos de revenido en los aceros endurecidos. Ciertos ciclos son dañinos a la tenacidad de algunos aceros aleados, y la prueba de impacto en barra con muesca es útil para detectar esto. Otra aplicación es la determinación de las temperaturas de fragilización, en particular para las aleaciones ferrosas. Muchas composiciones de acero tienden a perder tenacidad conforme se aproximan a temperaturas más bajas del punto de congelación. La prueba de impacto en barra con muesca

proporciona un medio para determinar los márgenes de fragilización para composiciones diferentes. El ensayo de impacto se utiliza mejor para la comparación y selección de los materiales, que para obtener criterios de diseño.

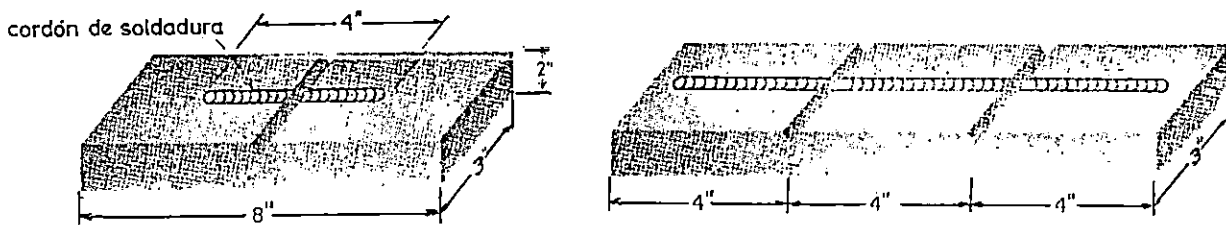
#### E. Ensayos De Flexión Lenta

A veces se emplea un ensayo de flexión lenta, utilizando probetas en forma de viga de poco espesor, para determinar la temperatura de transición. Durante la flexión de una viga sin entalla y cuando el ancho es mucho mayor que el espesor, se produce un estado biaxial de tensiones. Cuando la relación entre ancho y espesor es aproximadamente la unidad, la tensión es fundamentalmente uniaxial, pero al aumentar el ancho la relación entre la tensión transversal y la longitudinal se aproxima al valor  $\frac{1}{2}$ , que es la condición para un estado de tensiones planas. El ensayo de flexión sin entalla representa una condición intermedia entre la del ensayo de tracción y la de choque sobre probeta entallada. Usualmente, la entalla se emplea para introducir una tensión triaxial, con lo que aumenta la temperatura de transición.

El efecto de añadir la condición de una velocidad de carga elevada es complicado. En unos estudios comparativos sobre la temperatura de transición medida con un ensayo de flexión lenta y un ensayo de choque Charpy, empleando probetas idénticamente entalladas, se encontró que la temperatura de transición determinada sobre el criterio de ductilidad era más alta que en el ensayo de choque, pero la determinada teniendo en cuenta el aspecto de la fractura era más baja en el caso de impacto. De este y otros experimentos parece

deducirse que la temperatura de transición determinada por el aspecto de la fractura no es sensible a la velocidad de deformación.

Las probetas de la figura 1.41 se emplean frecuentemente para estudiar el efecto de la soldadura y de las variables metalúrgicas en la tenacidad a la entalla. Los dos tipos de probeta llevan un cordón de soldadura longitudinal y la entalla está hecha de tal forma que el metal aportado, la zona afectada por el calor y el material base inalterado queden sometidos a las tensiones creadas en el fondo de la entalla.



Probeta de flexión de Kinzel

Probeta de flexión de Lehigh

Entalla :1 mm de radio; 0.08 plg de profundidad

Figura 1.41 Probetas para flexión con entalla

Las curvas carga-flecha obtenidas permiten calcular las energías absorbidas hasta la carga máxima, desde el punto de carga máxima hasta la fractura, o la energía total absorbida. También se miden la contracción en la entalla y el ángulo de flexión.

## F. Ensayos Especiales Para Determinar Temperaturas De Transición

Como resultado de las investigaciones sobre la fractura frágil de los barcos se desarrollaron nuevos ensayos para determinar la temperatura de transición. El espacio disponible solo nos permite dar descripciones breves de los más interesantes con indicación de los que han tenido más aceptación.

En cierto número de estos ensayos se somete la entalla a un esfuerzo simultáneo de tracción y flexión. Esto puede conseguirse cargando excéntricamente una probeta de tracción entallada o empleando una probeta como la de la figura 1.42a. Esta probeta es la que emplea la Marina de guerra de los Estados Unidos en el ensayo de desgarre. Se utiliza el espesor total de la plancha de acero. La ventaja de combinar una carga de tracción y una de flexión, con respecto al empleo de una carga única de flexión, es que se puede eliminar la región de compresión desarrollada por la carga de flexión aplicando una carga de tracción suficientemente elevada. Puesto que tal región de compresión puede retardar la propagación de la grieta, en el ensayo de carga combinada se facilita dicha propagación.

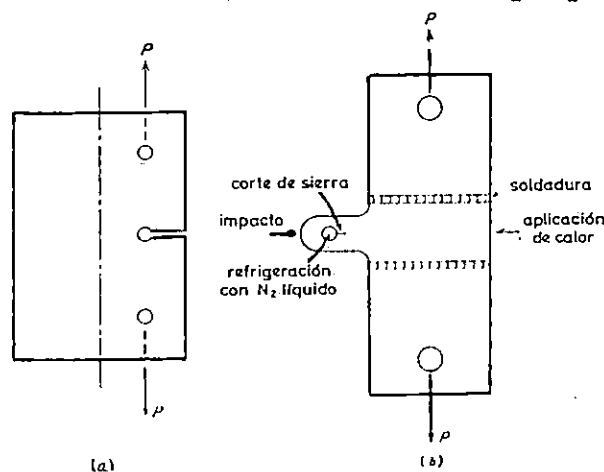


Figura 1.42 a) Probetas de desgarre utilizadas en la Marina americana; b) probetas empleadas en el ensayo Robertson.

El investigador Robertson ha ideado un interesante ensayo para determinar la temperatura a que se detiene una grieta que se propaga rápidamente. A una probeta de la forma indicada en la figura 1.42b se le hace con una sierra de joyero, un corte iniciador de la grieta en uno de los lados, y este lado se refrigera con nitrógeno líquido, mientras que el otro se mantiene a una temperatura más elevada. De esta forma se mantiene un gradiente de temperatura a través del espesor de la probeta. Mediante un disparo de pistola en el extremo frío se inicia la grieta que, dada la energía aportada por el impacto, no se propagaría a mucha distancia, pero la tensión de tracción aplicada tiende a mantenerla en crecimiento.

La grieta se propaga a través del ancho de la probeta hasta alcanzar una temperatura para la cual la fluencia plástica producida es suficiente para detener el avance. Esta detención de la grieta se produce cuando la deformación plástica requerida para que continuase la propagación no puede ser producida por la energía elástica almacenada. Para cada valor de la tensión de tracción aplicada hay una temperatura por encima de la cual no puede propagarse la grieta.

Los datos de Robertson mostraron que esta temperatura de detención disminuye bruscamente para la mayoría de los aceros suaves, cuando la tensión de tracción disminuye a  $7 \text{ Kgf/mm}^2$ , aproximadamente. En estos aceros no se puede detener la grieta si la tensión excede de este valor y la temperatura es inferior a la ambiente. Este ensayo ha sido modificado para poder emplearlo sin gradiente de temperatura, es decir, manteniendo toda la probeta a la temperatura que se desee.

El ensayo de caída (de un peso) fue desarrollado por el laboratorio de investigación naval de los Estados Unidos, y tiene la finalidad de medir la tendencia a la iniciación de la fractura frágil en presencia de una entalla similar a una grieta. La probeta es una plancha plana con un cordón superpuesto de metal duro, de 3 pulg (75 mm) de longitud, aplicado en el centro y entallado hasta la mitad de su espesor. La cara soldada de la probeta se coloca hacia abajo, apoyando la probeta por sus extremos, y se deja caer en el centro un peso de 60 lb. El cordón de metal duro se agrieta de manera frágil, produciéndose una entalla aguda, semejante a una grieta. Como la finalidad del ensayo es ver cuándo puede producirse la fractura en una entalla aguda, siendo restringida la posibilidad de deformación plástica, se emplea un dispositivo de fijación que solo permite a la probeta una flexión de 5°. Solo 3° bastan para producir la grieta en el cordón frágil de soldadura. Los 2° adicionales permiten comprobar si el acero puede o no deformarse en presencia de una entalla semejante a una grieta. Es un ensayo de "pasa o no pasa", en el que, a una temperatura determinada, la probeta rompe completamente o se mantiene intacta. La máxima temperatura de fractura se denomina temperatura de transición a ductilidad nula. Este ensayo determina una temperatura de transición muy nítida y es fácil de reproducir.

a) Significado De La Temperatura De Transición.

La tenacidad a la entalla de un material se puede establecer realmente sobre la base de dos temperaturas distintas de transición. La figura 1.43 muestra la curva de energía absorbida, en función de la temperatura, para un material ideal. La temperatura de transición de la ductilidad está relacionada con la tendencia a la

iniciación de la fractura. Por debajo de ella se producen fácilmente fracturas de despegue completamente frágiles.

La temperatura de transición en el aspecto de la fractura se relaciona con las características del material en lo que respecta a la propagación de las grietas. Por encima de esta temperatura de transición no se propagan las grietas en forma catastrófica, sino que la fractura se produce por cizallamiento, con apreciable absorción de energía. En la región intermedia entre las dos temperaturas de transición las fracturas se inician difícilmente, pero una vez iniciadas se propagan rápidamente, con poca absorción de energía.

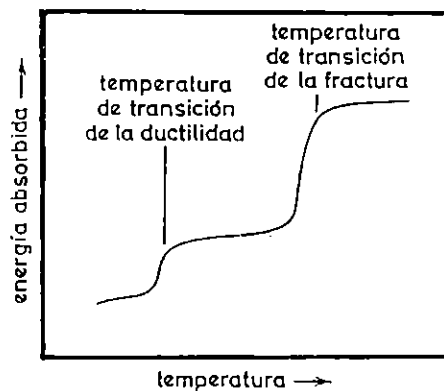


Figura 1.43 Concepto de las dos temperaturas de transición.

Los materiales reales no presentan dos temperaturas distintas de transición como las de la figura 1.43. son mucho más típicas las curvas, como la de la figura 1.44 que se obtienen en el ensayo de probetas Charpy con entalla en V del acero suave. La temperatura de transición de la ductilidad se presenta para un nivel de energía absorbida de 0.7 a 2.75 Kgf-m (5 a 20 lb-pie) y es corriente fijar un valor de 15 lb-pie (2 Kgf-m), para determinar la temperatura de

transición. La temperatura de transición de la ductilidad se puede también determinar por medidas de la contracción en el fondo de la entalla. La temperatura de transición del aspecto de la fractura se determina fijando el tanto por ciento de superficie de fractura de cizallamiento. Generalmente se suele fijar la cifra de 50% de fractura fibrosa. La temperatura de transición de la fractura es siempre superior a la de transición de la ductilidad, y para un material dado es casi constante, aunque varíen la forma de la probeta, la agudeza de la entalla y la velocidad de carga. Por el contrario, la temperatura de transición de la ductilidad depende extraordinariamente de las condiciones de ensayo.

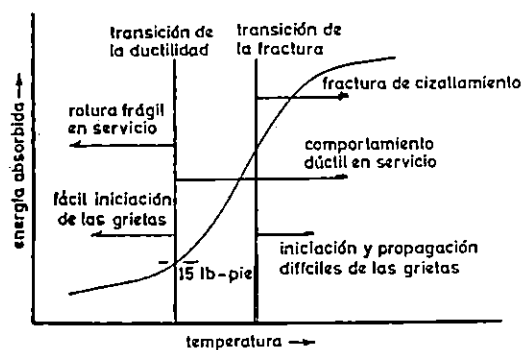


Figura 1.44 Significado de las regiones que diferencia la curva de la temperatura de transición

No hay correlación entre los ensayos Charpy realizados con entalla en V y los realizados con entalla en ojo de cerradura, si para la temperatura de transición se toma el punto correspondiente a una energía absorbida igual al 50% de la máxima. La razón es que, para las probetas en ojo de cerradura, la temperatura así definida se encuentra más próxima a la de transición de la ductilidad, y para las probetas con entalla en V, más cercana a la de transición del tipo de fractura. En cambio, se encuentra una correlación satisfactoria



cuando para ambos se utiliza, como criterio para la temperatura de transición, el de ductilidad.

No todos los materiales presentan una temperatura de transición (figura 1.45). Los metales CC tienen temperatura de transición, pero la mayoría de los metales CCC no la tienen. Los metales CCC pueden absorber altas energías, y éstas decrecen gradual y lentamente conforme disminuye la temperatura.

La energía de impacto corresponde al área delimitada por la curva esfuerzo real deformación real. Los materiales que presentan alta resistencia y alta ductilidad, tienen un tenacidad adecuada (figura 1.46). Los cerámicos, por otro lado, tienen escasa tenacidad debido a que son quebradizos y virtualmente no presentan ductilidad.

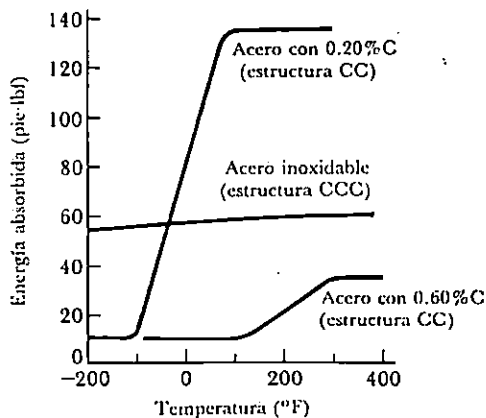


Figura 1.45 Propiedades de dos aceros de bajo carbono (estructura CC) y un acero inoxidable CCC, en un ensayo Charpy con probeta con muescas en V.

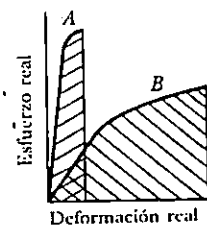


Figura 1.46 El área delimitada por la curva esfuerzo real-deformación real se relaciona con la energía de impacto. Aunque el material B tiene un menor esfuerzo de fluencia, absorbe mayor energía que el material A

## b) Factores Metalúrgicos Que Afectan A La Temperatura De Transición

Variaciones de temperatura mayores de 50°C pueden producir modificaciones de la composición o la microestructura del acero suave. Las mayores variaciones provienen de cambios en el contenido de carbono y manganeso. La temperatura de transición, definida por la energía de 2 Kgf·m (15 lb·pie) en el ensayo Charpy con probeta de entalla en V (transición de ductilidad), se eleva en 14°C para cada 0.1% de aumento en el contenido de carbono y disminuye en 5.5°C por cada aumento de 0.1% en el manganeso. El aumento en el contenido de carbono afecta marcadamente al valor máximo de la energía absorbida y a la forma de las curvas temperatura-energía (figura 1.47). La relación Mn/C debe ser, por lo menos, igual a 3 para que la tenacidad a la entalla sea satisfactoria. Pueden alcanzarse descensos de hasta 50°C, aproximadamente en la temperatura de transición, con relaciones Mn/C mayores a 7 porque, si aumenta el contenido de manganeso a más de 1.4%, se presentan complicaciones por retención de austenita, y porque el carbono no puede hacerse descender del 0.2%, aproximadamente, para conservar las propiedades de tracción requeridas.

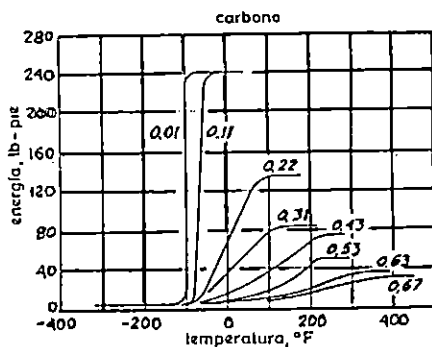


Figura 1.47 Efecto del contenido de carbono sobre las curvas energía-temperatura para aceros recocidos. (J. A. RINEBOLT y W. J. HARRIS, Jr.: Trans. ASM, vol, 43, pág. 1197, 1951.)

El fósforo eleva mucho la temperatura de transición. La temperatura de transición para los 2 Kgf-m en el ensayo Charpy (entalla en V), aumenta en 7.2 °C, aproximadamente, por cada 0.01% de fósforo. Como es necesario controlar el contenido de fósforo, no es recomendable emplear los aceros Bessemer en aplicaciones de baja temperatura. El papel del nitrógeno es difícil de establecer por su interacción con otros elementos, pero generalmente se le considera perjudicial para la tenacidad a la entalla. Se acepta generalmente que el níquel es beneficioso en contenidos de hasta el 2%, y parece eficaz para disminuir la temperatura de transición de la ductilidad. El silicio, en contenidos de hasta el 0.25%, eleva, al parecer, la temperatura de transición. El molibdeno aumenta la transición casi tanto como el carbono, y el cromo apenas tiene efecto en este aspecto.

La tenacidad a la entalla es particularmente sensible al contenido de oxígeno. En el hierro purísimo se ha encontrado que bastan contenidos de 0.003% de oxígeno para que se produzca fractura intergranular con poca absorción de energía. Cuando se incrementó el contenido de oxígeno desde 0.001% hasta un valor máximo de 0.057%, aumentó la temperatura de transición desde -15°C hasta 343°C. En vista de estos resultados, no debe sorprender que el método de desoxidación tenga un efecto importante en la temperatura de transición.

El tamaño de grano afecta fuertemente a la temperatura de transición. Un aumento de una unidad ASTM en el tamaño de grano de la ferrita (lo que realmente representa una disminución en el tamaño medio de grano) produce descensos de hasta 17°C en la temperatura de transición del acero suave. La disminución del

tamaño de grano desde 5 ASTM a 10 ASTM puede hacer pasar la temperatura de transición de 1.38 Kgm (10 lb·pie) del ensayo Charpy (entalla en V) de 21°C a -51°C. Un efecto parecido de disminución de la temperatura de transición con el tamaño de grano se ha observado con los aceros más aleados tratados térmicamente. Muchas de las variables del proceso de fabricación del acero suave afectan al tamaño de grano y, por tanto, a la temperatura de transición. El normalizado después de la laminación en caliente afina el grano, si no se realiza a temperaturas demasiado altas, y, con ello, disminuye la temperatura de transición. La velocidad de enfriamiento desde la temperatura de normalización y el método de desoxidación también hay que tenerlos en cuenta. El enfriamiento al aire y la desoxidación con aluminio proporcionan las temperaturas de transición más bajas. También es beneficioso que la temperatura de acabado de la laminación en caliente sea lo más baja posible.

Los aceros bajos en carbono pueden presentar dos tipos de fenómenos de envejecimiento que producen aumento en la temperatura de transición. El envejecimiento después de temple se debe a la precipitación de carburos después de templar el acero desde, aproximadamente, 700°C. El envejecimiento por deformación se produce en los aceros bajos en carbono que han sido deformados en frío. El trabajo en frío, por sí mismo, puede aumentar la temperatura de transición, pero el envejecimiento por deformación intensifica este efecto, alcanzándose aumentos de 25° a 35°C. El envejecimiento posterior al temple produce menos pérdida en las propiedades de choque que el envejecimiento por deformación. El fenómeno de fragilidad azul, que consiste en una disminución de la resistencia al

choque provocada por un calentamiento a 200°C (aproximadamente; color de revenido, azul), se debe a envejecimiento por deformación.

Las propiedades de choque con entalla de los productos laminados o forjados dependen de la orientación de la probeta. La figura 1.48 muestra la forma típica de las curvas energía-temperatura para probetas cortadas longitudinal y transversalmente de una plancha laminada. Las probetas A y B están orientadas longitudinalmente (respecto a la dirección de laminación); en la A la entalla es perpendicular a la chapa y en la B paralela a ella.

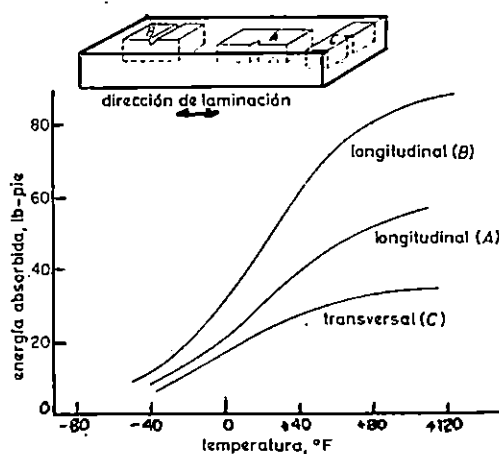


Figura 1.48 Efecto de la orientación de la probeta en las curvas Charpy de la temperatura de transición.

Generalmente se prefiere la orientación de la entalla de la probeta A. En la probeta C la entalla tiene la misma orientación, pero la probeta es transversal a la dirección de laminación. Las probetas transversales se emplean cuando la distribución de las tensiones pueden provocar la propagación de una grieta paralelamente a la dirección de laminación. La figura 1.48 indica que se producen grandes diferencias en las energías máximas absorbidas, pero la diferencia es menor cuando el nivel de energía es inferior a 2.75 Kgf-m (20 lb-pie). Como las temperaturas de transición de la ductilidad se

determinan en este intervalo, no parece que la orientación de probeta y entalla sea muy importante para este tipo de criterio. Si, en cambio, se ha de valorar el material sobre la base de las propiedades de impacto a la temperatura ambiente, pueden encontrarse grandes diferencias.

## CAPITULO II

## 2.0 GENERALIDADES DEL ENSAYO DE IMPACTO

### 2.1 CARGAS DINÁMICAS

Aunque muchas estructuras quedan en algún momento sometidas a cargas dinámicas, muchas máquinas y partes de ellas están sometidas comúnmente a tales cargas. Para estimar el comportamiento en condiciones de seguridad de estructuras y máquinas, o sus partes, bajo cargas dinámicas se involucra no solamente el análisis para determinar la reacción general de la estructura o máquina sino también la consideración de las propiedades de los materiales componentes bajo tal carga. El comportamiento de los materiales bajo carga dinámica puede en ocasiones diferir marcadamente de su comportamiento bajo cargas estáticas o cargas aplicadas lentamente.

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. El comportamiento de los materiales bajo cargas rápidamente fluctuantes involucra otro fenómeno conocido como fatiga.

En un impacto, el cuerpo en movimiento cambia de velocidad repentinamente, por lo tanto, debe ocurrir una transferencia de energía, y al mismo tiempo se realiza trabajo sobre las partes que reciben el golpe. La mecánica del impacto involucra no solamente la cuestión de los esfuerzos inducidos sino también una consideración de la transferencia de energía y la absorción y disipación de esa energía.



La energía de un golpe puede absorberse de varias maneras: a través de la deformación elástica de los miembros y las partes de un sistema, por las deformaciones plásticas de las partes; por medio de los efectos de la histéresis en las partes; a través de la acción friccional entre las partes, así como por los efectos de la inercia de las partes en movimiento. El efecto de una carga de impacto que produzca esfuerzos depende de la cantidad de energía utilizada en causar deformación. Al tratar los problemas que involucran las cargas de impacto, la manera predominante en que la carga haya de resistirse obviamente determina el tipo de información que se necesita.

En el diseño de muchos tipos de estructuras y máquinas que deban recibir cargas de impacto, la meta es proveer cierto margen para la absorción de tanta energía como sea posible a través de la acción elástica y luego confiar en alguna clase de contención para disiparla. En tales estructuras la resistencia (es decir, la capacidad energética elástica) del material es una propiedad significativa, y los datos de resiliencia derivados de la carga estática pueden ser adecuados.

El desempeño satisfactorio de ciertos tipos de partes de máquinas, tales como partes de equipo de perforación por percusión, partes de motores y transmisiones automotrices, partes de equipo ferroviario, dispositivos para rieles y escudos, dependen de la resistencia de las partes bajo cargas de choque. Aunque un abordaje directo de este problema parecería ser el uso de ensayos que involucren cargas de impacto, la solución del problema no es simple. Sin duda, los resultados de los ensayos de impacto han contribuido indirectamente al mejoramiento del diseño de ciertos tipos de partes, pero en

general, tales ensayos, cuando menos hasta la fecha, han demostrado ser de significación limitada para producir datos de diseño básicos.

En la mayoría de los ensayos para determinar las características de absorción energética de los materiales bajo cargas de impacto, el objeto es utilizar la energía del golpe para causar la ruptura de la probeta. Existe pues una distinción a establecer entre los problemas que involucran, principalmente, la absorción de la energía elástica y los problemas para los que los datos sobre la capacidad energética al ocurrir la ruptura sean pertinentes. Esta diferencia contribuye a una limitación básica de la aplicabilidad general de los resultados del ensayo de impacto ordinario.

## 2.2 ALCANCE Y APLICABILIDAD DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

El ensayo de impacto ideal sería uno en el cual toda la energía de un golpe se transmitiera a la probeta. En realidad, este ideal nunca se alcanza; siempre se pierde alguna energía por fricción, por deformación de los apoyos y la masa de golpeo, y por vibración de varias partes de la máquina de ensayo. En algunos ensayos, es imposible obtener una medida realmente exacta de la energía absorbida por la probeta. Aún más, los valores particulares obtenidos de un ensayo de impacto dependen mucho de la forma de la probeta usada. Estos hechos requieren una estrecha atención en la normalización de los detalles de cualquier tipo de ensayo si se desean obtener resultados concordantes, de manera que se excluyan las comparaciones directas de los resultados de varios tipos diferentes de ensayos de impacto. Cada tipo de ensayo de impacto posee su propio campo de uso especializado y su aplicabilidad depende en

gran parte de la satisfactoria correlación con el desempeño bajo condiciones de servicio. En conexión con esto, también puede observarse que la aplicabilidad de un ensayo puede no necesariamente limitarse a los materiales a usarse en partes que hayan de ser sometidas al impacto.

La ASTM, describe los ensayos de impacto del acero para propósitos de producción como sigue:

*Un ensayo de impacto es un ensayo dinámico en el cual se golpea y se rompe, mediante un solo golpe, una probeta seleccionada, maquinada o pulida superficialmente y en forma usual ranurada. Se efectúa en una máquina especialmente diseñada y se mide la energía absorbida al romperse la probeta. Los valores de energía determinados son comparaciones cualitativas sobre una probeta seleccionada y no puede convertirse en cifras de energía que sirvan para cálculos de diseño de ingeniería. El comportamiento de la ranura indicado en un ensayo individual es aplicable solamente al tamaño de la probeta, la geometría de la ranura y las condiciones de ensaye involucradas; y no puede aplicarse a otros tamaños de probetas y otras condiciones. Los requerimientos de impacto mínimos generalmente se especifican solamente para materiales enfriados y templados, normalizados y templados o normalizados, según se estipula en las especificaciones apropiadas para el producto.*

Al realizar un ensayo de impacto, la carga puede aplicarse en flexión, tensión, compresión, o torsión. La carga flexionante es la más común; la carga tensiva es menos común; las cargas de compresión y de torsión se usan solamente en casos especiales. El impacto puede lograrse mediante el uso de una pesa que cae, un péndulo oscilante, o

un volante rotatorio. Algunos ensayos se realizan para fracturar la pieza de ensayo con un solo golpe; otros emplean golpes repetidos. En algunos ensayos del segundo tipo, el golpe repetido es de magnitud constante; en otros, como en los ensayos de "incremento de caída", la altura de la caída es aumentada gradualmente hasta inducir la ruptura. En la Tabla 2.1 se agrupan varios de los ensayos de impacto de acuerdo con estas clasificaciones.

Los ensayos de impacto más comúnmente usados para los aceros son los llamados Charpy e Izod, ambos de los cuales emplean el principio del péndulo. Ordinariamente, estos ensayos se hacen sobre pequeñas probetas ranuradas las cuales son quebradas en flexión. En el ensayo Charpy, la probeta es apoyada como una viga simple (fig. 2.13), y en el de Izod se le apoya como una viga en voladizo (fig. 2.4). En esos ensayos una gran parte de la energía absorbida se acumula en una región inmediatamente adjunta a la ranura, y con frecuencia se induce un tipo de fractura frágil. Debe observarse que no se ha intentado hacer pruebas para carga de choque en servicio; simplemente se han obtenido valores de resistencia de una cierta probeta metálica ranurada a ser fracturada por un tipo particular de impacto. Se ha descubierto que los resultados indican las diferencias de condición de un metal que otros ensayos no indican. Los resultados parecen ser muy sensitivos a las variaciones de la estructura del acero según resulta afectado por el tratamiento térmico; por ciertos cambios menores de composición que tienden a causar "fracturabilidad", tales como las variaciones en el contenido de sulfuros o fósforo; y por varios elementos aleativos. Así mismo, estos ensayos, al realizarse sobre probetas a bajas temperaturas, han



resultado útiles al indicar si se mantiene o no una resistencia adecuada a esas temperaturas.

TABLA 2.1 CLASIFICACION Y RESUMEN DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO

Método para aplicar el impacto	Tipo de carga	Ensayos de un solo impacto				Ensayos de impactos repetidos				Impactos de magnitud creciente ("ensayos de incrementos de caída")			
		Máquina	Capacidad máxima, pies-libras	Máxima velocidad de impacto, pies por segundo	Ref.*	Máquina	Capacidad máxima, pies-libras	Máxima velocidad de impacto, pies por segundo	Ref.*	Máquina	Capacidad máxima, pies-libras	Máxima velocidad de impacto, pies por segundo	Ref.*
Martillo de caída	Flexión	Hair-Turner Fremont	3200 410	21 29	D 143 O	Krupp-Station	0-18	2.5	101, 870	AREA 1 Hair-Turner Army Ordnance (hierro, fundido)	50,000 3,200	40 21	4 O, 803 871
	Tensión	Olsen Gullotta Calif Inst. Tech.	3500 ..... .....	21 ..... .....	O 820 823					Page	13	14	11 3
Pendulo oscilante	Compresión	Olsen Calif Inst. Tech.	3500 .....	21 .....	O 827								
	Flexión	Charpy Izod Russell (hierro fundido) Oxford	2-210 2-200 300	11-17 11-17 11	O, R, W O, R, W 870 803	Heister	50	11	O	Heister	50	11	O
Volante rotatorio	Tensión	Charpy modifi- cada o Izod	230	11-17	O, R								
	Constante	McAdam	400	16	O								
Torsión	Flexión	Gullery	430	39	101								
	Tensión	Mann-Haskell Calif. Inst. Tech.	.....	1000	821 833								
	Torsión	Carpenter	>138	.....	W, 820								

Nota. Se producen otros máquimas de Impacto, principalmente variaciones de las mencionadas arriba. Véanse los catálogos de los fabricantes.  
 \* Referencia en la cual se puede encontrar la descripción. Las letras sencillas se refieren a los catálogos de los fabricantes: O = Olsen, R = Riehle, W = Wildemann-Baldwin.  
 † American Railway Engineering Association.

Aunque los ensayos Charpy o Izod puedan no predecir directamente el comportamiento dúctil o quebradizo del acero al usársele en grandes unidades estructurales, encuentran uso como ensayos de aceptación o identidad para lotes diferentes del mismo acero o al elegir entre aceros diferentes, cuando la correlación con el comportamiento confiable en servicio ha sido establecida. Los resultados de los ensayos de impacto de muchos aceros son muy sensitivos a los cambios de temperatura dentro del rango atmosférico normal. Por esta razón la temperatura de ensayo real puede ser muy importante y debe reportarse en conjunción con todos los resultados de los ensayos, preferentemente debe determinarse el rango de la temperatura de transición para el acero dado.

Los procedimientos para los ensayos Charpy e Izod en cuanto a su aplicación a los metales han sido normalizados (ASTM E 23, IRAM- IAS U 500-18, UNE 7-475-92/1, etc.) y la especificación formal de los límites de la resistencia al impacto ha sido hecha en el caso de los materiales para un número de productos tales como partes de motores de avión, engranes de transmisión, partes para orugas de tractores, aletas para turbinas, muchos tipos de forjados, tubo y placa de acero para servicio a baja temperatura, etc.

Los ensayos de impacto de los metales en tensión, han sido hechos en gran medida con propósitos experimentales. Se han realizado como ensayos de un solo golpe en una máquina de peso descendente, en una máquina pendular adecuadamente modificada para acomodar una probeta de tensión, y en una máquina con volante. El ensayo de impacto de tensión ofrece la oportunidad de estudiar el comportamiento de los materiales dúctiles bajo carga de impacto sin

las complicaciones introducidas por el uso de un canal o ranura, aunque las probetas ranuradas en tensión también han sido usadas en algunos ensayos. El tipo de máquina de volante, en particular, es capaz de arrojar velocidades de impacto muy altas; se han realizado estudios relacionados con la velocidad de "transición" o "crítica" con este tipo de máquina.

Para ensayar los aceros para herramientas, un ensayo de impacto torsionante, el ensayo de Carpenter, ha adquirido alguna prominencia. El ensayo parece ofrecer un método para investigar y controlar las condiciones óptimas para el tratamiento térmico de productos tales como taladros y partes de taladros para roca.

El hierro fundido no se usa frecuentemente en partes que deban poseer una alta resistencia contra el choque, y hay quienes creen que los resultados del ensayo de flexión estática dan una gran parte de la información necesaria para estimar la capacidad energética relativa de los hierros fundidos. Sin embargo, un número de investigaciones acerca de la resistencia al impacto del hierro fundido han sido realizadas, y una variedad de procedimientos ha sido empleada, incluyendo los ensayos pendulares de un solo golpe, los ensayos de incremento de caída, y los ensayos de golpes repetidos.

Los procedimientos para el ensayo Charpy como el Izod, así como también un método de impactos repetidos para el hierro fundido han sido normalizados en la ASTM A 327. Todos estos métodos de ensayo emplean carga flexionante; los ensayos de impacto flexionante del hierro fundido no parecen proporcionar resultados confiables. Las probetas no ranuradas son las más utilizadas, ya que parecen ser



más satisfactorias que las ranuradas. El hierro fundido no es tan "sensitivo a la ranuración" como el acero; esto puede deberse al efecto que simula ranuras, de las hojuelas de grafito del hierro fundido, el cual no es aumentado considerablemente por un efecto adicional de una ranura externa.

## 2.3 ASPECTOS GENERALES DE LAS MAQUINAS DE IMPACTO

### 2.3.1 Máquinas De Ensayos De Metales

El efecto de un golpe depende en general tanto de la masa y propiedades de las partes que reciben el golpe, como de la energía y masa del cuerpo golpeante. Los objetos que requieren normalización en una máquina de ensayo son la base, el yunque, los apoyos para probetas, la probeta, la masa percutiente y su velocidad.

Los aspectos principales de una máquina de impacto, pendular y de un solo impacto, son:

- 1) una masa móvil cuya energía cinética es suficiente para causar la ruptura de la probeta colocada en su camino;
- 2) un yunque y un apoyo sobre el cual se coloca la probeta para recibir el impacto y
- 3) un medio para medir la energía residual de la masa móvil después de que la probeta ha sido rota.

La energía cinética es determinada y controlada por la masa del péndulo y la altura de la caída libre, medidas con respecto al centro de masa (energía =  $WH$ , donde  $W$  es el peso de la masa y  $H$  es la distancia vertical que la masa recorre al caer). El péndulo debe suspenderse de tal manera que caiga en un plano vertical sin

posibilidad de desviación o restricción lateral, y los rodamientos deben ser tales que la fricción sea mínima. El péndulo debe ser suficientemente fuerte para que las vibraciones excesivas no causen variaciones serias en los resultados. El mecanismo de liberación no debe influir en el libre movimiento del péndulo y no debe causar efectos de atoramiento, aceleración, o vibración.

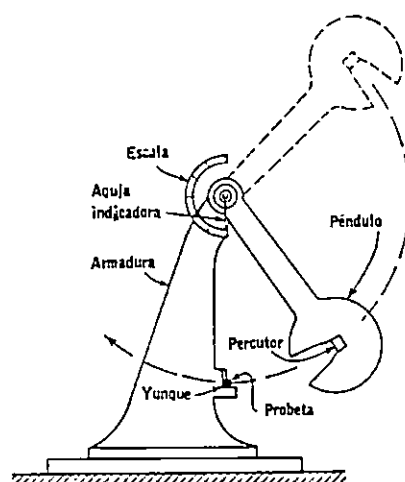


Figura 2.1 Diagrama de la máquina de impacto

El yunque debe ser suficientemente pesado en relación con la energía del impacto para que no se pierda una cantidad indebida de energía por la deformación o vibración. El dispositivo para apoyar la probeta debe ser tal que la probeta quede exactamente sujeta en posición antes del instante del impacto.

El percutor del péndulo debe coincidir con una línea vertical a través del centro de rotación cuando el péndulo cuelga libremente. La línea de acción de la fuerza reactiva entre la probeta y el péndulo debe pasar por el centro de percusión en el instante del impacto. Se

considera deseable que el centro de percusión quede tan cerca como sea posible del percutor.

Para indicar el arco de oscilación descrito por el péndulo de las máquinas de tipo Charpy e Izod después de que la probeta ha sido rota, un brazo fijado al péndulo mueve un "señalador de fricción" sobre un arco graduado en grados, Joules o KJ. El indicador de fricción cuyo eje de rotación coincide con el del péndulo, es simplemente un brazo que puede girar sobre un rodamiento de perno con una presión tal que impida que el indicador cambie de posición bajo su propio peso. La presión de empuje debe ajustarse a un mínimo que impida que el péndulo se pase o caiga. Al principio de cada ensayo, este indicador se ajusta para establecer contacto con el péndulo e indicar la lectura apropiada cuando el segundo pende verticalmente.

En los martillos de caída vertical los aspectos principales son la masa móvil de energía cinética conocida, mas no necesariamente de tal magnitud que cause la ruptura con un solo impacto, y un yunque. (figura 1.40a).

La mayoría de los martillos de caída recta o vertical no poseen un dispositivo para medir la energía cinética residual de la masa, martillo o "ariete" después de que ha roto la probeta (aunque hay excepciones como por ejemplo la máquina Fremot). En un ensayo de incremento de caída, en la cual la altura de la caída se aumenta gradualmente, se obtiene una medida aproximada de la mínima carga energética requerida para causar la ruptura. En algunas máquinas la variación de la velocidad del martillo antes y después del impacto

puede obtenerse de los datos autográficos de desplazamiento vrs tiempo, con los cuales las relaciones energéticas pueden calcularse; sin embargo, las mediciones de esta índole son muy difíciles de realizar con exactitud. En las máquinas de impacto repetido debe preverse de algún modo el evitar que las probetas en flexión resulten desplazadas, sin restringir, empotrar o sujetar los extremos.

En los martillos de caída es necesario que los ejes del martillo y de las guías estén verticales y alineados, y que los apoyos y el yunque estén ubicados de tal modo que el impacto pueda aplicarse perpendicularmente a la probeta. La fricción en las guías debe minimizarse manteniéndolas libres de grasa o herrumbre; se les puede lubricar con grafito pulverizado.

Los requerimientos generales para las máquinas de volante son similares a los requerimientos de las pendulares, aunque los detalles mecánicos son, por supuesto, diferentes. La máquina Guillery lleva un yunque fijo, y la energía del impacto se determina por el cambio de la velocidad de rotación del volante, antes y después del impacto. En la máquina Mann-Haskell el yunque está sobre un péndulo, donde el desplazamiento de este se determina para obtener la energía de ruptura. En ambas máquinas el impacto es asestado mediante el uso de un brazo percutiente retráctil el cual va al ras del volante hasta que la rueda adquiere su velocidad. Por medio de un dispositivo de disparo el martillo es soltado, y luego forzado a su posición proyectante por la acción centrífuga.

### 2.3.2 Máquina Para Ensayos En Maderas

La máquina de impacto Hatt-Turner se usa principalmente para ensayos de impacto flexionante de la madera en las cuales la altura de la caída es incrementada progresivamente hasta que ocurre la falla (ASTM D 143).

Un ariete que pesa 50 lb es sostenido por un electromagneto que es izado por un motor. El ariete cae entre las columnas guías verticales cuando el circuito del magneto es abierto por un interruptor, siendo este interruptor accionado por un contacto eléctrico entre el magneto y el brazo móvil que puede ajustarse a cualquier posición deseada a lo largo de una escala vertical en una columna guía.

La base de la máquina lleva las columnas guía para el ariete y soportes adecuados para la probeta. Un tambor hueco, libre para girar sobre su eje vertical, también se monta sobre la base y cerca de las columnas guía. Un lápiz portado por el ariete se oprime con un resorte contra una pieza de papel fijada a la superficie del tambor y así da un registro gráfico por el cual pueden computarse la altura de la caída del ariete y la deflexión correspondiente de la probeta.

La probeta es una pieza de madera pulida que tiene dimensiones nominales de 2 x 2 x 30 plg. Para cada ensayo se registran las dimensiones reales. La pieza está simplemente apoyada sobre un claro de 28 plg de modo que el ariete caiga exactamente al centro del claro. El ariete lleva una superficie de percusión curvada, y los soportes se arreglan como se muestran en la figura 2.2.

La primera caída es de 1 plg, y las sucesivas aumentan en incrementos de 1 plg hasta una altura de 10 plg, después de lo cual se usan incrementos de 2 plg hasta obtener ya sea la ruptura completa o una deflexión de 6 plg.

Los datos de los registros del tambor pueden usarse para calcular el límite proporcional, el módulo de elasticidad, y la resiliencia.

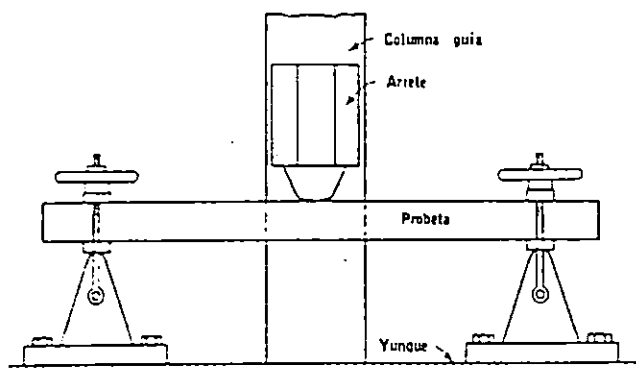


Figura 2.2 Método para apoyar la probeta en el ensayo Hatt-Turner

## 2.4 EL ENSAYO IZOD

### 2.4.1 Máquina de Ensayo Izod

La máquina Izod de ensayo a impacto comúnmente se hace con una capacidad de 162.6 J, aunque otras capacidades están disponibles. El péndulo consiste de un martillo montado en el extremo de un miembro relativamente ligero, el extremo superior del cual está montado en chumaceras de bolas en un poste atornillado a una base de hierro fundido. Una ilustración se muestra en la figura 2.3. El péndulo golpea la probeta, la cual se sujeta para fungir como un voladizo vertical de 10 por 10mm de sección y 75mm de largo que lleva una ranura normal de 45° y 2mm de profundidad. El montaje de la probeta y la posición relativa del percutor se muestran en la figura 2.4.

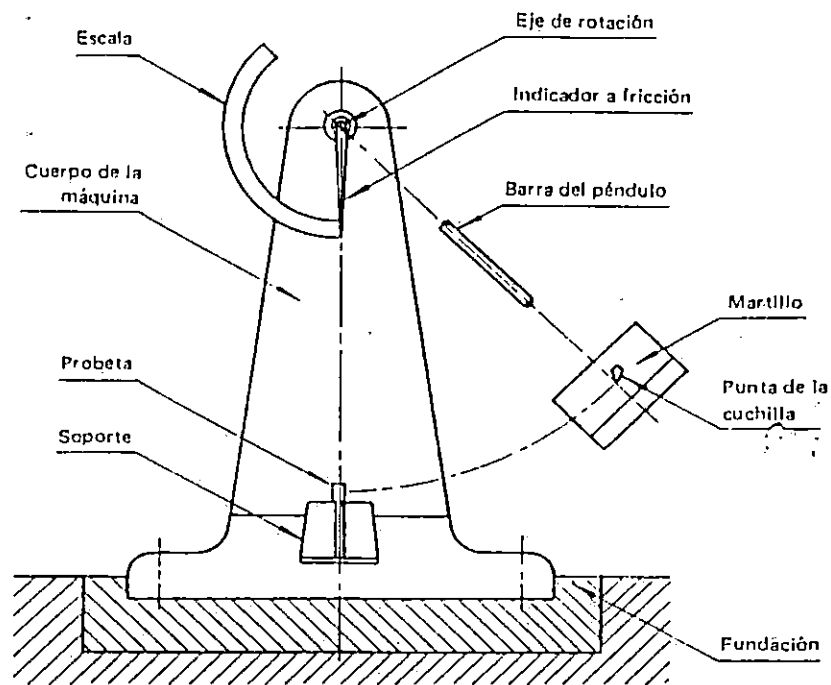


Fig 2.3 La máquina Izod

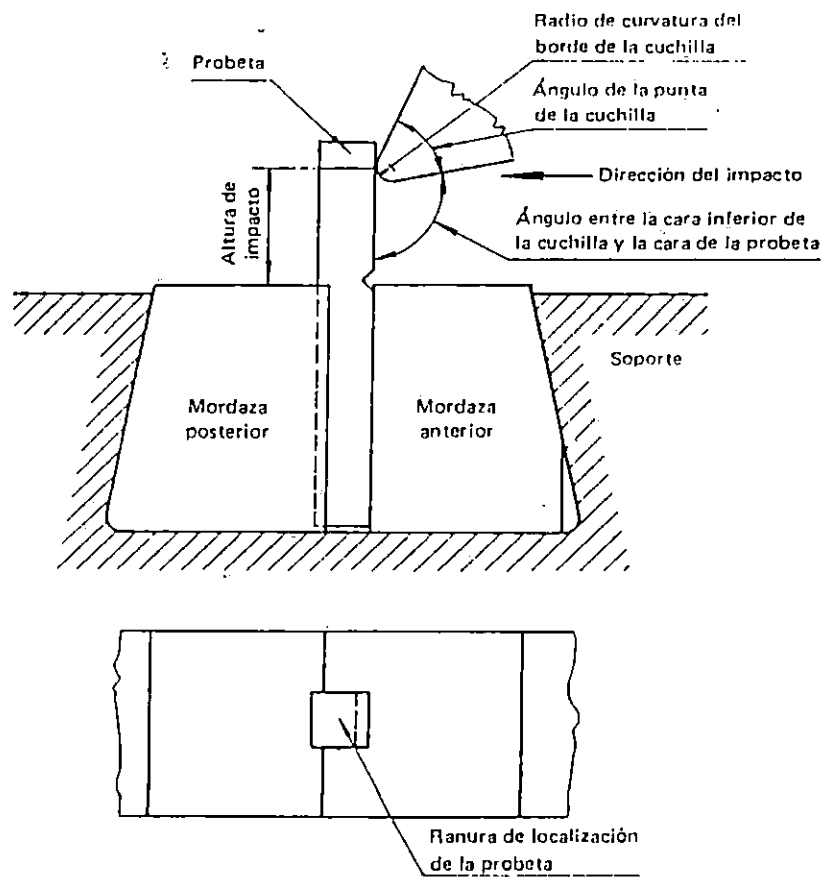


Figura 2.4 Montaje de la probeta.

La elevación angular del péndulo después de la ruptura de la probeta o la energía para fracturar la probeta se indica en una escala graduada por un indicador de fricción. Algunos experimentadores prefieren la máquina de Izod a la de Charpy, pues en la primera la pieza de ensayo no es esforzada en la región de la ranura por la presión del tornillo opresor.

La máquina de ensayo debe estar construida e instalada de modo que su estructura permanezca rígida y estable, para que sea despreciable la pérdida de energía originada por traslación, rotación y vibración durante el ensayo.

La máquina de ensayo debe tener las características que se indican en la tabla 2.2.

TABLA 2.2  
CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA DE ENSAYO IZOD

DESIGNACIÓN	
Distancia entre el plano de simetría de la entalladura (parte superior de la mordaza) y el extremo de la probeta donde debe golpear el martillo.	22 mm $\pm$ 0.5 mm
Ángulo entre la cara superior de la mordaza y la cara que sujeta la probeta.	90° $\pm$ 1°
Ángulo de la punta del martillo	75° $\pm$ 3°
Ángulo entre el plano normal de la probeta y la cara inferior del martillo en el punto de impacto.	10° $\pm$ 0.5°
Velocidad del martillo en el momento del golpe.	3 m/s a 4.5 m/s
Energía de impacto.	162.3 J $\pm$ 3.4 J

La masa del soporte y su base deben ser, por lo menos, 40 veces la masa del martillo.



El martillo debe oscilar en un plano vertical y el centro de percusión debe coincidir con el centro de impacto.

La graduación de la escala de la máquina debe permitir determinar la energía absorbida con un error menor de  $\pm 1.4$  J.

Se recomienda verificar frecuentemente el funcionamiento de la máquina por medio de un ensayo en vacío (verificación del cero). El error admisible debido a pérdidas por rozamiento, no debe exceder del 0.4 % del alcance máximo de la escala. Si este valor es mayor, los rodamientos deben ser inspeccionados y reparados o reemplazados.

#### 2.4.2 Normalización de la Probeta

Salvo convenio previo, la probeta puede ser de sección cuadrada o circular y tener una, dos o tres entalladuras.

Las medidas y discrepancias de las probetas son las indicadas en las tablas 2.3 y 2.4 y figuras 2.5 a la 2.10.

La entalladura, en las probetas de sección cuadrada, tiene una profundidad de 2 mm, con un radio en el fondo de 0.25 mm (figura 2.15).

La entalladura, en las probetas de sección circular, tiene una profundidad de 3.3 mm, con un radio en el fondo de 0.25 mm (figura 2.18).

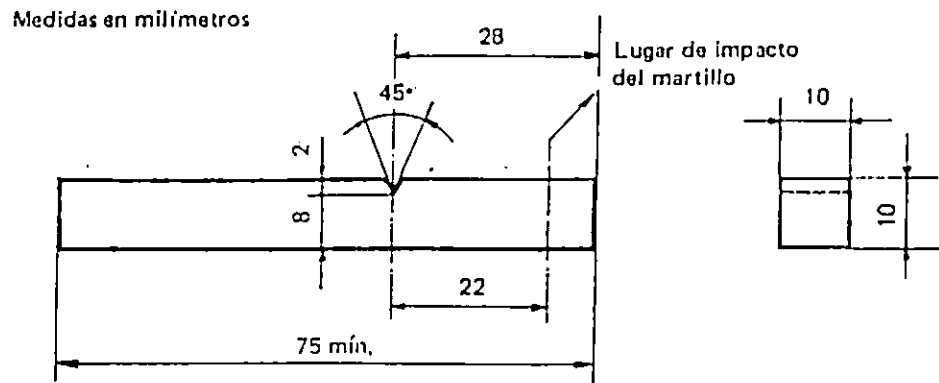


Figura 2.5 Probeta cuadrada con una entalladura.

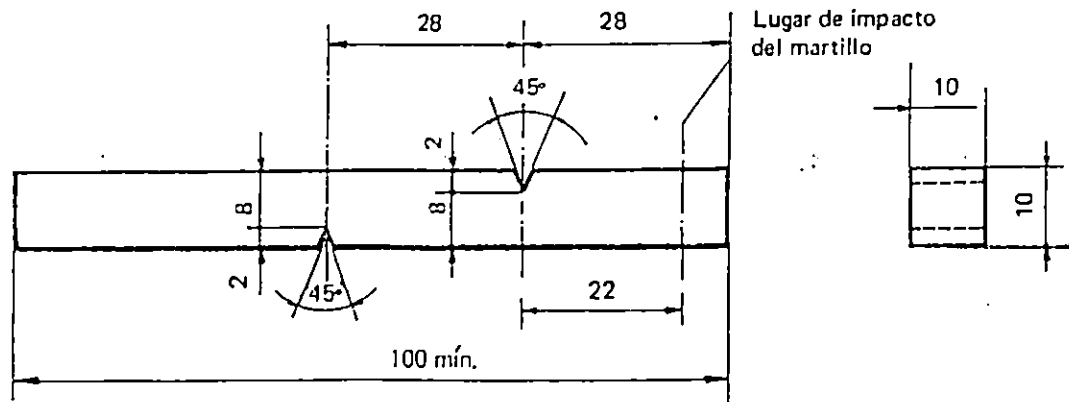


Figura 2.6 Probeta cuadrada con dos entalladuras.

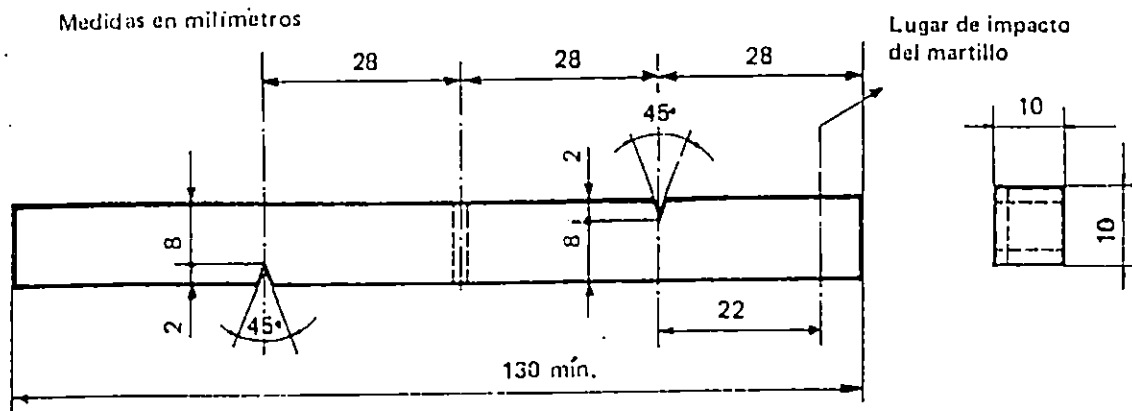


Figura 2.7 Probeta cuadrada con tres entalladuras.

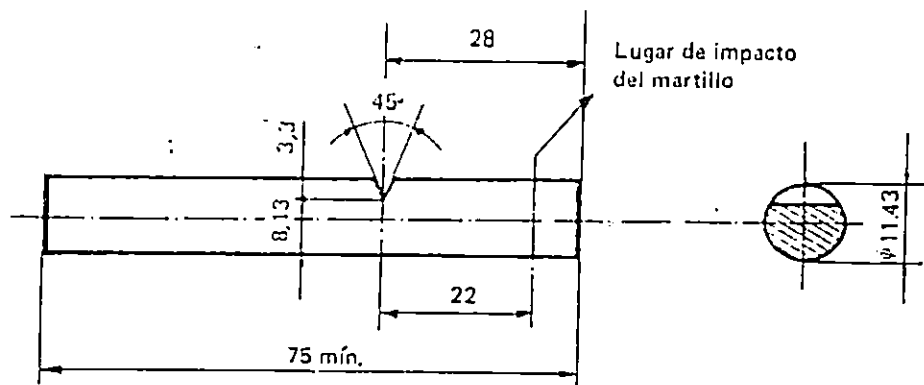


Figura 2.8 Probeta redonda con una entalladura.

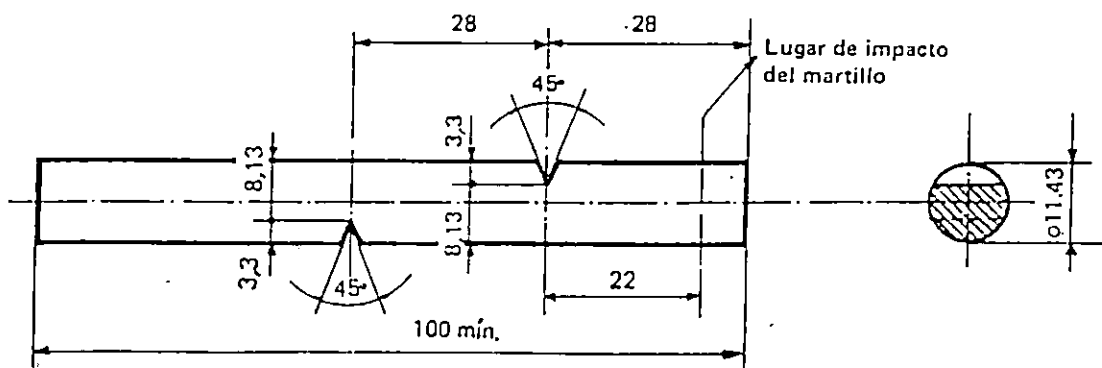


Figura 2.9 Probeta redonda con dos entalladuras.

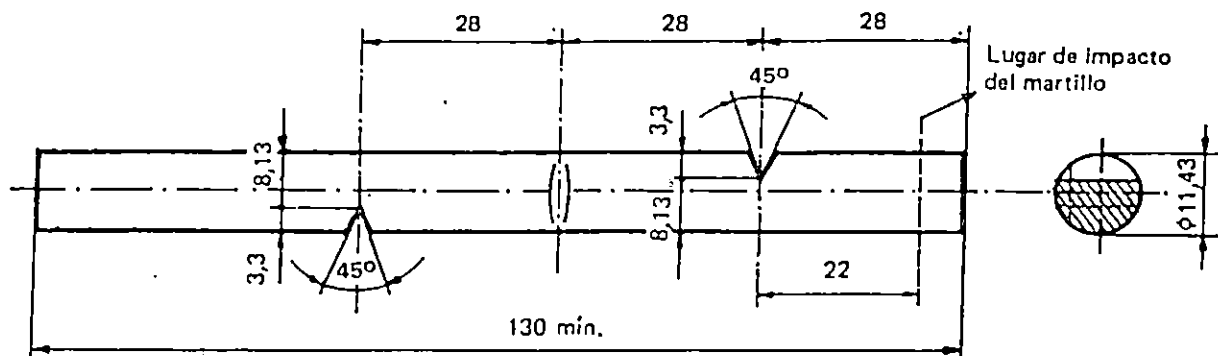
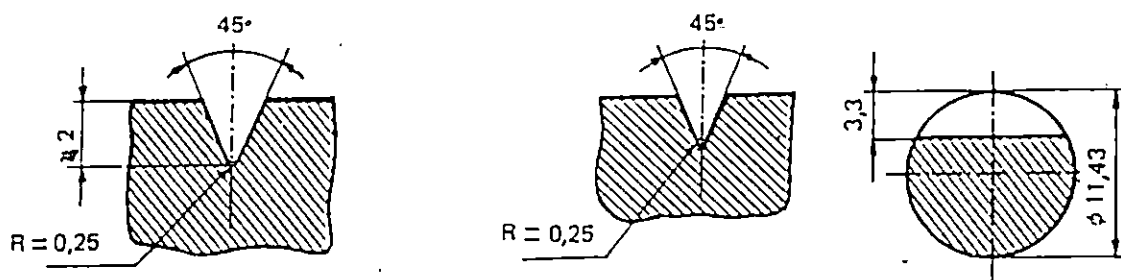


Figura 2.10 Probeta redonda con tres entalladuras.



Entalladura para probetas cuadradas

Entalladura para probetas redondas.

Figura 2.11

En cada caso, el plano de simetría de la entalladura debe ser perpendicular al eje longitudinal de la probeta.

TABLA 2.3  
MEDIDAS Y DISCREPANCIAS DE LAS  
PROBETAS DE SECCIÓN CUADRADA.

Designación	Medida nominal (mm)	Discrepancia de mecanizado (mm)
Longitud mínima de la probeta:		
Con una entalladura	75	
Con dos entalladuras	100	
Con tres entalladuras	130	
Espesor	10	±0.11
Ancho	10	±0.11
Ángulo de entalladura	45°	±2°
Espesor de la probeta en la entalladura	8	±0.045
Distancia del plano de simetría de la entalladura al extremo de la probeta y entre entalladuras adyacentes	28	±0.42
Ángulo entre el plano de simetría de la entalladura y el eje longitudinal de la probeta.	90°	±2°

TABLA 2.4  
MEDIDAS Y DISCREPANCIAS DE LAS PROBETAS  
DE SECCIÓN CIRCULAR

Designación	Medida nominal (mm)	Discrepancia de mecanizado (mm)
Longitud mínima de la probeta:		
Con una entalladura	75	
Con dos entalladuras	100	
Con tres entalladuras	130	
Diámetro	11.43	±0.14
Ángulo de entalladura	45°	±2°
Espesor de la probeta en la entalladura	8.13	±0.045
Distancia del plano de simetría de la entalladura al extremo de la probeta y entre entalladuras adyacentes	28	±0.42
Ángulo entre el plano de simetría de la entalladura y el eje longitudinal de la probeta.	90°	±2°

La superficie de la probeta debe estar lisa y libre de estrías paralelas al plano de simetría de la entalladura.

La entalladura es de forma V a 45°, y se puede obtener por cualquier método de mecanizado que no altere las características del material, debiendo prepararse cuidadosamente para evitar la presencia de estrías en el fondo de la entalladura.

#### 2.4.3 Procedimiento

La probeta se coloca y sujeta fuertemente en las mordazas de la máquina, de forma que el eje longitudinal de la probeta esté en el plano de oscilación del centro de gravedad del martillo.

El plano de simetría de la entalladura debe coincidir con la cara superior de la mordaza posterior.

El punto de impacto del martillo debe estar en la misma cara de la entalladura.

Cuando se ensayan probetas con dos o tres entalladuras, se elimina, después de cada ensayo cualquier material deformado del resto de la probeta y se controlan nuevamente sus medidas y formas antes de un nuevo ensayo.

El valor de impacto, determinado por la energía absorbida, se expresa en Joules, anteponiendo el símbolo KI.

La temperatura de la probeta, en el momento de realizarse el ensayo, no debe variar de la especificada en  $\pm 2^{\circ}$  C, salvo que se especifique otra discrepancia. Si la temperatura de ensayo no está especificada, se adopta  $20^{\circ}$  C  $\pm 2^{\circ}$ C. En todos los casos se registra la temperatura de ensayos de la probeta.

Si la probeta no se rompe completamente en el ensayo, el valor del impacto es válido, siempre que el centro de percusión (punta) del martillo pase a través del plano vertical que contiene al eje de oscilación del péndulo. Esta circunstancia se incluye en el informe.

Si en el ensayo la probeta absorbe la energía total del péndulo, es decir, que el centro de percusión (punta) del martillo no pasa a través del plano vertical que contiene al eje de oscilación del péndulo, el resultado del ensayo es indeterminado. Esta circunstancia se incluye en el informe.

Salvo que se especifique lo contrario, el valor de impacto es el promedio del tres determinaciones sobre una misma muestra.

*Nota: No hay un procedimiento general para convertir los valores de impacto, obtenidos por un método de ensayo, en aquellos que se obtienen por otro método de ensayo.*

## 2.5 EL ENSAYO CHARPY PARA METALES

### 2.5.1 La Máquina Charpy

La máquina del tipo Charpy 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. Un diseño común de máquina se muestra en las figura 2.12 y 2.13.

El péndulo consiste de una barra relativamente ligera, aunque rígida, de sección I en el extremo de la cual hay un pesado disco. El péndulo está suspendido de una flecha corta que gira en rodamientos de bolas 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, como se muestra en la figura 2.12 y debe alinearse de modo tal que establezca contacto con la probeta contra su peralte total en el instante del impacto.

La probeta estándar para ensayos de flexión es una pieza de 10 por 10 por 55 mm ranurada como se muestran en las figuras 2.14, 2.15 y 2.16.

Otros tamaños se usan en casos especiales. En muchas especificaciones comerciales se requiere una ranura en forma de ojo de cerradura o de U, como se muestra en las figuras 2.15 y 2.16. La probeta, la cual se carga como una viga simple, se coloca horizontalmente entre los dos yunques, como se muestra en la figura 2.13 a, de modo que el percutor golpee el lado opuesto de la ranura a la mitad del claro.

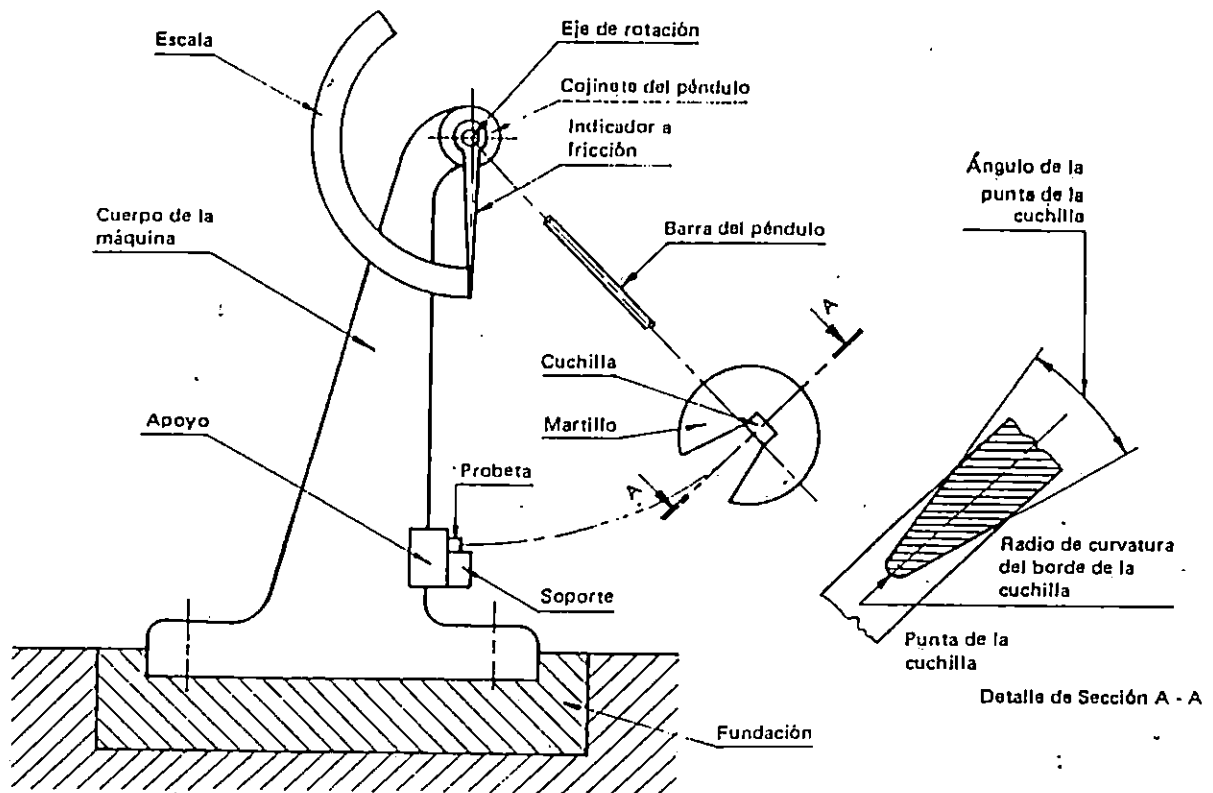


Figura 2.12 Máquina Charpy.



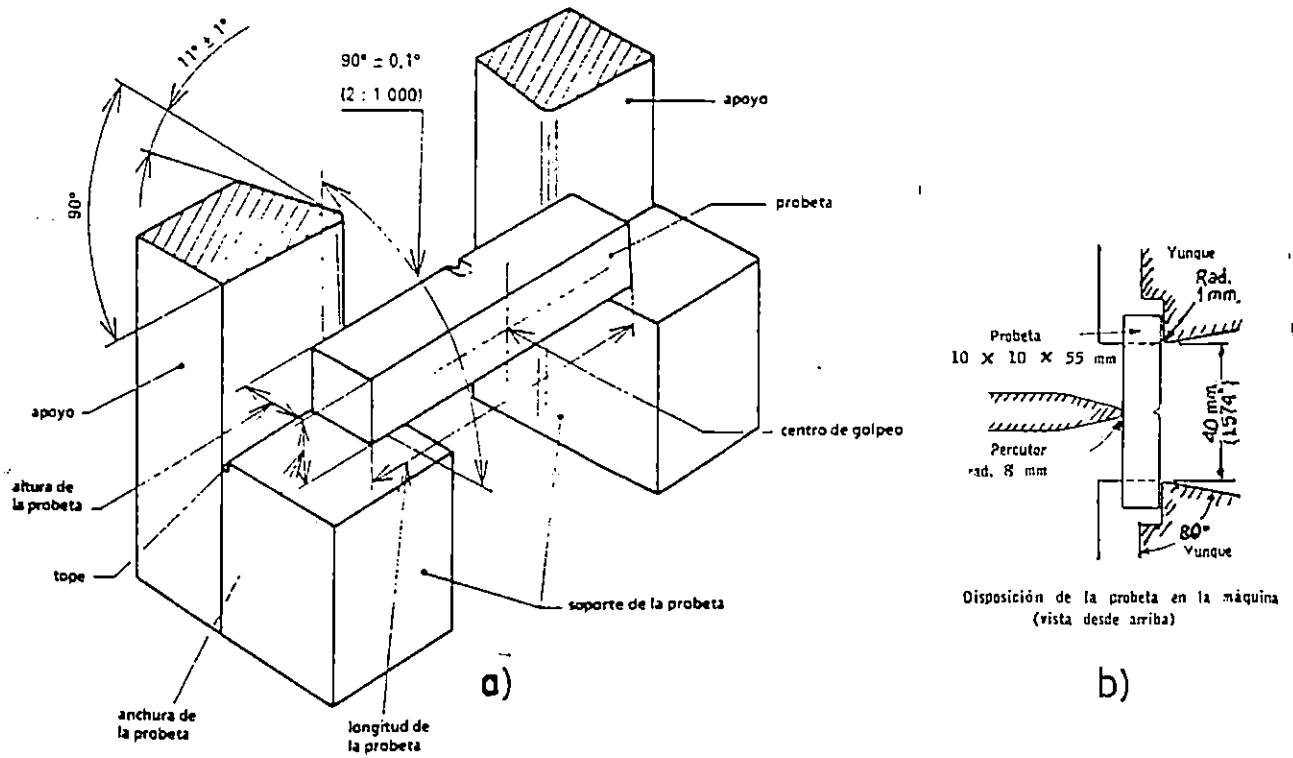


Figura 2.13 Montaje de la probeta.

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.

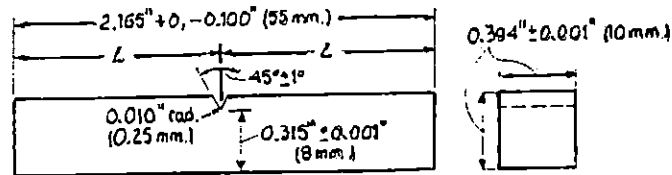


Figura 2.14 Probeta con ranura en "V"

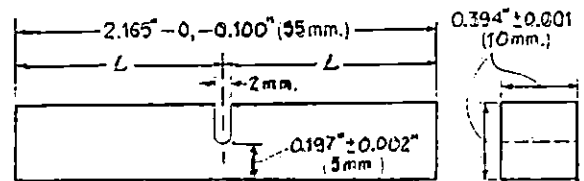


Figura 2.15 Probeta con ranura en "U"

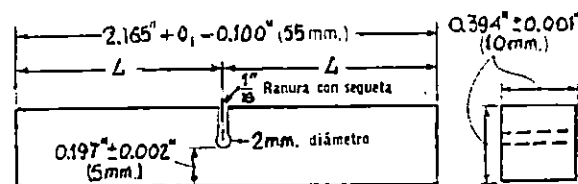


Figura 2.16 Probeta con ranura en forma de ojo de cerradura.

En su movimiento ascendente el péndulo lleva el indicador de fricción sobre una escala semicircular graduada en grados o Joules. La energía requerida para fracturar la probeta es una función del ángulo de elevación, el peso del péndulo, la posición del centro de gravedad, y la altura de la caída; medidos desde el centro de gravedad, los cuales se determinan experimentalmente.

La máquina debe construirse de tal modo que el espacio entre los yunques no disminuyan en su ancho en la dirección del movimiento del péndulo. En una máquina normal el ancho debe aumentar, como se muestra en la figura 2.13 para impedir el arrastre entre la probeta y los yunques.

Los requerimientos generales de la máquina son:

- La máquina de prueba tendrá un péndulo de construcción rígida y de capacidades más que suficiente para romper la muestra de un golpe.
- El marco de la máquina estará equipado con un dispositivo para establecer niveles de inclinación de los soportes del péndulo o alternativamente los niveles del eje de rotación del péndulo. La pendiente admisible de la máquina estará dentro de 3:1000.
- La máquina debe estar solidamente construida e instalada de forma rígida. Al instalarla, se atornillará en forma segura al piso en no menos de 150 mm (6 plg) de profundidad o, cuando esto no sea práctico, la máquina estará atornillada o empernada a una fundación teniendo ésta una masa no menor a 40 veces la masa del péndulo.
- La máquina estará provista con escalas graduadas en grados o directamente en energía en los cuales pueda estimarse en incrementos de 0.5 % o menos de la energía máxima disponible. Las escalas pueden compensarse por la resistencias del aire y la fricción del péndulo.
- La fricción total y resistencia del aire ocasionará pérdidas de energía del péndulo, durante la oscilación de este en la dirección de ruptura; la cual no excederá el 0.75% de la capacidad de la escala y la energía perdida del péndulo por fricción en el mecanismo indicador no excederá el 0.25% de la capacidad de la escala.



- Cuando el péndulo esté suspendido libremente sin movimiento en la parte inferior; el filo de ruptura estará a una distancia menor a 2.5 mm de una barra de comprobación (colocada en la posición de ensayo), cuyas medidas se indican en la tabla 2.5.

TABLA 2.5  
MEDIDAS DE LAS BARRAS DE COMPROBACIÓN

Forma de la sección	Método Charpy (mm)
Cuadrada	$10 \pm 0,01 \times 10 \pm 0,01 \times 55 \pm 0,6$ Sin entalladura Tolerancia de forma: $90^\circ \pm 10'$
Circular	-

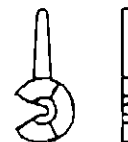
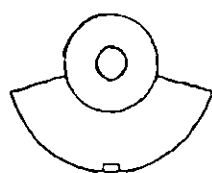
*NOTA: Esta comprobación sólo puede ser realizada en máquinas en que la cara de la probeta que recibe el impacto se encuentra en el plano vertical que pasa por el eje de rotación del péndulo.*

- El movimiento transversal del péndulo al golpear no excederá 0.75 mm (0.03 plg) bajo una fuerza transversal del 4% del peso efectivo del péndulo aplicado al centro de choque. La orientación radial del movimiento del péndulo no excederá de 0.075 mm (0.003 plg).
- El mecanismo para soltar el péndulo desde la posición inicial, se operará libremente y permitirá al péndulo que se suelte sin impulso inicial ( $v=0$ ), retardación o vibraciones laterales. Si la

palanca que es usada para soltar el péndulo es también usada para frenarlo, significa que el sistema será provisto de un mecanismo para prevenir el frenado, si en un dado caso se activa accidentalmente la palanca.

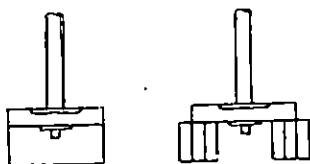
- Para garantizar resultados satisfactorios, cuando se prueben materiales de diferentes tenacidades y composiciones, la muestra de prueba estará suelta, para dejar a la máquina con interferencia mínima y no rebote el péndulo antes de completar su oscilación.

Los péndulos usados en la máquina Charpy son de 3 diseños básicos: de tipo "C", péndulo compuesto y péndulo de tipo "U", los cuales se muestran en la figura 2.17



Péndulo Compuesto

Péndulo Tipo C



Péndulo Tipo U

Figura 2.17 Péndulos usados en la máquina Charpy.

En muchas máquinas con péndulo tipo "U" la pestaña debe ser diseñada e instalada con los siguientes requerimientos:

- a) Tener un espesor de aproximadamente 1.5mm (0.06 plg).
- b) Tener un mínimo de dureza de 45 HRC
- c) Tener un radio menor de 1.5 mm por debajo de las esquinas

Los valores de las características principales de la máquina se recogen en la tabla siguiente:

TABLA 2.6  
CARACTERÍSTICAS DE LA MAQUINA DE ENSAYO CHARPY

Referencias	Designación	Valor
Figura 2.13	Distancia entre apoyos	$40^{+0.2}$ mm
Figura 2.13	Radio de los apoyos	$1_0^{+0.5}$ mm
Figura 2.13	Ángulo de salida de cada apoyo	$11^\circ \pm 1^\circ$
Figura 2.12	Ángulo de filo de la cuchilla de la masa	$30^\circ \pm 1^\circ$
Figura 2.12	Radio del filo de la cuchilla de la masa	$2_0^{+0.5}$ mm
Figura 2.12	Anchura máxima del filo de la cuchilla de la masa	18 mm
-	Velocidad de la masa en el momento del impacto	3-6 m/s (ASTM E23)
-	Ángulo entre los soportes y los apoyos	$90^\circ \pm 0.1^\circ$

Las condiciones del ensayo normal corresponden a una energía nominal de la máquina de  $300 \text{ J} \pm 10 \text{ J}$ ; utilizando probetas de medidas estándar. La energía absorbida, en estas condiciones, se designa mediante los símbolos:

KU para probetas con entalla en U;

KV para probetas con entalla en V.

Por ejemplo:

KV = 121 J significa:

- energía nominal 300 J;
- probeta estándar en V;
- energía absorbida en la rotura: 121 J.

En el caso de máquinas con otras energías disponibles los símbolos KU y KV deben completarse con un índice que indique la energía disponible de la máquina de ensayo.

Así por ejemplo:

- KV 150: energía disponible 150 J;
- KU 100: energía disponible 100 J.

Por ejemplo:

- KU 100 = 65 J significa:
  - energía nominal 100 J;
  - probeta estándar con entalla en U;
  - energía absorbida en la rotura: 65 J.

En el caso de ensayos realizados con una de las probetas reducidas con entalla en V, el símbolo KV se debe completar, en primer lugar con la energía disponible, seguido de la anchura de la probeta; así por ejemplo:

- KV 300/7.5: energía disponible 300 J; anchura de la probeta 7.5 mm;
- KV 150/5: energía disponible 150 J; anchura de la probeta 5 mm;
- KV 150/7.5 = 83 J significa:
  - energía nominal 150 J;

- probeta de sección reducida de 7.5 mm de anchura;
- energía absorbida en la rotura: 83 J.

### 2.5.2 Preparación de la Máquina

Si la máquina es utilizada continuamente, es necesario chequearla diariamente, sin embargo, si ella no es usada frecuentemente se procederá a revisarla antes de realizar ensayos a una muestra o, a un grupo de ellas. La revisión incluirá la determinación de desalineamientos, estado de los elementos, energía perdida por rozamiento, etc.

Previo al ensayo de un grupo de muestras y antes que una muestra sea colocada en el lugar correspondiente para efectuar un ensayo; hay que revisar la máquina para una oscilación libre del péndulo. Con el indicador de energía en la posición máxima, una oscilación libre del péndulo deberá indicar cero energía en máquinas en que la lectura es directamente en energía, que son compensados por pérdidas de fricción. En máquinas que marcan grados, el valor indicado cuando se convierta en energía se deberá compensar por la fricción perdida la cual será asumida proporcional al arco de oscilación.

### 2.5.3 Normalización de las Probetas

Las probetas serán totalmente mecanizadas. La probeta normal es de sección cuadrada de 10mm de lado y 55mm de longitud. En el punto medio de su longitud tendrá una entalladura en forma de "V", en forma de "U" o en la forma de la denominada ojo de cerradura.

Las características de las diferentes entalladas son:



- a) Entalla en V a  $45^\circ$ , de 2mm de profundidad con un radio en el fondo de la entalla de 0.25 mm.  
Si las medida del material no permiten obtener la probeta estándar, se pueden preparar probetas de sección reducida de 7.5 mm o de 5 mm de anchura; la entalla se situará en una de las caras estrechas;
- b) Entalla en U, de 5 mm de profundidad, con un radio en el fondo de la entalla de 1mm.
- c) Entalla en ojo de cerradura, de 5 mm de profundidad, con una ranura de 1.6 mm o menos; la que al fondo se taladrará un agujero de 2 mm de diámetro.

El plano de simetría de la entalladura será perpendicular al eje longitudinal de la probeta.

La probeta estará completamente mecanizada, salvo en el caso de muestras moldeadas por moldeo de precisión, en cuyo caso las caras paralelas al plano de simetría de la entalla pueden estar en bruto.

Las tolerancias, sobre las medidas especificadas de la probeta, se indican en la tabla 2.7 y los diseños de las muestras o probetas se especifican en las figuras 2.14, 2.15 y 2.16.

Siempre que lo permita la norma del producto, se pueden utilizar probetas de anchuras diferentes a las indicadas en la tabla 2.7, por ejemplo, de una anchura, no mecanizada, igual al espesor del

producto. Sin embargo sólo se pueden comparar los resultados obtenidos con probetas de idéntica forma y de iguales medidas.

Se debe realizar el mecanizado de forma que sean mínimas las alteraciones producidas en las probetas, por ejemplo, por deformación en frío o por calentamiento. La entalla debe mecanizarse cuidadosamente de forma que no se aprecien a simple vista estrías en el fondo de la entalla, paralelas a sus generatrices.

TABLA 2.7  
TOLERANCIAS SOBRE LAS MEDIDAS ESPECIFICADAS DE LA  
PROBETA

Designación	Probeta con entalla en U		Probeta con entalla en V	
	Medida nominal	Tolerancia de mecanizado	Medida nominal	Tolerancia de mecanizado
Longitud	55 mm	$\pm 0.60$ mm	55 mm	$\pm 0.60$ mm
Altura	10 mm	$\pm 0.11$ mm	10 mm	$\pm 0.11$ mm
Anchura:				
- probeta estándar	10 mm	$\pm 0.11$ mm	10 mm	$\pm 0.11$ mm
- probeta sección reducida	-	-	7.5 mm	$\pm 0.11$ mm
- probeta sección reducida	-	-	5 mm	$\pm 0.06$ mm
Ángulo de entalla	-	-	45°	$\pm 2^\circ$
Altura bajo la entalla	5 mm	$\pm 0.09$ mm	8 mm	$\pm 0.06$ mm
Radio en el fondo cilíndrico de la entalla	1 mm	$\pm 0.07$ mm	0.25 mm	$\pm 0.025$ mm
Distancia del plano de simetría de la entalla a los extremos de la probeta <sup>10</sup>	27.5 mm	$\pm 0.42$ mm	27.5 mm	$\pm 0.42$ mm
Ángulo entre el plano de simetría de la entalla y el eje longitudinal de la probeta.	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$
Ángulo entre dos caras longitudinales adyacentes de la probeta.	90°	$\pm 2^\circ$	90°	$\pm 2^\circ$

<sup>10</sup> En el caso de máquinas que tengan un posicionamiento automático de la probeta, se recomienda que la tolerancia sea igual a  $\pm 0.165$  mm en lugar de  $\pm 0.42$  mm.

La probeta puede marcarse sobre cualquier punto de la cara que no va a estar en contacto con los apoyos y en zonas distantes de la entalla, al menos 5 mm, para evitar los efectos de la deformación en frío que origina el marcado.

Cuando se trate térmicamente los materiales que serán evaluados el maquinado total de la muestra incluyendo su muescado se deberá hacer después del tratamiento; a menos que pueda demostrarse que no hay diferencia si el maquinado de la muestra se haga antes del tratamiento térmico.

#### 2.5.4 Procedimiento y Operación de la Máquina

- Situar el indicador de energía al máximo de la escala leída.
- La probeta se coloca exactamente sobre los apoyos de forma que el plano de simetría de la entalla no se separe más de 0.5 mm del plano de simetría de los mencionados apoyos. Así mismo la probeta se debe colocar en el soporte de forma que la arista de la maza golpee la cara opuesta a la entalla.
- Si la norma de producto no especifica una temperatura de ensayo, ésta será de  $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

Si la norma de producto especifica la temperatura, ésta tendrá una tolerancia de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ .

Si el ensayo debe realizarse a temperatura diferente de la temperatura ambiente, la probeta debe sumergirse en un medio

refrigerante o de calentamiento durante un período de tiempo suficiente para que toda ella alcance la temperatura especificada (por ejemplo: al menos, 10 min en un medio líquido, o 30 min en medio gaseoso). La probeta se debe romper antes de los 5 s contados a partir del momento en que se saca del medio acondicionador.

El dispositivo para extraer y colocar la probeta debe permitir y debe utilizarse de forma que la temperatura de la probeta se mantenga dentro de la tolerancia establecida.

*NOTA: debe destacarse que únicamente son comparables los resultados obtenidos con probetas de iguales medidas. No existe un método general para la conversión de resultados obtenidos por un método de ensayo en los valores que se obtendrán por otro método.*

Cualquier muestra que se golpee una sola vez y no se separe en 2 piezas, deberá reportarse como "intacta" (irrompible). Si la muestra puede ser separada por fuerzas aplicadas por las manos, ésta puede ser considerada como si ha sido separada por el golpe. Los valores de impacto de la muestra intacta con energía absorbida de menos del 80% de la capacidad de la máquina pueden ser promediados con valores de las muestras rotas.

Si la energía absorbida excede el 80% de la capacidad de la máquina y la muestra atraviesa completamente el yunque, los valores deberán reportarse como aproximados y no como promediados con otros. Si una muestra intacta no pasa entre el yunque de la máquina, el

resultado va a ser reportado como que sobrepasa la capacidad de la máquina. En otro caso la muestra deberá golpearse más de una vez.

Si cualquier muestra se atasca en la máquina, se despreciarán los resultados y además se verificará que la máquina esté libre de daños y se ajustará por alguna des-calibración que pueda producirse.

### 2.5.5 Ensayos Charpy a Bajas Temperaturas

Los ensayos para determinar la resistencia de los metales a bajas temperaturas son comúnmente realizadas sumergiendo las probetas en algún líquido fresco en una vasija de boca ancha, cuando menos, 25.4 mm de líquido arriba y debajo de las probetas. Para temperaturas desde la ambiente hasta  $-78^{\circ}\text{C}$ , este líquido es usualmente alcohol o acetona, enfriado a la temperatura deseada mediante la adición de pequeños trozos de hielo seco.

Para temperaturas más bajas el agente enfriador es usualmente nitrógeno líquido y el líquido para inmersión es usualmente alcohol isopentano hasta  $-157^{\circ}\text{C}$ , y el nitrógeno líquido hasta una temperatura de  $-195^{\circ}\text{C}$ .

Los termómetros adecuados para determinar la temperatura del enfriador son del tipo mercurial hasta  $-39^{\circ}\text{C}$  alcohol o tipos bimetalicos hasta  $-101^{\circ}\text{C}$  y termopares de cobre y constantan o termómetros del tipo de pentano para temperaturas más bajas.

Las probetas deben mantenerse a la temperatura de ensayo por 15 min y la temperatura del baño debe mantenerse constante dentro de  $+0, - 2^{\circ}\text{C}$  durante los últimos 5 min antes del ensayo. El ensayo

debe completarse dentro de 5 seg después de retirar la probeta del enfriador. Como se muestra en la figura 2.18 a una temperatura de ensayo de  $-40^{\circ}\text{C}$  no ocurren cambios de temperatura apreciables dentro de los siguientes 5 seg cuando se usa alcohol.

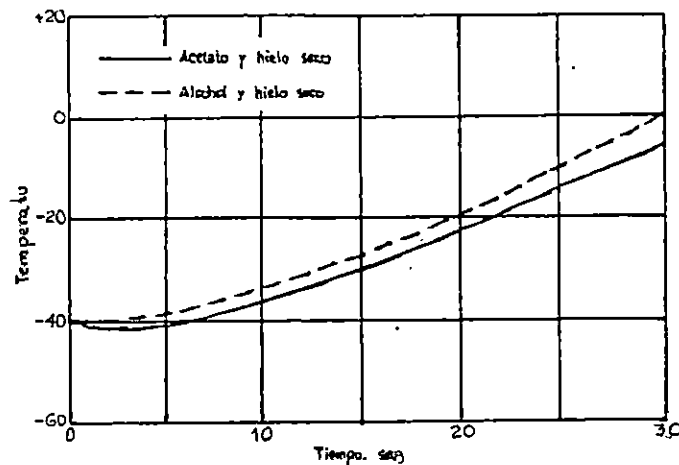


Figura 2.18 Cambio de temperatura de las probetas Charpy al retirarse del baño a  $-4.4^{\circ}\text{C}$ .

## 2.6 MÉTODOS DE ENSAYO

### 2.6.1 Método Directo

#### 2.6.1.2 Elementos por Verificar.

Los elementos de la máquina que se verifican por el método directo son los siguientes (figura 2.3, 2.4, 2.12, 2.13).

- a) El cuerpo de la máquina, o sea la estructura que soporta el péndulo excluyendo la fundación;
- b) Características del péndulo;
- c) Los apoyos y soportes de la probeta;
- d) El dispositivo indicador de la energía absorbida.

### 2.6.1.2 Verificación del Cuerpo de la Máquina.

Antes de realizarla, debe comprobarse que la máquina esté correctamente instalada y fijada rígidamente a una fundación adecuada. Las verificaciones por efectuar comprenden:

- a) La nivelación de los apoyos y soportes de la probeta;
- b) La posición del péndulo libre en estado de reposo;
- c) La posición del péndulo en relación con los apoyos y soportes de la probeta;
- d) El juego lateral del eje del péndulo.

#### A. Nivelación de los apoyos y soportes de la probeta

El eje de rotación del péndulo debe estar horizontal, con una pendiente admisible de 3:1000.

Los apoyos y soportes de la probeta tipo Charpy deben estar colocados de forma que su eje longitudinal sea paralelo al eje de rotación del péndulo con una pendiente admisible de 3:1000. Debe comprobarse también que el plano de oscilación del péndulo sea perpendicular al eje de la probeta.

El dispositivo de fijación de la probeta tipo IZOD debe estar colocado de forma que el eje de la probeta se encuentre en el plano de oscilación del péndulo que contiene al centro de percusión. El plano de la cara que recibe el impacto debe contener al eje de rotación del péndulo y ser perpendicular al plano de oscilación dentro de 3:1000.

#### B. Posición del péndulo libre en estado de reposo

La posición del péndulo libre en estado de reposo debe ser tal, que el borde de la cuchilla esté a una distancia menor que 2.5 mm de una barra de comprobación (colocada en la posición de ensayo), cuyas medidas se indican en la tabla 2.8 .

*NOTA: esta comprobación sólo puede ser realizada en máquinas en que la cara de la probeta que recibe el impacto se encuentra en el plano vertical que pasa por el eje de rotación del péndulo.*

TABLA 2.8  
MEDIDAS DE LAS BARRAS DE COMPROBACIÓN

Forma de la sección	Método Charpy (mm)	Método IZOD (mm)
Cuadrada	10±0.01 x 10 ±0.01 x 55 ±0.6. Sin entalladura Tolerancia de forma : 90° ±10'	10±0.01x10±0.01x75 sin entalladura Tolerancia de forma: 90° ±10
Circular	-	Φ 11.43 ± 0.012 x75 Sin entalladura

C. Posición del péndulo en relación con los apoyos y los soportes de la probeta.

Para las máquinas de ensayos tipo Charpy, el borde de la cuchilla debe tocar la barra de comprobación a menos de 0.5 mm del plano de simetría de los apoyos de la probeta.

Para las máquinas de ensayo tipo IZOD, el borde de la cuchilla debe tocar la probeta a una distancia de 22 mm ± 0.5 mm medida desde el plano de simetría de la entalladura de la probeta (parte superior de la mordaza posterior). Cuando la cuchilla está en contacto con la probeta, el ángulo entre la cara de ésta que recibe el impacto y la cara inferior de la cuchilla debe ser de 100° ± 1° (figura 2.4). Los calibradores usados deben permitir leer 0.2°.



D. Juego laterales del eje del péndulo.

El juego lateral del eje de rotación con respecto a los cojinetes no será mayor que 0.25 mm.

### 2.6.1.3 Características del Péndulo.

Estas verificaciones comprenden las determinaciones siguientes:

- a) la energía potencial inicial;
- b) el error en la indicación de la energía absorbida;
- c) la velocidad de impacto;
- d) las pérdida de energía;
- e) la posición del centro de percusión (distancia entre el centro de percusión y el eje de rotación);
- f) el radio de curvatura y el ángulo de la cuchilla;
- g) el contacto entre el borde de la cuchilla y la probeta.

#### a) Energía potencial inicial.

La energía potencial inicial no debe apartarse en más del 1% del valor nominal indicado. La energía potencial  $A$  se determina por la fórmula siguiente:

$$A = M(1 - \cos \alpha) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

siendo:

$M$ : el momento del péndulo

$\alpha$ : el ángulo de caída

El momento  $M$  se determina soportando al péndulo en un punto de su barra ubicada a una distancia  $L_2$ , preferentemente mayor que  $L/2$ , por medio de una cuchilla

de apoyo sobre una balanza o dinamómetro, de manera que el centro de gravedad del péndulo esté ubicado en el plano horizontal que pasa por el eje de rotación. Como por construcción, el centro de gravedad del péndulo se halla sobre el borde de la cuchilla se lo toma como referencia para establecer la posición horizontal. Se miden la fuerza  $F$  ejercida sobre la cuchilla de apoyo y la distancia  $L_2$  entre ésta y el eje de rotación, con un error menor o igual que 0.2% (figura 2.19). El momento  $M$  del péndulo se determina por la fórmula siguiente:

$$M = F \cdot L_2 \quad (\text{Ec. 2.2})$$

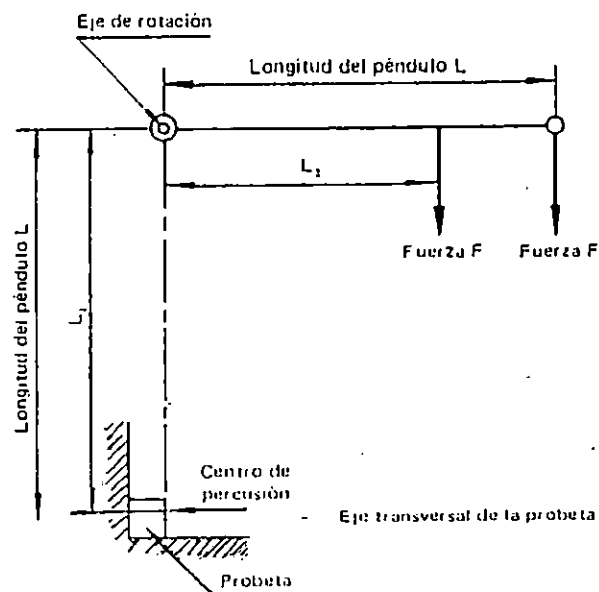


Figura 2.19

El ángulo de caída  $\alpha$  descrito por el péndulo se mide directamente por medio de la aguja indicadora del cuadrante de la máquina o indirectamente con un catetómetro. Esta medición se realiza con un aproximación de 4'(minutos).

NOTA: La medición de ángulos puede presentar alguna dificultad, lo que puede obviarse reemplazando la medición por la longitud y calculando trigonómicamente el valor del ángulo (figura 2.20).

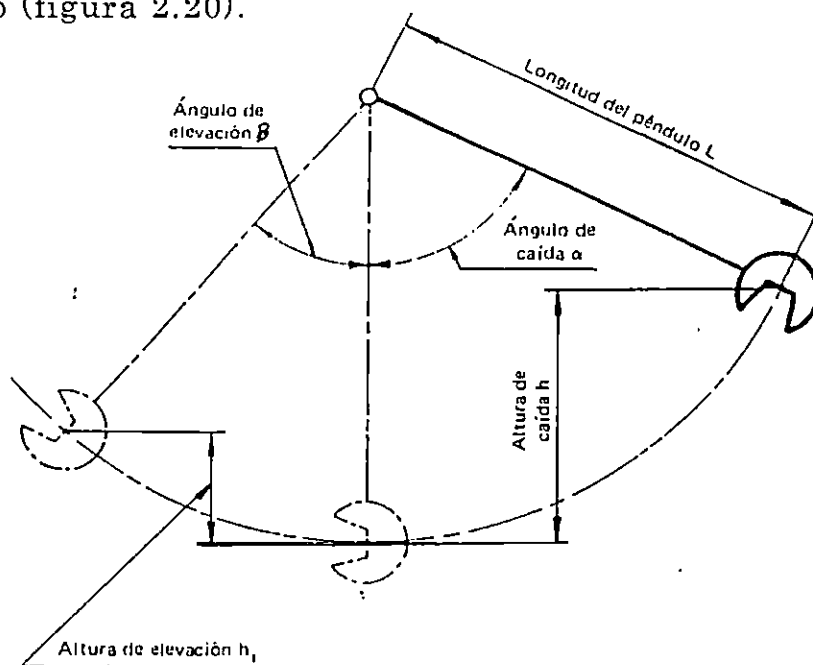


Figura 2.20

b) Error en la indicación de la energía absorbida. Se verifican graduaciones de la escala correspondientes a los valores de energía absorbida siguientes: 0%, 10%, 20%, 30% y 80% del alcance de la escala.

Para cada uno de los valores de energía establecidos se elevará el péndulo arrastrando al indicador hasta que éste se detenga sobre la graduación por verificar. El ángulo de elevación  $\beta$  puede ser medido en cada caso directamente por medio de la aguja indicadora del cuadrante o indirectamente

con un catetómetro. Esta medición se deberá realizar con una aproximación de 4'(minutos).

La energía absorbida  $A_v$  es igual a:

$$A_v = M(\cos \beta - \cos \alpha) \quad (\text{Ec 2.3})$$

El error en la indicación de la energía absorbida no debe ser mayor que 3% del valor de  $A_v$  o 1% del alcance de la escala (el mayor de ambos).

La mayor aproximación en la medición de  $F$ ,  $L_2$ ,  $\alpha$  y  $\beta$ , debe ser tal, que permita determinar  $A_v$  con un error no mayor que el 0.3% del alcance de la escala.

NOTA: Se debe tener en cuenta que la precisión de la determinación de la energía absorbida varía en sentido inverso de  $A_v$ . Esto es muy importante cuando el valor de  $A_v$  es pequeño comparado con el de  $A$ .

c) Velocidad de impacto.

La velocidad de impacto se determina por la fórmula siguiente:

$$V = \sqrt{2g.L.(1 - \cos \alpha)} \quad (\text{Ec 2.4})$$

siendo:

- V: la velocidad, en metros por segundo;
- g: la aceleración de la gravedad, en metros por segundo cuadrado;
- $\alpha$ : el ángulo de caída, en grados sexagesimal;

L: la distancia del eje de rotación al centro de la cara de la probeta tipo Charpy o a la línea de contacto de la cuchilla con la probeta tipo IZOD, en metros.

La velocidad de impacto debe estar comprendida entre 3.0 m/s y 6.0 m/s para el método Charpy (Según ASTM E23) y 3 m/s a 4.5 m/s para el método IZOD. Para las máquinas tipo Charpy de nuevo diseño se recomienda que la velocidad de impacto esté comprendida entre 5 m/s y 5.5 m/s.

d) Pérdidas de Energía.

La diferencia entre la energía potencial inicial, y la energía residual dada por la elevación del péndulo, incluye además de la energía absorbida por la fractura de la probeta, las pérdidas de energía debidas a:

- i. El arrastre del indicador por fricción, resistencia del aire y rozamiento del eje en sus cojinetes;
- ii. La proyección de los fragmentos de la probeta;
- iii. Las vibraciones que se producen en el momento del impacto en el péndulo, cuerpo y fundación de la máquina.

⇒ Pérdidas de energía al arrastre del indicador a fricción.

El péndulo se coloca en posición de lanzamiento (ángulo de caída  $\alpha$ ) y se opera en forma normal, pero sin colocar la probeta en el soporte, y se lee el ángulo de elevación  $\beta_1$ .

Se opera nuevamente el péndulo en las condiciones anteriores sin modificar la posición alcanzada por el

indicador a fricción (ángulo de elevación  $\beta_1$ ) y se lee el nuevo ángulo de elevación  $\beta_2$ .

Los valores de  $\beta_1$  y  $\beta_2$  tomados para el cálculo, corresponden al promedio de 4 determinaciones.

La pérdida por fricción del indicador se determina por la fórmula siguiente:

$$p = M (\cos \beta_1 - \cos \beta_2) \quad (\text{Ec 2.5})$$

↳ Pérdida de energía por resistencia del aire y por el rozamiento del eje en sus cojinetes.

Estas pérdidas se determinan por la fórmula siguiente:

$$p' = M (\cos \beta_2 - \cos \alpha) \quad (\text{Ec 2.6})$$

el valor total  $p + p'$ , así determinado no será mayor que 0.5% de la energía potencial inicial del péndulo.

Este control se realiza periódicamente y no sólo cuando se efectúa una verificación completa, ya que permite detectar anomalías de la máquina, por ejemplo, falta de engrasamiento o el desgaste de los cojinetes.

La determinación de la corrección por pérdidas correspondientes a un ángulo de elevación  $\beta$  cualquiera, puede calcularse admitiendo la proporcionalidad de las pérdidas con los ángulos recorridos y se obtiene con la fórmula siguiente:

$$p_{\beta} = p \frac{\beta}{\beta_1} + p \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \beta_2} \quad (\text{Ec 2.7})$$

Este valor es tanto más cercano a la determinación exacta de la corrección de la energía absorbida, cuando menor es su valor.

e) Posición del centro de percusión.

La distancia  $L_1$  del centro de percusión al eje de rotación que es la longitud del péndulo ideal no debe diferir de la longitud  $L$  en  $\pm 1\%$  y se obtiene a partir del tiempo de oscilación  $t$  del péndulo. La distancia  $L_1$  se determina haciendo oscilar el péndulo con un ángulo de caída no mayor que  $5^\circ$  y midiendo el tiempo  $t$  de una oscilación completa.

Se calcula  $L_1$ , mediante la fórmula siguiente:

$$L_1 = \frac{gt^2}{4\pi} \quad (\text{Ec 2.8})$$

Siendo:

$g$  : la aceleración de la gravedad, ( $m/s^2$ )

$\pi^2$  : 9.81

$t$  : el tiempo de oscilación del péndulo, en segundos determinado con una precisión del 0.1%

Para un péndulo donde el tiempo de oscilación es de aproximadamente 2 segundos, se lo puede determinar con un precisión suficiente tomando, como valor de  $t$ , el promedio de 4 determinaciones de la duración total  $T$  de 100 oscilaciones completas, con la condición de que la repetibilidad, dada por

la diferencia entre la duración máxima ( $T_M$ ) y la duración mínima ( $T_m$ ) para 100 oscilaciones, no sea mayor que 0.2 s.

f) Forma y punta de la cuchilla.

El radio de curvatura del borde de la cuchilla debe verificarse con calibradores que estén contruidos con una tolerancia de 0.005 mm. El ángulo de la punta de la cuchilla debe determinarse con calibradores que estén contruidos con una tolerancia de  $0.2^\circ$ .

Las medidas del radio de curvatura del borde de la cuchilla y del ángulo de la punta de la cuchilla son las indicadas en la tabla 2.9.

TABLA 2.9  
MEDIDAS DE LA CUCHILLA

	Método Charpy	Método IZOD
Radio de curvatura del borde de la cuchilla	2 mm a 2.5 mm	0.5 mm a 1 mm
Ángulo de la punta de la cuchilla	$30^\circ \pm 1^\circ$	$75^\circ \pm 1^\circ$

g) Contacto entre el borde de la cuchilla y la probeta.

Cuando el borde de la cuchilla hace contacto con la probeta, se debe verificar que:

- i. Se realice sobre el ancho total de la cara enfrentada al martillo;
- ii. Se efectúe según una recta perpendicular al eje longitudinal de la probeta, con una discrepancia de  $\pm 2^\circ$ .



### Procedimiento

Se toma una probeta de 10 mm x 10 mm entallada (ver nota) y se la cubre con un papel fino bien apretado, dejando libre la entalladura para permitir la correcta colocación de la probeta en el soporte correspondiente (el buen contacto entre el papel y la probeta puede asegurarse, por ejemplo, por medio de cinta adhesiva).

*NOTA: se recomienda que esta probeta sea de acero con una dureza mayor que 30 HRC, para asegurar una deformación mínima sobre las caras.*

La punta de la cuchilla puede cubrirse de igual forma, pero con papel carbónico, dejando la tinta del lado exterior, o entintarse ligeramente con azul de prusia.

Se aparta el martillo unos grados de su posición de equilibrio; al dejarlo libre tocará a la probeta, produciendo una marca sobre el papel que la cubre.

La línea así marcada sobre el papel, cuyo ancho no deberá superar 0.5 mm, deberá cumplir lo establecido en el literal g) ( i. e ii.)

#### 2.6.1.4 Apoyos y Soportes de la Probeta.

Para la realización del ensayo por el método Charpy, las medidas que deben verificarse en los apoyos de la probeta son:

- a) la distancia entre apoyos;
- b) la inclinación de los apoyos;

- c) el radio de curvatura de los apoyos.

La distancia entre apoyos debe ser de  $40 \begin{smallmatrix} +0.5 \\ 0 \end{smallmatrix}$  mm. Se mide con calibradores que estén contruidos con una tolerancia de 0.1 mm.

La inclinación de los apoyos debe ser  $1 \pm 0.5$  en 5 unidades de longitud (aproximadamente  $11^\circ \pm 1^\circ$ ). Se mide con calibradores que estén contruidos con una tolerancia de  $0.2^\circ$ .

El radio de curvatura de los apoyos debe ser de 1 mm a 1.5 mm. Se mide con calibradores que estén contruidos con una tolerancia de 0.1 mm.

Para la realización del ensayo por el método IZOD las medidas que se deben verificar en el soporte de la probeta son:

- a) el ángulo entre la cara superior de las mordazas y la cara que sujeta la probeta;
- b) el ancho de la ranura de alojamiento de la probeta.

Se coloca una barra de comprobación de sección cuadrada o circular y se la sujeta fuertemente en las mordazas de la máquina. Las medidas de las barras de comprobación se indican en la tabla 2.8. El ángulo entre la cara superior de las mordazas y la cara de la probeta debe ser de  $90^\circ \pm 0.5^\circ$ . Se mide con calibradores contruidos con una tolerancia de  $0.1^\circ$ .

Las medidas de ancho de la ranura de alojamiento de la probeta deben ser, para la probeta de sección cuadrada,  $10 \begin{smallmatrix} +0.25 \\ +0.15 \end{smallmatrix}$  mm, y para la probeta de sección circular  $11.43 \begin{smallmatrix} +0.25 \\ +0.18 \end{smallmatrix}$  mm. Se debe verificar con calibradores contruidos con una tolerancia de 0.025 mm.

#### 2.6.1.4 Graduación de la Escala del Equipo Indicador de la Máquina.

Esta verificación consiste en el examen de:

- a) la graduación de la escala;
- b) la aguja indicadora.

En las máquinas de nuevo diseño, se recomienda que la menor división de la escala cumpla con lo establecido en la tabla 2.10.

TABLA 2.10  
MENOR DIVISIÓN DE LAS ESCALAS

MÉTODO	CHARPY		IZOD	
Capacidad de la máquina	≤ 147 J	> 147 J	≤ 81 J	> 81 J
Menor división de la escala	1 J máx	2 J máx	1.35 J más	2.7 J máx

Se recomienda que la longitud de la menor división de la escala no sea menor que 2 mm para los valores máximos establecidos en la tabla 2.10.

En el caso de máquinas que tengan cuadrante circular, debe verificarse que su graduación esté centrada con el eje del péndulo.

El ancho de las marcas de la graduación no debe ser mayor que 0.2 de la menor división de la escala.

La punta de la aguja indicadora no debe ser mayor que el ancho de las marcas de la graduación y permitirá efectuar la lectura sin error por paralaje.

## 2.6.2 Método Indirecto

### 2.6.2.1 Fundamento:

La verificación de la máquina por el método indirecto consiste en la comparación entre los valores de energía absorbida determinados con una máquina patrón y los obtenidos con la máquina por verificar mediante la flexión por impacto de un lote de probetas no entalladas, tratadas térmicamente, de manera de obtener propiedades uniformes, que les permitan resistir el doblado sin fracturas y sin que los bordes de los apoyos produzcan marcas profundas.

Esta verificación debe efectuarse en tres niveles distintos de energía que incluyan al tercio inferior, al tercio medio y al tercio superior de la escala.

### 2.6.2.2 Selección y Preparación de las Probetas

Para cada nivel de energía de la escala se cortan, de una barra de acero,  $5n$  probetas del mismo largo, una a continuación de la otra (siendo  $n$  el número entero que puede hallarse entre 6 y 10), se numeran de 1 a  $5n$  y se mecanizan con las medidas indicadas en la tabla 2.11.

Nota: en el caso de aceros con tratamiento térmico de normalizado que tengan una resistencia a la tracción aproximada a 400 MPa, el

orden de magnitud de la energía necesaria para efectuar la flexión por el método Charpy es: 20 J, 70J y 140 J, para espesores de probeta de 3 mm, 5 mm y 7.5 mm, respectivamente. Para el método de IZOD, es de 12J, 30J, 70J y 140 J para espesores de probeta de 3 mm, 5 mm, 7.5mm y 9 mm, respectivamente.

Las probetas numeradas  $1; n + 1; 2n + 1; 3n + 1; 4n + 1$ ; se flexionan con la máquina patrón de forma que la cuchilla golpee en la cara de 10 mm de ancho.

TABLA 2.11  
MEDIDA Y DISCREPANCIAS DE LAS PROBETAS

Dimensión		Medida nominal (mm)	Discrepancias de mecanizado (mm)
Largo	Método Charpy	55	$\pm 0.1$
	Método IZOD	75	-
Ancho		10	$\pm 0.01$
Espesor		Variable	$\pm 0.01$

Las cantidades de energía absorbida (T) obtenidas según lo anterior se ordenan en forma creciente desde  $T_1$  hasta  $T_5$ .

Si se cumple que  $T_5 - T_1$  es menor que el 5% de  $T_1$ , el material se considera con uniformidad satisfactoria y las  $5n - 5$  probetas restantes se utilizarán para verificar el péndulo, atribuyéndoseles un valor de energía absorbida igual a  $T_3$ .

#### 2.6.2.3 Verificación del Péndulo por Flexión de Probetas no Entalladas.

Debe verificarse que los soportes de la probeta respondan a las condiciones establecidas anteriormente.

Para verificar en la escala de la máquina la graduación correspondiente al valor  $T_3$ , deben flexionarse cinco probetas provenientes del lote cuya energía absorbida  $T_3$  fue asignada según se especificó en 2.6.2.2. Los valores de energía absorbida así obtenidos deben ordenarse en forma creciente, desde  $T_{1m}$  hasta  $T_{5m}$ .

La repetibilidad de la máquina está dada por la diferencia  $T_{5m} - T_{1m}$ . Se considerará satisfactoria si esta diferencia no es mayor del 10% de  $T_{1m}$ .

El error relativo ( $e$ ) de la máquina se calcula mediante la fórmula:

$$e = \frac{T_{3m} - T_3}{T_3} \quad (\text{Ec 2.9})$$

Se considerará la exactitud de la máquina satisfactoria si este valor no excede del 5%.

Si una de las dos condiciones anteriores no se cumple, debe buscarse la causa mediante la verificación por el método directo, de acuerdo con el método indirecto..

Las diferentes graduaciones de la escala de la máquina, pueden verificarse variando los espesores de la probeta.

## 2.7 INFORMACIÓN OBTENIDA DEL ENSAYO.

Sólo serán comparables los resultados de los ensayos realizados en las mismas condiciones y con las mismas probetas. No existe un

método de conversión de valores de estos resultados obtenidos con probetas de distinto tipo.

El valor de la tenacidad no quedará definido si la probeta no se rompe totalmente y en este caso deberá mencionarse en los resultados del ensayo , así como la energía desarrollada sin conseguir su rotura.

Los resultados de tenacidad se podrán expresar como valor de la energía absorbida en la rotura o como valor de la misma por unidad de superficie. En el primer caso se utilizarán los símbolos KU o KV y en el segundo los símbolos KCU y KCV.

En ambos casos y cuando el ensayo en que la energía aplicada o la probeta no sean las normales, estos símbolos irán afectados por subíndices indicando la energía y el espesor de la probeta empleados.

Mientras menos profunda y aguda sea la entalladura, mayor será la diferencia entre los resultados obtenidos con materiales tenaces y los de poca tenacidad. No obstante, si la entalladura tiene muy poca profundidad, la muestra no se romperá, por lo que casi siempre, se prefiere la profundidad de 2 mm. Puesto que es difícil labrar a máquina una entalladura perfectamente aguda, se ha adoptado generalmente un radio de 0.25 mm para la mayoría de las pruebas.

El efecto de la entalladura es concentrar esfuerzos en su raíz e introducir patrones de esfuerzos triaxiales que restrinjan el flujo plástico y aumente el límite elástico del material. Cuando se produce una hendidura en la raíz de la entalladura, el esfuerzo se intensifica

enormemente y la hendidura progresa con rapidez, a través de la sección transversal. Sin la entalladura, las muestras de muchos materiales sencillamente se doblarían, sin tener fractura, y no podría detectarse su capacidad total para absorber energía. La respuesta de los materiales a la presencia de cambios abruptos en su sección transversal, es muy variada. La prueba de impacto con probetas entalladas constituye una forma apropiada de estudiar esta respuesta, que se conoce como sensibilidad de entalladura de los materiales. La temperatura tiene un efecto muy importante en los resultados de las pruebas de impacto con probeta entallada, en algunas aleaciones, sobre todo en los materiales de composición ferrosa. La resistencia al impacto en probeta entallada de estructuras de acero cúbicas centradas en el cuerpo, disminuye, casi siempre, en forma brusca, en el rango de temperaturas atmosféricas. Por ejemplo

una reducción en tenacidad de 70 pie-



enormemente y la hendidura progresa con rapidez, a través de la sección transversal. Sin la entalladura, las muestras de muchos materiales sencillamente se doblarían, sin tener fractura, y no podría detectarse su capacidad total para absorber energía. La respuesta de los materiales a la presencia de cambios abruptos en su sección transversal, es muy variada. La prueba de impacto con probetas entalladas constituye una forma apropiada de estudiar esta respuesta, que se conoce como sensibilidad de entalladura de los materiales. La temperatura tiene un efecto muy importante en los resultados de las pruebas de impacto con probeta entallada, en algunas aleaciones, sobre todo en los materiales de composición ferrosa. La resistencia al impacto en probeta entallada de estructuras de acero cúbicas centradas en el cuerpo, disminuye, casi siempre, en forma brusca, en el rango de temperaturas atmosféricas. Por ejemplo un acero típico puede presentar una reducción en tenacidad de 70 pie-lbs a 10 pie-lbs, en el rango de temperaturas comprendido entre 80° F (27° C) y -40° F. (-40° C) . De hecho, una de las aplicaciones más importantes de los resultados de las pruebas con probetas entalladas es determinar la viabilidad de los distintos aceros para uso en climas fríos.

Además de proporcionar datos sobre la tenacidad, la sensibilidad de entalladura de los materiales y los efectos de la temperatura, estas pruebas son útiles también para determinar si una secuencia de proceso dada puede desarrollar el máximo de tenacidad en un material . Esto último es especialmente útil en relación con las aleaciones ferrosas, en las que se puede usar una variedad de ciclos de tratamientos térmicos para lograr un valor determinado de dureza

o resistencia elástica.. Estos ciclos de tratamientos térmicos pueden tener un efecto variable en la tenacidad; por ejemplo, si se sobrecalienta la aleación antes de enfriarla por inmersión en agua, esto tiende a engrosar el tamaño de los granos de austenita y afectar la tenacidad, aunque no perjudica mucho su dureza. De la misma manera, algunas temperaturas y procedimientos de templado, que siguen al endurecimiento, pueden ocasionar fragilidad (fragilidad de temple y de revenido) y pérdida de tenacidad. La dureza de estas piezas indebidamente templadas es satisfactoria; pero no la tenacidad, como lo demuestra la prueba de impacto con probeta entallada.

## 2.8 APARIENCIA DE LA FRACTURA

Las muestras que sufren fracturas, siempre deben examinarse con cuidado. Si su superficie es suave y lisa, ello indicará un tamaño de grano fino, y ductilidad en los aceros mientras que un aspecto de grano grueso será indicación de fragilidad, falta de tenacidad y, probablemente, un recalentamiento antes del endurecimiento. Con frecuencia se aprecian dos zonas distintas, una suave y lisa, donde se inició la fractura dúctil, y otra de grano grueso, donde se produjo la fractura frágil.

Es muy importante examinar la superficie de fractura para determinar cuándo es fibrosa (fractura de cizallamiento) o granular (fractura de despegue), y hacer una estimación de la proporción entre áreas fibrosas y áreas granulares cuando se presentan fracturas de tipo mixto. La figura 2.21 muestra fracturas típicas.

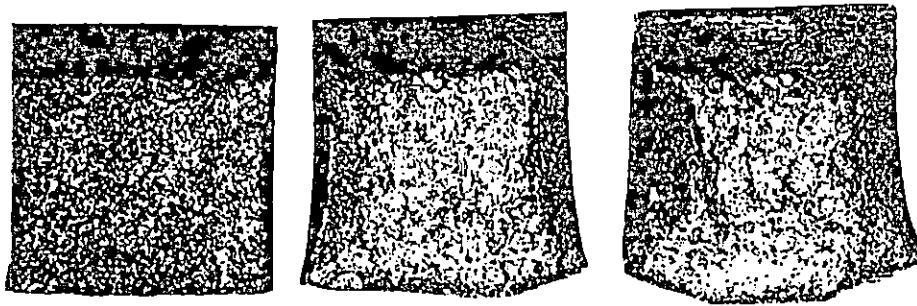


Figura 2.21 Superficies de fracturas de probetas Charpy entalladas a distintas temperaturas. Izquierda: 5° C. Centro 38° C. Derecha 100° C. Puede observarse la disminución progresiva de la región granular y el aumento en la contracción lateral en el fondo de la entalla al aumentar la temperatura.

El ensayo de choque sobre probeta entallada es mucho más informativo cuando se realiza sobre un intervalo de temperaturas, para poder determinar la temperatura de transición de dúctil a frágil. La figura 2.22 informa sobre los tipos de curvas que se obtienen. Nótese que la energía absorbida disminuye al bajar la temperatura, pero que, en la mayoría de los casos, no hay un tránsito brusco a una temperatura bien definida, por lo que resulta difícil determinar con precisión la temperatura de transición.

Cuando al descender la temperatura el aspecto de la fractura cambia progresivamente desde la fibrosa de cizalladura a la granular de despegue, a través de una sucesión de fracturas de tipo mixto con áreas fibrosas y granulares, es frecuente determinar la temperatura de transición como la correspondiente a un 50% de fractura fibrosa; la temperatura de transición de la ductilidad se elige a veces, arbitrariamente, como la correspondiente a una fractura con el 1% de contracción lateral en la entallada. Una característica de estos criterios de ductilidad es que la temperatura de transición basada en el aspecto de la fractura es siempre más elevada que la seleccionada sobre criterios de energía o de ductilidad.

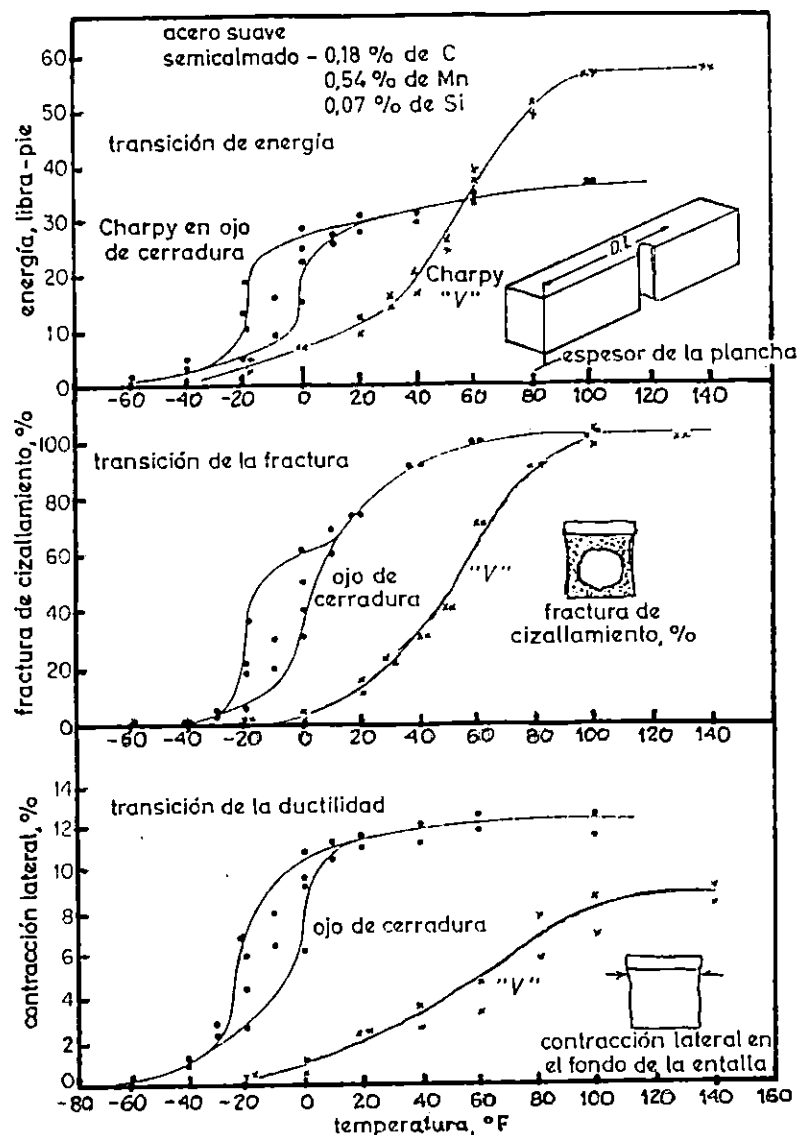


Figura 2.22 Curvas de temperatura de transición, basadas en la energía absorbida, en el aspecto de la fractura y en la ductilidad con entalla.

## 2.9 ELECCIÓN DEL TIPO DE MAQUINA A CONSTRUIR Y LA PROBETA A UTILIZAR

El ensayo más utilizado para efectuar pruebas de impacto en materiales metálicos es el ensayo Charpy. Para este ensayo se utilizan distintos diseños de péndulos, como: péndulo compuesto,

péndulo tipo U y péndulo tipo C [según 2.5.1 pag. 101]. De estos tres tipos básicos de péndulos, se ha escogido el péndulo tipo C, pues su diseño y construcción es más sencillo para la capacidad de construcción que se tiene. Los detalles de construcción, montaje y operación se detallan en el capítulo referente al ensayo.

De los tres tipos básicos de probetas para el ensayo Charpy se recomienda la probeta tipo V, pues esta probeta mide de mejor manera la resistencia del material a la propagación de la fractura y por lo tanto ofrece datos más representativos y confiables que las otras.

# CAPITULO III

### 3.0 DISEÑO DE ELEMENTOS DE LA MÁQUINA PARA PRUEBAS A FLEXIÓN POR IMPACTO CHARPY

La máquina para ensayos a la flexión por impacto, consta de un conjunto de elementos indispensables para su funcionamiento, estos elementos son:

1. El péndulo
2. El cuerpo de la máquina
3. Los apoyos de la probeta
4. El dispositivo medidor de energía

#### 3.1 ANÁLISIS DE RUPTURA DE LA PROBETA

Antes de proceder a diseñar cada uno de los elementos de la máquina, es indispensable analizar la capacidad de absorción de energía al impacto de la probeta. La energía absorbida dependerá de las dimensiones de la probeta, la temperatura de ensayo y por supuesto del material del cual está hecha.

##### 3.1.1 Dimensionamiento de la Probeta

La probeta estándar utilizada para el ensayo Charpy posee dimensiones de 10x10x55 mm, pero también se utilizan probetas de dimensión reducida las cuales son: 3x10x55 mm; 5x10x55 mm y 7.5x10x55 mm (ver tabla 2.7), en donde la entalla se situará en una de las caras estrechas.

Con el propósito de que la capacidad de la máquina sea menor de la necesaria para fracturar una probeta estándar de 10x10x55 mm, y por ende las dimensiones de la máquina sean menores, se utilizará para el ensayo Charpy, una probeta de 5x10x55 mm.

### 3.1.2 Selección del Material de la Probeta

Según la figura 1.47, el contenido de carbono en el acero afecta la tenacidad de él; de manera que se disminuye la capacidad de absorción de energía para causar la fractura si el contenido de carbono aumenta.

Por ser los aceros de bajo carbono los de mayor tenacidad, estos se utilizarán como referencia para determinar la capacidad de la máquina y el diseño de los elementos de la misma.

Debido a que en nuestro medio el acero de bajo carbono más utilizado es el AISI 1020 se utilizará este como base para determinar la energía de ruptura al impacto.

### 3.1.3 Energía de Ruptura de la Probeta y Capacidad de la Máquina

La energía máxima que absorbe hasta fracturarse el acero AISI 1020 se determinará utilizando la figura 1.47 para el acero al carbono con 0.22% de carbono. Esta energía es de 135 lb.pie (180 Joules) para temperaturas de ensayo superiores a 200°F (93° C) y en donde se utilizan probetas con entalla en "V" de 10x10x55 mm de acero recocido.

Siendo la probeta a utilizar de 5x10x55 mm y una capacidad de 100 Joules asegura que la energía absorbida por la probeta no excederá la capacidad de la máquina. La norma IRAM – IAS U 500 señala que para aceros con tratamiento térmico de normalizado que tengan una resistencia a la tracción aproximada a 400 MPa, la energía necesaria para efectuar la flexión por el método Charpy es de 70 Joules para probetas de dimensión de 5x10x55; lo que demuestra que la energía absorbida por fractura en probetas de 5mm de espesor es menor a la capacidad de la máquina (70J < 100J).



## 3.2 PÉNDULO DE LA MÁQUINA

### 3.2.1 Masa del Péndulo

El Péndulo está constituido por una masa pesada (disco del péndulo) y un sistema de sujeción (barra del péndulo), cada uno de estos elementos tiene su propia masa, por lo que la masa total del péndulo es igual a la suma de las dos masas (disco y barra).

El análisis será desarrollado en base a la energía necesaria para producir la ruptura de la probeta.

Las máquinas Charpy, pueden tener una variedad de tamaño, para nuestro caso se diseñó en base a una capacidad de 100 Joules.

La probeta a utilizar en el ensayo será la de 5x10x55 mm con muesca en "V" en su centro, tal como se muestra en la figura 3.1

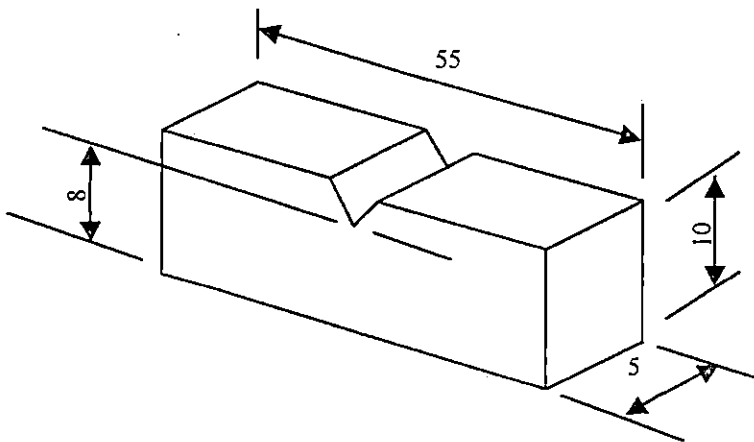


Figura 3.1 Probeta para ensayo a la flexión por impacto Charpy  
(Dimensiones en milímetros, para más detalles ver plano 1)

Para simplificar el análisis se asumirá que toda la energía potencial gravitatoria del péndulo se transforma en energía cinética, la cual vendrá dada por la siguiente relación:

$$E_c = \frac{1}{2} m_p \times V^2 \quad (\text{Ec } 3.1)$$

donde:

- $E_c$  : Energía cinética  
 $m_p$  : masa del péndulo (discos y barra)  
 $V$  : Velocidad de caída del péndulo

De la ecuación 3.1, la masa necesaria para producir la energía de ruptura de la probeta (100 J), viene dada por:

$$m_p = \frac{2E_c}{V^2}$$

donde:

$$E_c : 100\text{J}$$

La velocidad de caída del péndulo según las normas IRAM – IAS U 500 – 18 y ASTM E – 23, para máquinas nuevas Charpy, está comprendida entre 3 y 6.0 m/s, en el análisis se utiliza una velocidad de 4.0 m/s.

Luego la masa es:

$$m_p = \frac{(2)(100)\text{N.m}}{(4)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$m_p = 12.5 \text{ kg } (27.5 \text{ lbm})$$

### 3.2.2 Longitud del Péndulo

Con la masa calculada anteriormente (12.5kg), se producirá la energía necesaria para romper la probeta.

Por medio de la ecuación 3.2, y no considerando pérdidas puede encontrarse la altura de caída del péndulo, asumiendo que está concentrada la masa del péndulo en el centro de gravedad del mismo. Por lo que H será la altura del centro de gravedad (Hg).

$$E_p = (W)(H) \quad (\text{Ec 3.2})$$

Donde:

$E_p$  : energía potencial

$W$  : Peso del péndulo (barra y disco)

$H$  : altura de caída del péndulo

Encontrando la altura del centro de gravedad por medio de la ecuación 3.2

$$H_g = E_p / W$$

$$H_g = (100)\text{N.m} / (12 \text{ kg} \times 9.81 \text{ m/s}^2)$$

$$H_g = 0.815 \text{ m} \equiv 815 \text{ mm}$$

En la figura 3.2 se muestra la posición del centro de gravedad.

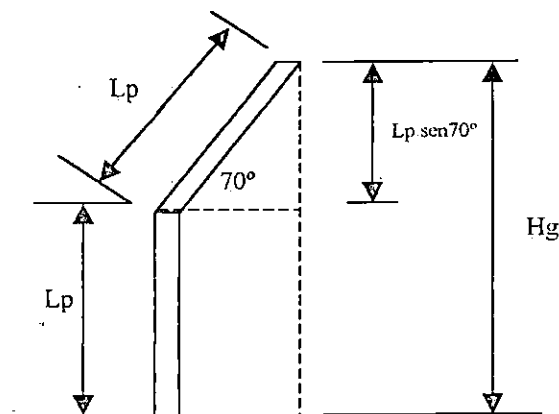


Figura 3.2 Esquema del péndulo, inicio del ensayo

De la figura 3.2, se determinará la longitud del péndulo ( $L_p$ ), por medio de la siguiente relación tenemos:

$$H_g = L_p + L_p \operatorname{sen} 70^\circ$$

$$L_p = H_g / (1 + \operatorname{sen} 70^\circ)$$

$$L_p = 0.815 \text{ m} / (1 + \operatorname{sen} 70^\circ)$$

$$L_p = 0.420 \text{ m} \approx 420 \text{ mm.}$$

### 3.2.3 Diseño de la Barra del Péndulo

La máquina de prueba debe tener un péndulo de construcción rígida y de capacidad más que suficiente para romper la muestra de un solo golpe.

El péndulo tendrá dos posiciones críticas; cuando se encuentra sujeto en la parte superior, listo para efectuar un ensayo y cuando el péndulo se encuentra en la parte inferior después de haber sido liberado de su otra posición límite. Estas posiciones se muestran en la figura No. 3.3, así mismo se representan las fuerzas que actúan sobre el péndulo.

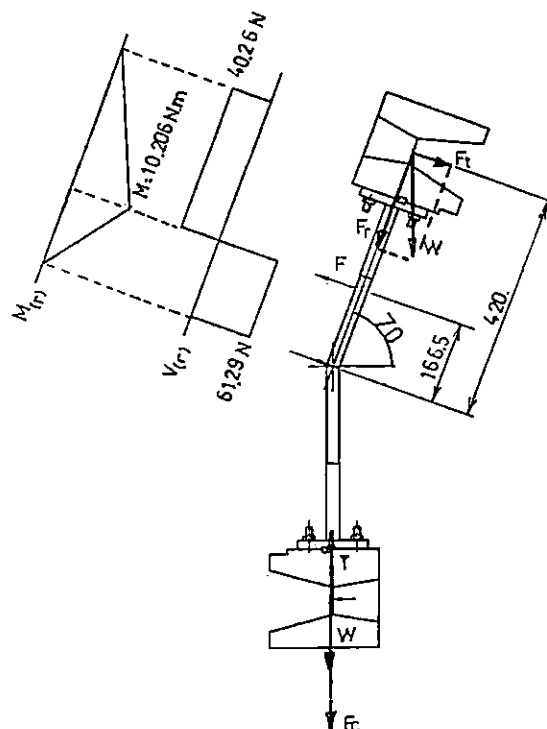


Figura No. 3.3 Análisis de fuerzas en el centro de masa.

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

Analizando para cada posición los esfuerzos inducidos sobre la barra del péndulo; se tendrá en la sección transversal de la barra para el punto uno, esfuerzo de compresión como resultado de la descomposición del peso en la orientación longitudinal de la barra y esfuerzo de flexión por la componente del peso perpendicular al eje de la barra junto a la fuerza de apoyo que sirve para posicionar el péndulo en su posición de disparo.

El esfuerzo máximo se dará en el punto de mayor momento de flexión el cual se denota en la figura 3.3. Haciendo momento en el centro de rotación:

$$\sum M_o = F(l) - F_t(L_p) = 0$$

$$F = F_t (L_p) / l$$

Donde :

F : Fuerza de Apoyo.

$F_t$  : Componente del peso perpendicular al eje del péndulo ( $W \text{ sen } 20^\circ$ )

$L_p$  : Longitud del péndulo

l : Distancia del centro de rotación al apoyo

$$F = (W \text{ sen } 20^\circ) (L_p) / l$$

$$F = (117.72 \text{ sen } 20^\circ \text{ N}) (420 \text{ mm}) / 166.5 \text{ mm}$$

$$F = 101.56 \text{ N}$$

Del diagrama de cortante y utilizando el método de las áreas se calculará el momento máximo. Siendo la fuerza utilizada :

$$F_{\text{max}} = 101.56 - 40.26$$

$$F_{\text{max}} = 61.30 \text{ N}$$

Y la longitud del segmento de área:

$$l = 166.5 \text{ mm}$$

$$l = 0.1665 \text{ m}$$

El momento máximo en el eje es :

$$M = 10.206 \text{ N.m}$$

El esfuerzo máximo será la suma del esfuerzo de flexión más el axial.

$$\sigma = \frac{Mc}{I} - \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{Mc}{I} - \frac{F_r}{A} \quad (\text{Ec 3.3})$$

siendo:

$F_r$  : Fuerza radial (componente del peso =  $W(\cos 20^\circ)$ )

$c$  : Distancia del eje neutro a la fibra externa del eje ( $d/2$ )

$I$  : Momento de inercia ( $\frac{\pi}{64}d^4$ )

$A$  : Área de la sección transversal ( $\frac{\pi}{4}d^2$ )

$\sigma$  : Esfuerzo en el elemento

Sustituyendo  $F_r$ ,  $I$ ,  $c$  y  $A$  en la ecuación 3.3

$$\sigma = \frac{M(d/2)}{\frac{\pi}{64}d^4} - \frac{W(\cos 20^\circ)}{\frac{\pi}{4}d^2}$$

$$\sigma = \frac{32M}{\pi d^3} - \frac{4W(\cos 20^\circ)}{\pi d^2} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

El péndulo funciona a ciclos bajos de operación, por lo que se analizará bajo el criterio del esfuerzo normal máximo. Ocurrirá falla cuando el esfuerzo iguale a la resistencia de fluencia:

$$\sigma = S_y/n \quad (\text{Ec 3.5})$$

Seleccionando un acero AISI – 1045 (de anexo 1) como material para la barra del péndulo, el cual tiene una resistencia de fluencia de 310 MPa; se determinará el diámetro de la barra utilizando la ecuación 3.4, si:

$$W = 122.5 \text{ N}$$

$$S_y = 310 \text{ MPa}$$

$$n = 3 \text{ (de anexo 2)}$$

entonces:

$$\frac{310 \times 10^6}{3} = \left[ \frac{103.963}{\pi(d^3)} - \frac{146.565 \cos(20^\circ)}{\pi d^2} \right]$$

por prueba y error:

$$d = 9.97 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$d = 9.97 \text{ mm}$$

Analizando el punto 2 donde el péndulo alcanza su máxima velocidad (4m/s). La barra del péndulo estará sometida a carga axial de tensión causada por el peso del péndulo y la fuerza centrífuga. Además, se considera que al momento del impacto, el centro de masa no coincidirá con el punto de choque en las direcciones radial y normal al plano de la trayectoria descrita por el péndulo, se producirán esfuerzos de flexión y torsión respectivamente.

Determinación de la Fuerza de Impacto:

En un gráfico hipotético fuerza vrs deformación ( $F \times \delta$ ) característica de un acero, el área bajo la curva representa la tenacidad de el a la fractura. Para impacto se utiliza este método de energía así<sup>11</sup>:

---

<sup>11</sup> Referencia 21, pag. 472

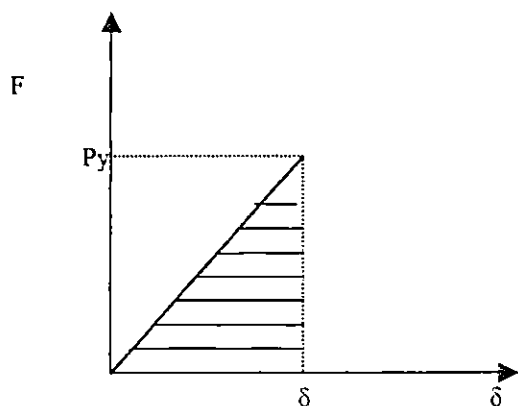


Gráfico 3.1 Fuerza – Deformación en el rango elástico

Donde:

$$U = P \delta / 2 \quad (\text{Ec 3.6})$$

Siendo:

- U : La resiliencia del acero
- P : La carga máxima
- δ : Deflexión del material (flexión)

Para flexión de una viga simplemente apoyada el valor de δ se obtiene de :

$$\delta = \frac{P \times l^3}{48 \times E \times I} \quad (\text{Ec 3.7})$$

siendo:

- l : Longitud del claro, 0.04 m
- E : Módulo de elasticidad,  $207 \times 10^9$  Pa
- I : Momento de inercia de la probeta,  $4.166 \times 10^{-10} \text{ m}^4$

Sustituyendo en 3.6:

$$U = \frac{P \left( \frac{P \times l^3}{48 \times E \times I} \right)}{2}$$



$$U = \frac{P^2 \times l^3}{96 \times E \times I} \quad (\text{Ec 3.8})$$

La energía que absorbe una probeta de 5x10x55 mm hecha de un acero de bajo carbono y resistencia menor a 400 MPa, es de 70 Joules.

Sustituyendo valores en la ecuación 3.8 y resolviendo para P:

$$P = \sqrt{\frac{(70)(207 \times 10^9)(4.166 \times 10^{-10})}{(0.04)^3}}$$

$$P = 93533.95 \text{ N}$$

La cual representa la fuerza de impacto teórica, ya que la que se tendría realmente es mucho menor debido que la probeta posee un concentrador de esfuerzo. El valor  $K_t$  para la configuración de la probeta y el tipo de carga a la que está sometida es según la figura del anexo 3, es:

$$K_t = 3.1$$

De ecuación de esfuerzo relacionando con el valor  $K_t$

$$\sigma_{\max} = K_t \sigma_{\text{nom}}$$

$$\frac{P_{\max} \times L \times c}{2 \times I} = K_t \frac{P \times L \times c}{2 \times I}$$

$$P = \frac{P_{\max}}{K_t}$$

$$P = \frac{93534}{3.1}$$

$$P = 30172.3 \text{ N}$$

Con esta fuerza y con un valor de  $\pm 5$  mm como error de posición entre el centro de masa del péndulo y el punto del impacto se procederá a encontrar el momento flector sobre la barra del péndulo. Se tendrá mayor momento de flexión cuando el punto de impacto esta a 5 mm alejado del centro de masa, tomando como referencia el centro de giro. La figura siguiente muestra el diagrama de cuerpo libre del péndulo.

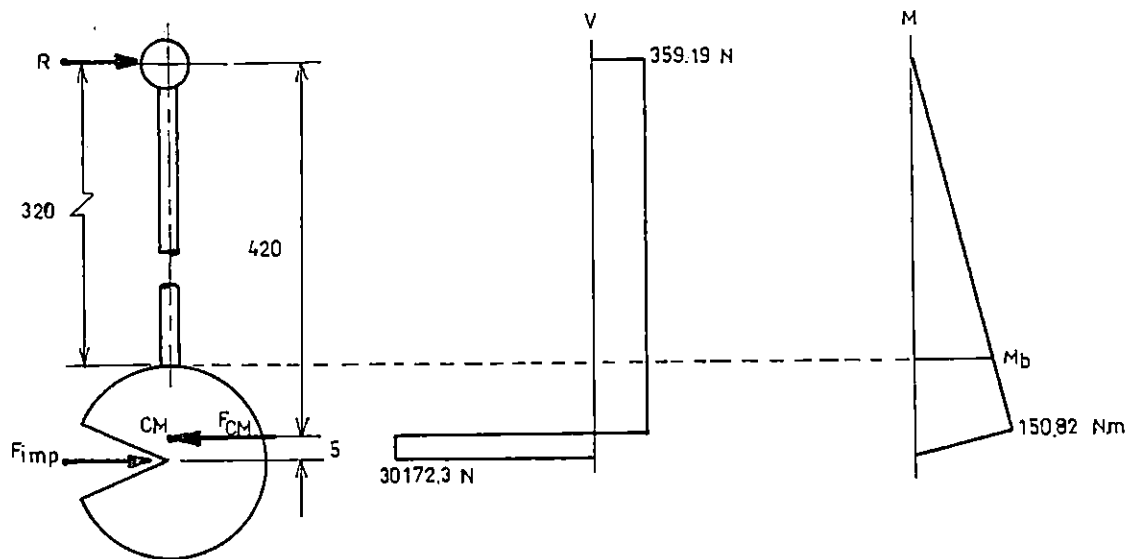


Figura 3.4 Diagrama de cuerpo libre, cortante y momento flector del péndulo

Efectuando momento alrededor del centro de masa:

$$+ \Sigma M = 0$$

$$R(420) - F_{imp}(5) = 0$$

$$R = \frac{5(F_{imp})}{420}$$

$$R = \frac{5(30172.3)}{420}$$

$$R = 359.19 \text{ N}$$

Al hacer sumatoria de fuerzas:

$$F_{CM} = F_{imp} + R$$

$$F_{CM} = 30531.49 \text{ N}$$

Los momentos se determinan por el método de las áreas del diagrama de cortantes. Debido a que el momento máximo se da dentro de la masa del péndulo, se determinará por relación de triángulo el momento máximo sobre la barra, donde la distancia a la que se calculará se tomará arbitrariamente.

$$\frac{M_b}{320} = \frac{150.82}{420}$$

$$M_b = 114.94 \text{ N.m}$$

El esfuerzo máximo de tensión en la barra del péndulo se dará en la fibra externa al borde de la masa del péndulo; el cual es la suma de efectos de flexión, peso del péndulo y fuerza centrífuga.

$$\sigma = \frac{W + F_c}{A} + \frac{M_b c}{I}$$

$$\sigma = \frac{W + \frac{mv^2}{R}}{A} + \frac{M_b c}{I} \quad (\text{Ec 3.9})$$

para barra de sección transversal circular:

$$A = \pi d^2/4$$

$$I = \pi d^4/64$$

$$C = d/2$$

Sustituyendo las ecuaciones anteriores en 3.9

$$\sigma = \frac{4W}{\pi d^2} + \frac{4mv^2}{\pi d^2 R} + \frac{32M_b}{\pi d^3} \quad (\text{Ec 3.10})$$

Esfuerzo de Torsión:

Considerando que el error de posición es de  $\pm 5\text{mm}$  entre el centro de masa y el punto de choque en la dirección normal al plano descrito por el movimiento del péndulo.

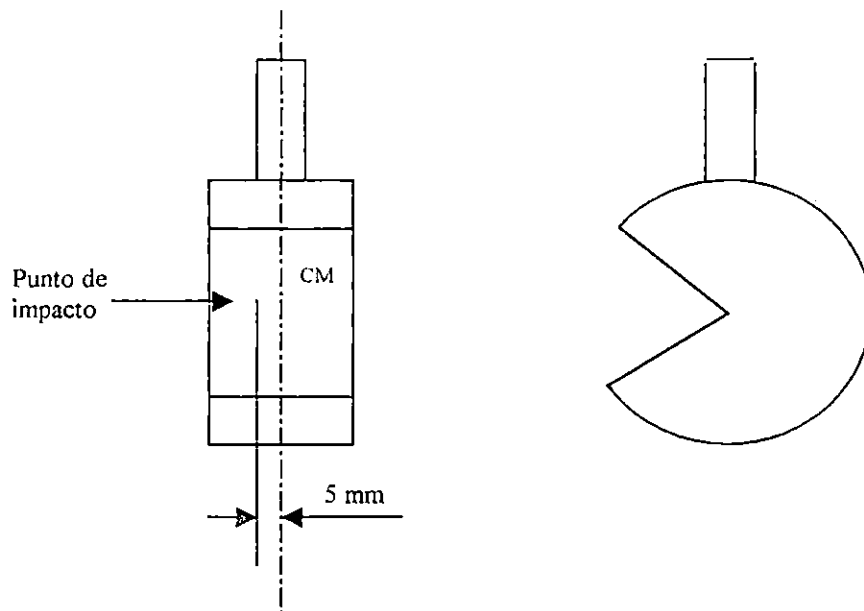


Figura 3.5 Desalineamiento del centro de masa respecto al punto de impacto.

El tórsor en la barra del péndulo será:

$$T = F_{\text{imp}} (r) \quad (\text{Ec 3.11})$$

Donde:

R : Distancia entre el centro de masa y el punto de impacto ( $r = 0.005 \text{ m}$ )

$$T = (30172.3) (0.005)$$

$$T = 150.86 \text{ N.m}$$

Este tórsor producirá un esfuerzo de torsión en la barra del péndulo, el cual, para una barra de sección circular se calcula:

$$\tau = Tr / J \quad (\text{Ec 3.12})$$

donde:

$$r = d/2$$

$$J = \pi d^4 / 32$$

Sustituyendo en ecuación 3.12

$$\tau = \frac{T(d/2)}{\frac{\pi d^4}{32}}$$

$$\tau = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (\text{Ec 3.13})$$

La barra está sometida a esfuerzos combinados de tensión, flexión y torsión, lo que hace necesario diseñar el elemento basado en un esfuerzo equivalente, según el criterio de Von Mises.

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (\text{Ec 3.14})$$

se producirá falla cuando  $\sigma_{\text{eq}} = S_y$ , en el cual si se considera un factor de seguridad de  $n = 2.0$  (de anexo 2).

$$\sigma_{\text{eq}} = S_y/2$$

la ecuación 3.14 en función de  $S_y$  y  $n$  sería :

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \quad (\text{Ec 3.15})$$

sustituyendo las ecuaciones 3.10 y 3.13 en la anterior:

$$\frac{S_y}{n} = \sqrt{\left(\frac{4W}{\pi d^2} + \frac{4mv^2}{\pi d^2 R} + \frac{32M_b}{\pi d^3}\right)^2 + 3\left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2} \quad (\text{Ec 3.16})$$

donde:

$$S_y = 310 \text{ MPa (AISI 1045 Templado y revenido, de anexo 1)}$$

$$W = 122.5 \text{ N}$$

$$m = 12.5 \text{ kg}$$

$$v = 4 \text{ m/s}$$

$$M_b = 114.94 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$T = 150.86 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$R = 0.42 \text{ m}$$

Resolviendo para el diámetro la ecuación 3.16, tendremos:

$$d = 2.257 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$d = 22.577 \text{ mm}$$

El diámetro a utilizar indudablemente es el anterior, el cual se redondeará a 22.6 mm.

### 3.2.4 Diseño del Percutor

El percutor es la parte del péndulo que impacta con la probeta al momento del ensayo. Siendo que al momento del impacto los esfuerzos producidos sobre las superficies en contacto son grandes, el percutor deberá cumplir con alguna característica que son:

- ✓ Alta dureza en la superficie de contacto (para evitar la deformación o achatamiento de la punta).
- ✓ Alta resistencia al choque (buena tenacidad).

Las dimensiones de la punta del percutor están establecidas por la ASTM E23, lo que permite seleccionar el material y además diseñar la forma de sujeción del péndulo.

El claro existente entre los soportes de la probeta es de 40 mm; siendo esta dimensión una restricción al ancho del percutor el cual debe pasar por este claro, indudablemente, libremente al efectuar un ensayo. Si se ensaya un acero bastante dúctil, se supondrá que la probeta se deforma de tal manera que toma la forma de la cuchilla, teniendo un ancho total de la cuchilla más la alcanzada por el espesor

de la probeta. El ancho total no debe sobrepasar el claro entre los apoyos de 40 mm.

La figura 3.6 muestra la configuración de la punta del percutor:

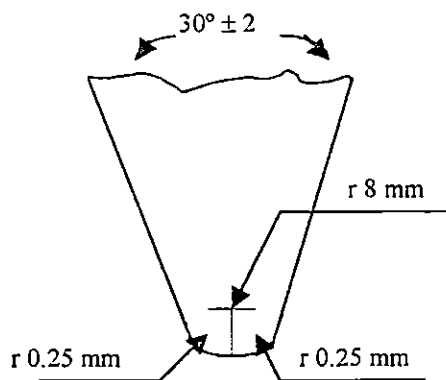


Figura 3.6 Sección transversal de la cuchilla

Ya que el ancho de la cuchilla puede variar de acuerdo al ángulo de  $30^\circ \pm 2^\circ$ , se tomará como referencia el límite superior ( $32^\circ$ ). De la figura 3.7 y usando trigonometría.

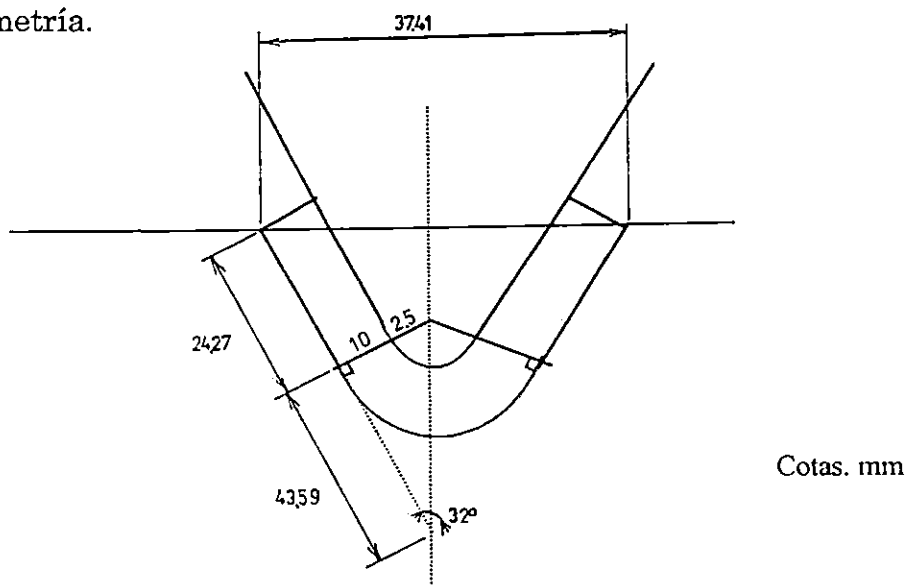


Figura 3.7 Deformación ideal plástica de la probeta a la fuerza de impacto

El ancho total es de 37.41 mm, habiendo una diferencia de 2.59 mm respecto al claro de los apoyos, siendo esta medida bastante aceptable.

A continuación se procederá a seleccionar el material para fabricar la cuchilla, utilizando la teoría de contacto de Hertz. La presión máxima de contacto es<sup>12</sup>

$$P_{\max} = \frac{2 \times F}{\pi \times b \times l} \quad (\text{Ec 3.17})$$

donde:

F: La fuerza de contacto (30172.3 N)

l: Longitud del área de contacto (5mm)

b: Ancho del área de contacto

El área de contacto entre la cuchilla y la probeta tendrá la figura geométrica de un segmento de cilindro por efecto de la deflexión que experimenta la probeta.

$$b = r\theta$$

$$b = 2.5 (2.583 \text{ rad})$$

$$b = 6.46 \text{ mm}$$

$$b = 0.00646 \text{ m}$$

sustituyendo datos en la ecuación 3.17

$$P_{\max} = \frac{2(30172.3)}{\pi(0.00646)(5 \times 10^{-3})}$$

$$P_{\max} = 594.68 \times 10^6 \text{ Pa}$$

$$P_{\max} = 594.68 \text{ MPa}$$

Si consideramos un factor de seguridad de 1.5 (de anexo 2):

$$P_{\max} (n) = S_y = 892.02 \text{ MPa.}$$

---

<sup>12</sup> Referancia 19, pág. 81



Por lo que se necesitará en acero con resistencia de fluencia mínima de 892.02 MPa y una dureza mínima de 45 HRC. Un acero que cumple satisfactoriamente estos requisitos es según anexo 1, el acero AISI D-2.

### 3.2.5 Diseño de los Tornillos Sujetadores de la Barra del Péndulo a la Masa

Las fuerzas que soportarán estos elementos serán la fuerza centrífuga de la masa en rotación y el peso de la misma. La forma de cómo están localizados los pernos se visualiza en la figura 3.8.

El objeto del diseño es seleccionar los tornillos de acuerdo con parámetros seleccionados arbitrariamente como: la dimensión de los tornillos, material de la placa sujetadora, espesor de la placa y cantidad de tornillos (2).

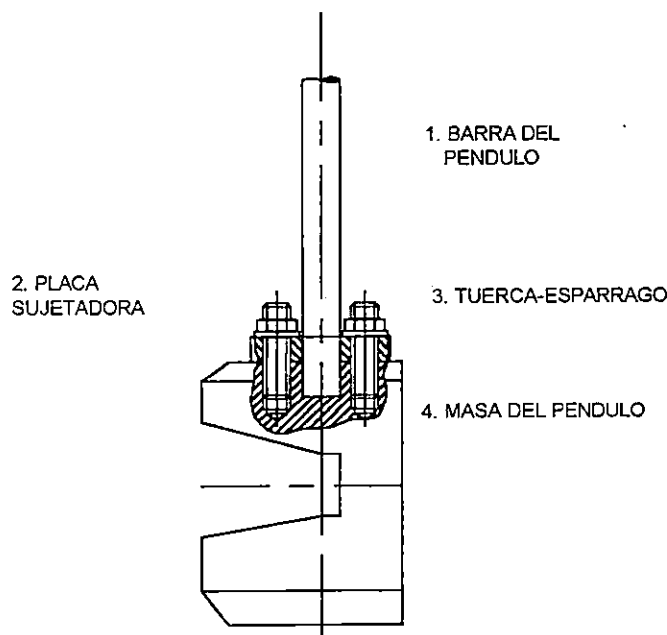


Figura 3.8 Representación de la instalación de los pernos.

A continuación se procederá a determinar la fuerza neta sobre cada uno de los tornillos:

$$P = \frac{W + F_c}{N_t} \quad (\text{Ec 3.18})$$

donde:

P = fuerza neta

$F_c$  = Fuerza centrífuga

W = Peso del péndulo

$N_t$  = Número de tornillos

La fuerza centrífuga se determina por:

$$F_c = \frac{mv^2}{r} \quad (\text{Ec 3.19})$$

donde:

$m = 12.5 \text{ kg}$

$v = 4 \text{ m/s}$

$r = 0.42 \text{ m}$

Sustituyendo en ecuación 3.18

$$F_c = \frac{12.5 \times (4)^2}{0.42}$$

$$F_c = 476.19 \text{ N}$$

A esta fuerza se le sumaría el peso del péndulo por lo tanto:

$$W = 12.5 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$W = 122.5 \text{ N}$$

Si utilizamos 2 tornillos para sostener la masa del péndulo; la fuerza sobre cada uno de ellos será:

$$P = \frac{122.5 \text{ N} + 476.19 \text{ N}}{2}$$

$$P = 299.35 \text{ N}$$

Al momento de montar los elementos del péndulo, los tornillos se apretarán con una fuerza inicial, la cual está determinada por la ecuación<sup>13</sup>:

$$F_i = 0.64 A_t S_y \text{ (para conexiones reutilizables)} \quad (\text{Ec 3.20})$$

De acuerdo a las configuraciones geométricas del péndulo se seleccionarán tornillos de 12 mm (M12, de anexo 4), a los cuales se les determinará su constante de rigidez ( $K_b$ ).

$$K_b = \frac{A_t E}{l} \quad (\text{Ec 3.21})$$

donde:

$K_b$  : Constante de rigidez de los tornillos

$A_t$  : Área de tensión del tornillo ( $84.3 \text{ mm}^2$ )

$L$  : longitud de agarre (18 mm)

$E$  : módulo de elasticidad ( $207 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ )

Por lo tanto:

$$K_b = \frac{(84.3)(207 \times 10^3)}{18} \left[ \frac{\text{mm}^2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{\text{mm}} \right]$$

$$K_b = 969.45 \text{ kN/mm}$$

$$K_b = 969.45 \times 10^6 \text{ N/m}$$

<sup>13</sup> Referencia 19, pág. 395

También es necesario calcular la constante de rigidez de la placa sujetadora. La ecuación para la constante de rigidez ( $K_m$ ) de la placa es:

$$K_m = \frac{0.577(\pi)(E)(d)}{(2) \ln \left( 5 \frac{0.577l + 0.5d}{0.577l + 2.5d} \right)} \quad (\text{Ec 3.22})$$

donde:

- $K_m$  : constante de rigidez de la placa
- $d$  : Diámetro del tornillo (12 mm)
- $l$  : Longitud de agarre ( 18 mm)

sustituyendo en ecuación 3.22, se tiene:

$$K_m = \frac{0.577(\pi)(207 \times 10^9)(0.012)}{(2) \ln \left( 5 \frac{0.577(0.018) + 0.5(0.012)}{0.577(0.018) + 2.5(0.012)} \right)}$$

$$K_m = 3.1827 \times 10^9 \text{ N/m}$$

Si se utiliza un factor de carga  $n = 4$  para los tornillos se procederá a calcular la resistencia mínima deseable en los tornillos. Se utilizará la ecuación siguiente:

$$S_p = \frac{\left( \frac{K_b}{K_b + K_m} \right)^n P}{A_t} + \frac{F_i}{A_t} \quad (\text{Ec 3.23})$$

donde:

- $P$  = 299.35 N
- $n$  = 4
- $A_t$  =  $84.3 \times 10^{-6} \text{ mm}^2$
- $K_b$  =  $969.45 \times 10^6 \text{ N/m}$
- $K_m$  =  $3.1827 \times 10^9 \text{ N/m}$
- $S_p$  =  $0.85 S_y$

Si sustituimos la ecuación 3.20 y los datos anteriores en ecuación 3.23:

$$0.85 S_y = \frac{\left( \frac{969.45 \times 10^6}{969.45 \times 10^6 + 3.1827 \times 10^9} \right) (4)(299.35)}{84.3 \times 10^{-6}} + \frac{0.64(At)(S_y)}{At}$$

$$S_y = 15.79 \times 10^6 \text{ Pa}$$

La resistencia de fluencia necesaria en el material de los tornillos es pequeña, se utilizará el grado menor pues cumplirá satisfactoriamente su trabajo.

Se seleccionaran dos tornillos con las características siguientes de anexo 4:

M12 X 1.75

Clase 4.6

$S_p = 240 \text{ MPa}$

### 3.2.6 Diseño del Eje del Péndulo

Las fuerzas que soportará este elemento serán las fuerzas centrífugas, el peso del elemento y una fracción de la fuerza de impacto debida al desalineamiento del centro de masa del péndulo.

Con las fuerzas anteriores y con un desalineamiento  $\pm 5 \text{ mm}$  del centro de masa, encontraremos el diámetro mínimo del eje y asumiendo una longitud de 190 mm (0.19 m) y un material AISI 1045 con esfuerzo de fluencia de  $S_y = 310 \text{ MPa}$  (ver anexo 1) determinaremos dicho diámetro.

De figura 3.3 tenemos :

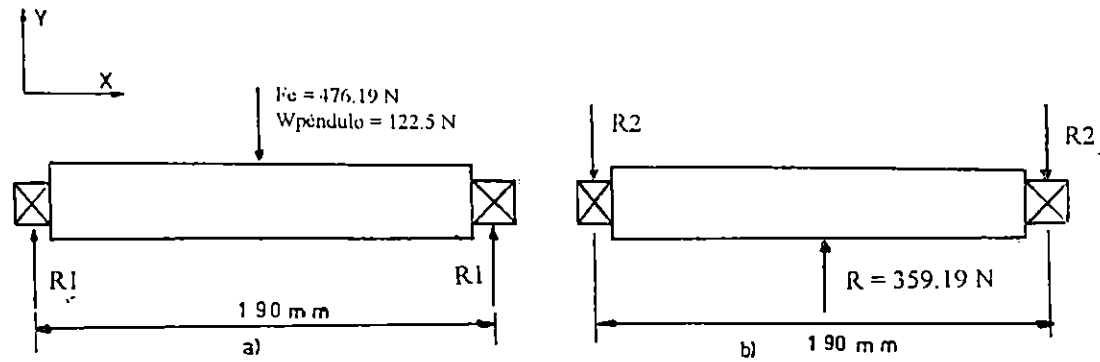


Figura 3.9 : Eje del péndulo a) Vista de frente b) Vista de planta

Si analizamos la situación del eje para condición tenemos:

Diagrama (a).

$$\Sigma F = 0$$

$$2R_1 - F_c - W_p = 0$$

$$R_1 = \frac{F_c + W_p}{2}$$

$$R_1 = \frac{476.19 + 122.5}{2}$$

$$R_1 = 299.35 \text{ N}$$

Calculando el momento máximo por medio del diagrama de cortante de anexo 6 para apoyos simples y carga en el centro tenemos:

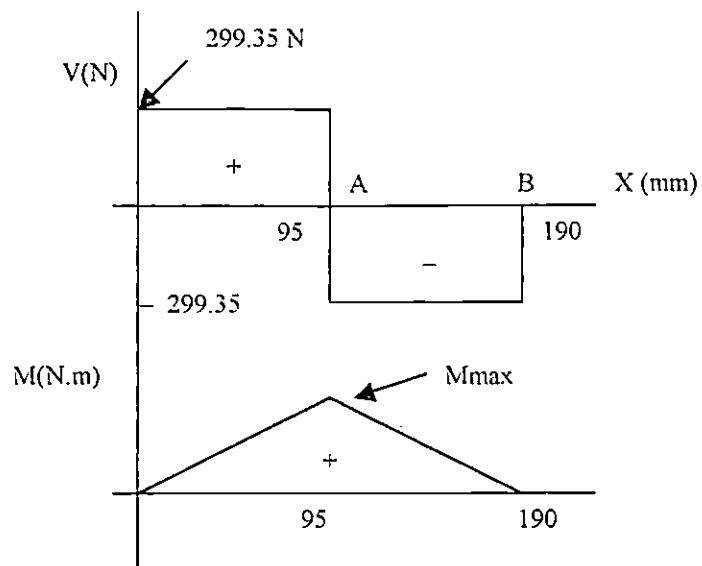


Gráfico 3.2 : Diagrama de cortante y momento flexionante

Tenemos:

$$\text{Cortante} = V_{OA} = R_1 = 299.35\text{ N}$$

El momento máximo por el método de las áreas:

$$\begin{aligned} M_{max} &= (V_{OA}) (L/2) \\ &= (299.35\text{ N}) (0.19/2\text{ m}) \\ &= 28.44\text{ N.m} \end{aligned}$$

Diagrama (b):

$$\Sigma F = 0$$

$$2 R_2 - R = 0$$

$$R_2 = R / 2$$

$$R_2 = 359.19\text{ N} / 2$$

$$R_2 = 179.6\text{ N}$$

Calculando el momento máximo por medio del diagrama de cortante de anexo 5 para apoyos y carga en el centro tenemos:

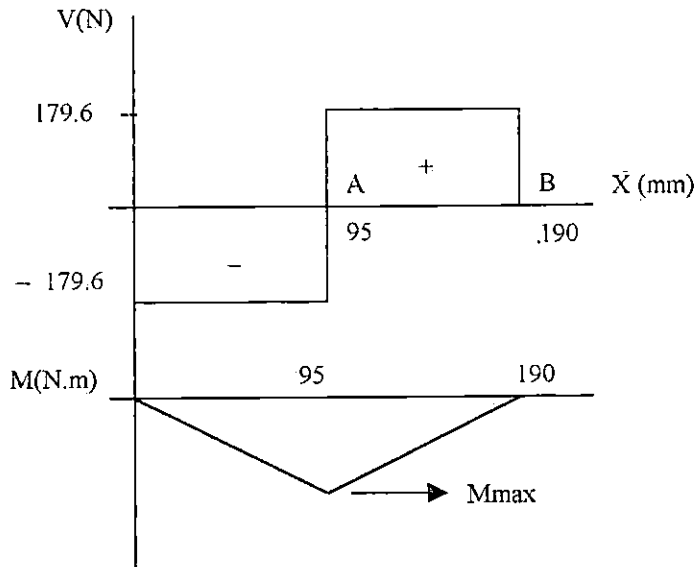


Gráfico 3.3 : Diagrama de cortante y momento flexionante

Tenemos:

$$\text{Cortante} = V_{OA} = R_2 = 179.6 \text{ N}$$

Momento máximo por el método de las áreas

$$\begin{aligned} M_{\max} &= (V_{OA}) (L/2) \\ &= (179.6 \text{ N})(0.19/2 \text{ m}) \end{aligned}$$

$$M_{\max} = 16.77 \text{ N.m}$$

De la gráficos 3.2 y 3.3 encontraremos el cortante máximo y momento máximo debido a las dos condiciones:

$$V_{\max \text{ Total}} = [V_{(a)}^2 + V_{(b)}^2]^{1/2} = [(299.35 \text{ N})^2 + (179.6 \text{ N})^2]^{1/2}$$

$$V_{\max \text{ Total}} = 349.04 \text{ N}$$



$$M_{\max \text{ Total}} = \left[ M_{\max(a)}^2 + M_{\max(b)}^2 \right]^{1/2} = \left[ (28.44 \text{ N}\cdot\text{m})^2 + (16.77 \text{ N}\cdot\text{m})^2 \right]^{1/2}$$

$$M_{\max \text{ Total}} = 33.02 \text{ N}\cdot\text{m}$$

Como la barra se encuentra sometida a esfuerzos combinados de flexión y cortante, lo que hace necesario diseñar el elemento basado en los esfuerzos equivalentes tanto normales como cortantes y posteriormente diseñar en base al esfuerzo normal máximo y el esfuerzo cortante máximo:

El esfuerzo equivalente es:

$$\sigma = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec 3.24})$$

$$\sigma = \frac{\sigma_x}{2} \pm \sqrt{\left( \frac{\sigma_x}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Utilizando un factor de seguridad de 4; para fluencia:

$$n = S_y / \sigma$$

Y a la vez sustituyendo la ecuación anterior en ecuación 3.24:

$$\frac{S_y}{4} = \frac{Mc}{2I} \pm \sqrt{\left( \frac{Mc}{2I} \right)^2 + \frac{V}{A}}$$

$$\frac{S_y}{4} = \frac{(33.02)(d/2)}{2\left(\frac{\pi}{64}d^4\right)} \pm \sqrt{\left[ \frac{(33.02)(d/2)}{2\left(\frac{\pi}{64}d^4\right)} \right]^2 + \left( \frac{349.09}{\frac{\pi}{4}d^2} \right)^2}$$

$$\frac{S_y}{4} = \frac{168.17}{d^3} \pm \sqrt{\left( \frac{168.17}{d^3} \right)^2 + \left( \frac{444.47}{d^2} \right)^2}$$

Utilizando un acero 1045 con  $S_y = 310 \text{ MPa}$

$$\frac{310 \times 10^6}{4} = \frac{168.17}{d^3} \pm \sqrt{\left( \frac{168.17}{d^3} \right)^2 + \left( \frac{444.47}{d^2} \right)^2}$$

Resolviendo:

$$d = 16.32 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 16.32 \text{ mm}$$

Resolviendo por cortante máximo tenemos:

$$\tau = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (\text{Ec 3.25})$$

$$\tau = \frac{S_{sy}}{n} = \sqrt{\left(\frac{168.17}{d^3}\right)^2 + \left(\frac{444.47}{d^2}\right)^2}$$

$$\tau = \frac{S_y}{2n} = \sqrt{\left(\frac{168.17}{d^3}\right)^2 + \left(\frac{444.47}{d^2}\right)^2}$$

$$\tau = \frac{310 \times 10^6}{(2)(4)} = \sqrt{\left(\frac{168.17}{d^3}\right)^2 + \left(\frac{444.47}{d^2}\right)^2}$$

Resolviendo:

$$d = 0.01632 \text{ m} \approx 16.3 \text{ mm}$$

Por cuestiones de diseño asumiremos un diámetro de 24 mm, el cual es más fácil trabajarlo en el torno y a la vez disminuir la deflexión vertical de dicho elemento debido a las cargas que actúan en él. A continuación determinaremos la deflexión vertical producida por la fuerza centrífuga y el peso del péndulo.

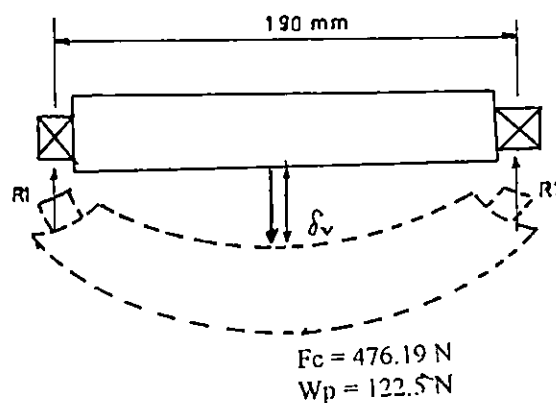


Figura 3.10 Máxima deflexión en el eje del péndulo.

De anexo 6 tenemos:

$$\delta_v = \frac{F \times L^3}{48 \times E \times I} \quad (\text{Ec 3.26})$$

donde:

F: Fuerza Resultante (476.19 N + 122.5 N)

L : Longitud (0.19 m)

d : Diámetro del eje (0.024 m)

E : Modulo de Young (207 Gpa)

I : Momento de Inercia ( $\pi d^4/64$ )

Resolviendo:

$$\delta_v = \frac{(476.19 + 122.5)(0.19)^2}{(48)(207 \times 10^9) \left( \frac{\pi}{64} d^4 \right)}$$

$$\delta_v = \frac{4.11}{(4.88 \times 10^{11})(0.024)^4}$$

$$\delta_v = \frac{4.11}{(161.82 \times 10^3)}$$

$$\delta_v = 0.0254 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 0.025 \text{ mm}$$

De esto concluimos que con el valor de diámetro requerido (24mm), disminuimos la deflexión vertical a un 0.025 mm, con lo cual aseguramos que no se producirá una gran deflexión al momento en que se produzca el choque del péndulo contra la probeta.

### 3.2.7 Ubicación del Centroide

La tabla 3.1 es un resumen del centroide de cada elemento que compone el péndulo, dando por resultado las coordenadas del centroide de todo el conjunto. Los cálculos del centroide de cada uno de los elementos se encuentra detallado en el anexo 12.

### 3.2.8 Selección de Rodamientos de la Máquina

En la máquina el tipo de carga primordial será la carga radial, por lo que es necesario seleccionar un rodamiento que sea capaz de soportar esta carga.

Generalmente los rodamientos de bolas se pueden someter a carga radial y de empuje. Por lo que estos cumplen satisfactoriamente con el tipo de carga que en la máquina se estará produciendo.

Para seleccionar el rodamiento se analizará para carga estática y se contará con el catálogo para rodamientos de la FAG.

#### 3.2.8.1 Selección del Rodamiento

Cada tipo de rodamiento tiene propiedades y características que lo hacen particularmente adecuado para ciertas aplicaciones. El tamaño del rodamiento para una determinada aplicación se selecciona con base a su capacidad de carga respecto a las cargas que ha de soportar y a los requisitos sobre duración y fiabilidad. Se seleccionarán dos rodamientos de bolas auto – alineantes, por algún desalineamiento que se produzca en el eje del péndulo.

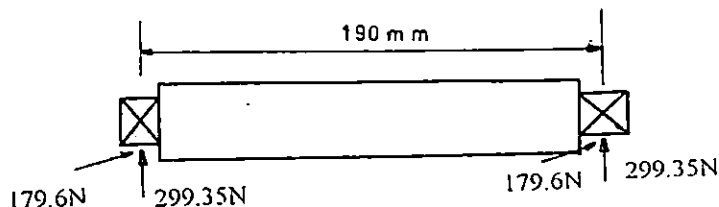


Figura 3.11. Distribución de las fuerzas que actúan en los rodamientos

Determinando la fuerza resultante que actúa en cada uno de los rodamientos.

$$|\vec{R}| = \sqrt{(299.35\text{N})^2 + (179.6\text{N})^2}$$

$$|\vec{R}| = 349.1\text{N}$$

Como los rodamientos solo soportan carga radial determinaremos la carga radial estática equivalente (KN):

$$F_e = V \left| \vec{R} \right|$$

Donde:

$V = 1.0$  Si la pista interna del rodamiento gira

$V = 1.2$  Si la pista externa del rodamiento gira

Para nuestro caso los rodamientos auto – alineantes son una excepción; tienen  $v=1.0$  para la rotación de uno u otros aros.

$$F_e = (1.0)(349.1\text{N})$$

$$F_e = 349.1 \text{ N}$$

Determinando la capacidad de carga estática por medio de la ecuación:

$$C_o = f_s F_e$$

Donde:

$f_s = 1.5 - 2.5$  para exigencias elevadas

$f_s = 1 - 1.5$  para exigencias normales

$f_s = 0.7 - 1$  Para exigencias reducidas

Para nuestro caso  $f_s = 2.5$

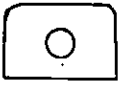
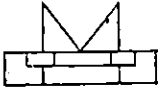

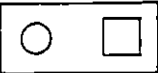

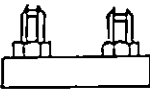


$$C_o = (2.5) (349.1 \text{ N})$$

$$C_o = 872.8 \text{ N}$$

Con  $C_o = 878.8 \text{ N}$  y diámetro del eje (24mm) a anexo 7 seleccionaremos el rodamiento adecuado.

Denominación	1204
Diámetro interno	20 mm
Diámetro externo	47 mm
Carga Estática	325 Kgf (3185 N)
Espesor del Rodamiento	14 mm
Cantidad	2

Tabla 1 Resumen del centroide de cada elemento que compone el péndulo

Figura	V (mm <sup>3</sup> )	Y (mm)	YV (mm <sup>4</sup> )	x (mm)	xV (mm <sup>4</sup> )
	-12008.68	1.61	-19333.974	0.0	0.0
	29052.562	28.86	838507.76	0.0	0.0
	53218.704	105	5587963.92	0.0	0.0
	29533.0	167.5	4946777.5	18.147	535950.0
	62339.251	243.9	15204543.4	0.0	0.0
	83120.27	319.31	26541133.41	0.0	0.0
	14320.2	422.5	6050284.5	16.175	231629.24
	1341731.88	457.17	613399143.3	-0.572	-767470.65
$\Sigma V$	1601307.19	$\Sigma yV$	672549019.8	$\Sigma xV$	0.0

### 3.3 DISEÑO DEL CUERPO DE LA MAQUINA

El cuerpo de la máquina es la estructura de mayor dimensión, debido a que en ella se alojan todos los elementos que necesitamos para su funcionamiento. Este debe ser robusto para soportar todos los esfuerzos que se generen en el ensayo, garantizando con ello que no fallará el material de construcción del mismo.

Como se mencionó, el cuerpo de la máquina tiene la función de permitir el alojamiento de los demás elementos de la misma, como son:

- Mecanismos del péndulo
- Apoyos de la probeta
- Mecanismo de medición de energía absorbida, etc

Además el cuerpo de la máquina permite la fijación de la misma para mantenerla en un lugar y posición adecuada para realizar el ensayo de flexión por impacto. Evitando que se produzcan movimientos y vibraciones que modifiquen los resultados del ensayo.

#### 3.3.1 Dimensionamiento

Para tomar en cuenta la altura de la máquina hay que considerar, la longitud del péndulo, la altura del alojamiento del rodamiento tal como se aprecia en la figura 3.12:

Donde:

L : Altura del alojamiento del rodamiento

L<sub>1</sub>: Altura superior del alojamiento

L<sub>p</sub>: Longitud del péndulo [420 mm]

h : Altura de la masa principal del péndulo [262.8 mm]

h<sub>1</sub> : Altura inferior del péndulo [170.3 mm]

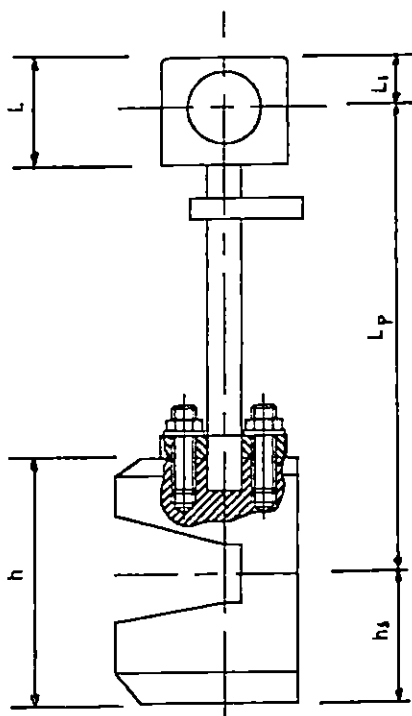


Figura 3.12. Determinación de la altura de la máquina de impacto

Para estimar la altura de la máquina es necesario primeramente diseñar el alojamiento de los rodamientos.

### 3.3.1.1 Dimensionamiento del Alojamiento de los Rodamientos

Debido a que este elemento no soportar grandes cargas producidas con la carga de impacto, no es necesario realizar algún análisis de esfuerzo, así que asumiremos las siguientes dimensiones:



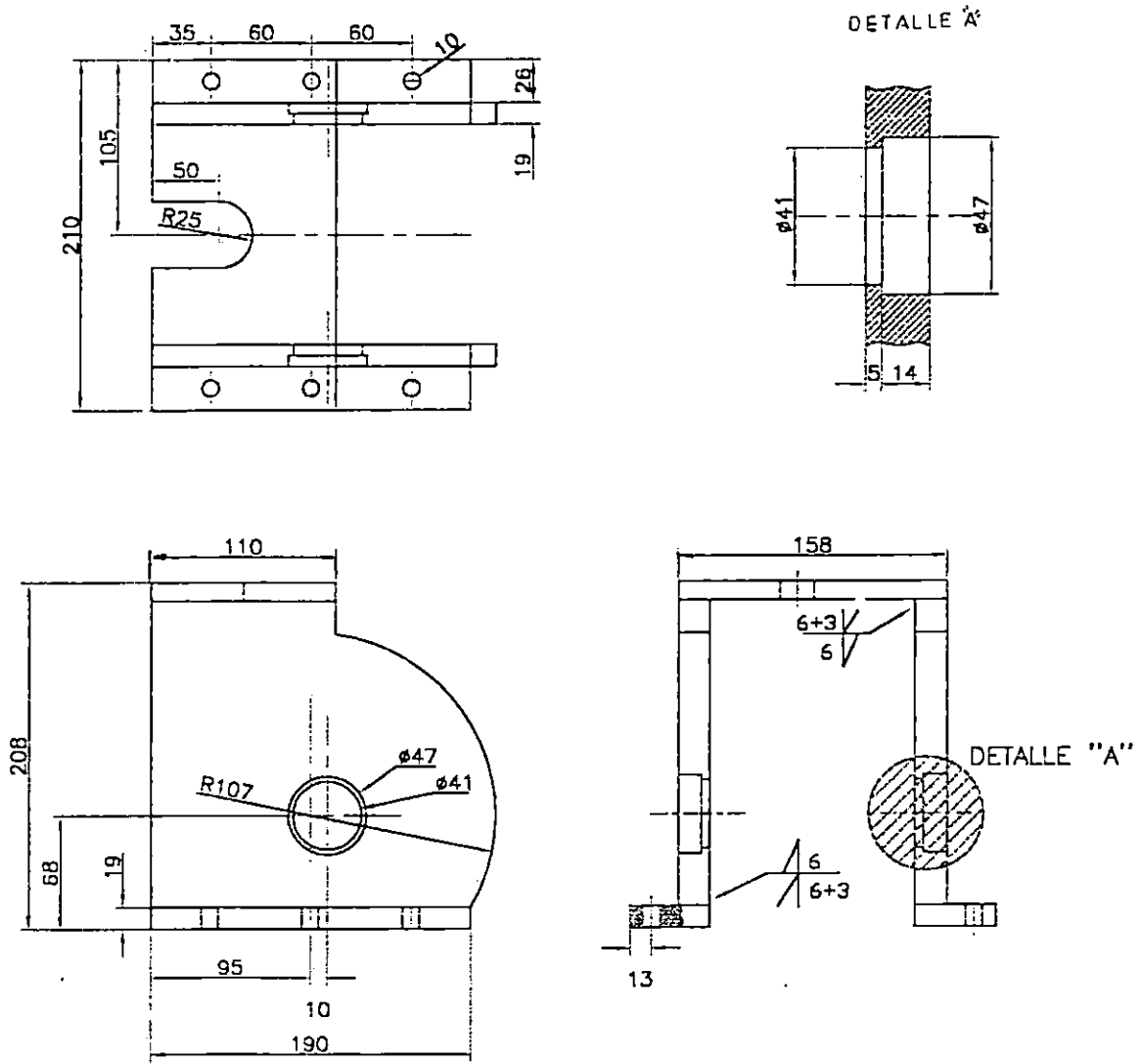


Figura 3.13 Dimensiones del alojamiento (mm)

### 3.3.1.2 Dimensionamiento del Cuerpo de la Máquina

De la figura 3.12; determinaremos la altura de la máquina:

$$\text{Altura de la máquina: } L_1 + L_p + h_1$$

Donde:

$$L_1 = 150 \text{ mm}$$

$$L_p = 420 \text{ mm}$$

$$h_1 = 170.3 \text{ mm}$$

Y sustituyendo encontramos que la altura aproximada de la máquina es:

$$\begin{aligned} \text{Altura de la máquina} &= 150 + 420 + 170.3 \\ &= 740.3 \text{ mm} \\ &= 741 \text{ mm} \end{aligned}$$

Con base al resultado anterior, construiremos la máquina de ensayo Charpy.

Además el cuerpo de la máquina constará con dos soportes los cuales soportarán los esfuerzos producidos por la carga de impacto y una base para evitar vibraciones, como la fijación de los mismos.

#### 3.3.1.2.1 Dimensionamiento de los Soportes de la Estructura

Como los soportes de la estructura no se encuentran sometidos a grandes esfuerzos producidos por la carga de impacto en comparación con la probeta, no es necesario realizar ningún análisis de esfuerzo; además por cuestiones de presentación y estabilidad recurriremos a las siguientes dimensiones:

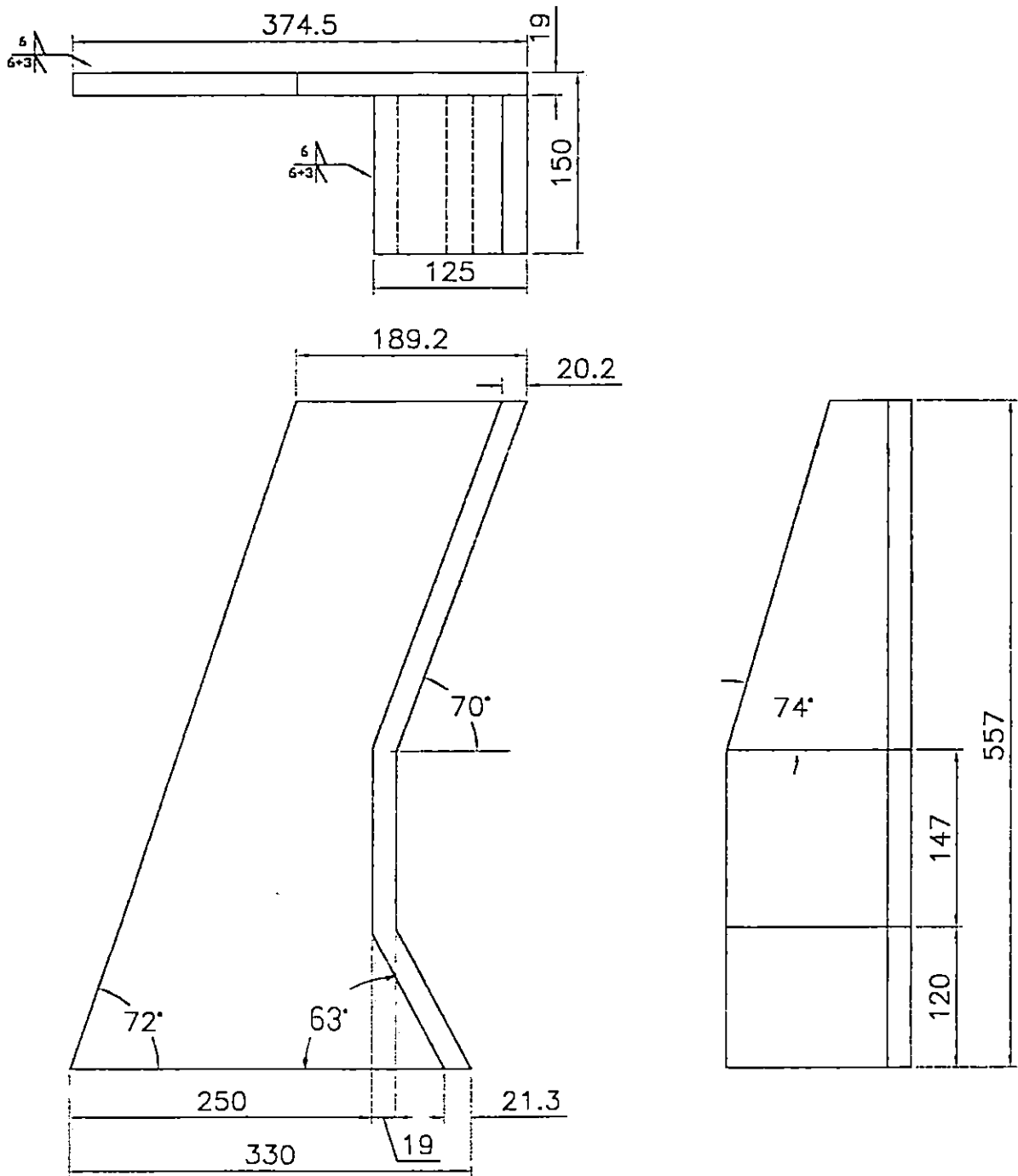
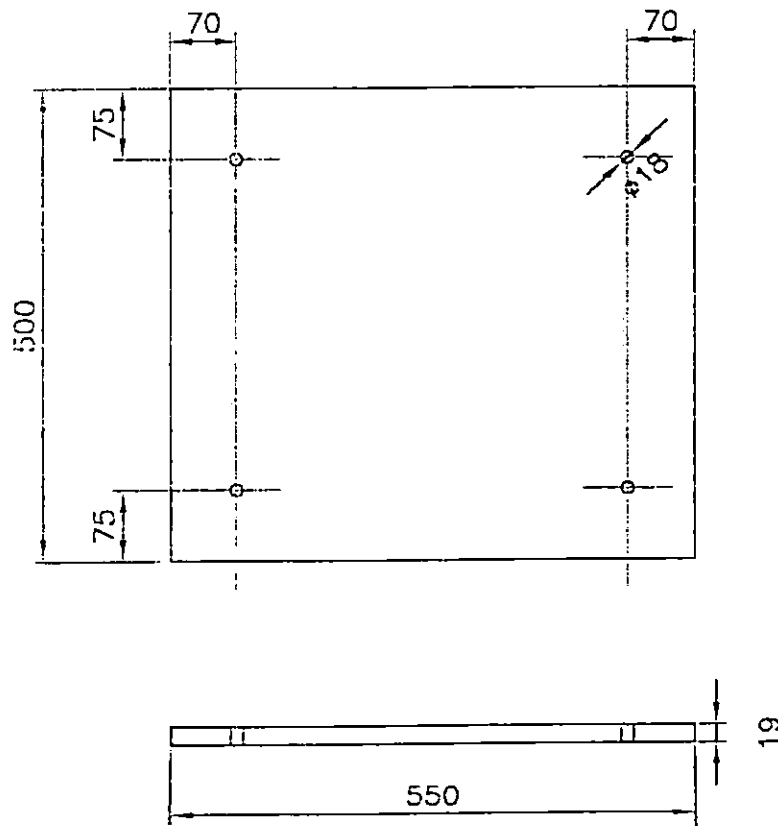


Figura 3.14 Dimensiones de los Soportes de la Estructura (mm)

### 3.3.1.2.2 Dimensionamiento de la Base de la Estructura de la Máquina

Debido a que su función es darle la fijación a los soportes de la estructura y a la vez estabilidad de la máquina de impacto, no es necesario realizar algún análisis de esfuerzos, así que asumiremos las siguientes dimensiones:



Cotas: mm

Figura 3.15 Dimensiones de la Base de la Estructura

### 3.3.2 Selección de Materiales

El material seleccionado para construir la estructura de la máquina, así como los alojamientos de los rodamientos será lámina ASTM – A 36, la cual soportará la distribución de esfuerzos producidos, debido a la carga de impacto transmitida por la probeta. Para seleccionar el material no recurrimos a ningún análisis de esfuerzo, ya que la relación de áreas transversales entre los soportes de la estructura y la probeta a ensayar es considerablemente grande, tal como se observa a continuación:

Área transversal de la probeta

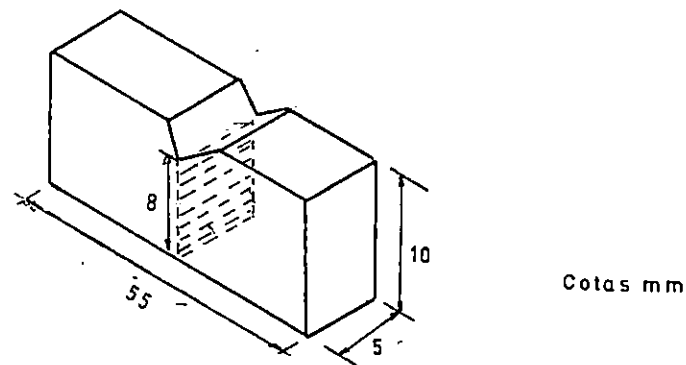


Figura 3.16 Área efectiva de la probeta al impacto

Área transversal 8 mm X 5 mm

$$= 40 \text{ mm}^2$$

$$= 40 \text{ mm}^2$$

Área transversal de un soporte de la estructura.

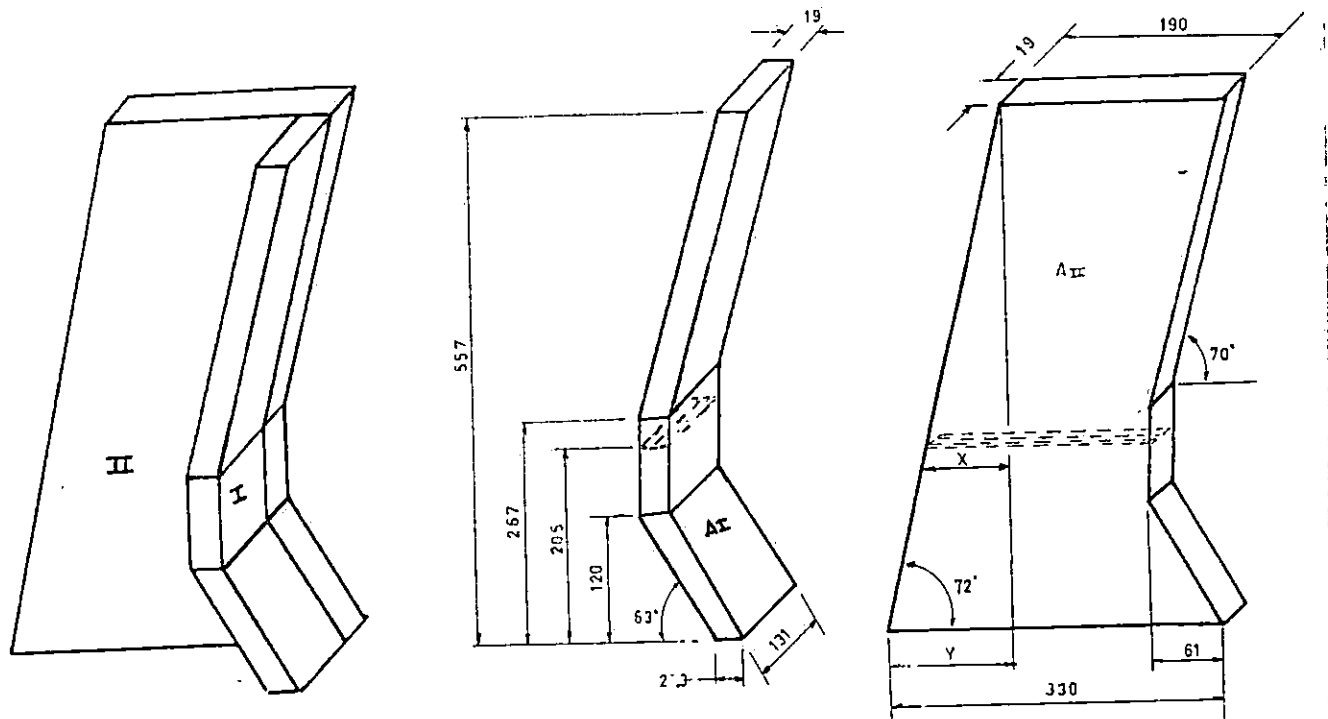


Figura 3.17 Área efectiva en el soporte de la estructura

Tomando en cuenta que el apoyo de probeta se encuentra a una altura de 205 mm.

Donde el área transversal es:

$$A_T = A_I + A_{II} + A_{III}$$

$$A_T = (131)(19) + (19)(84.45) + (X)(19)$$

Donde:

$$\text{Tg } 72 = 557 / Y$$

$$Y = 557 / \tan 72^\circ$$

$$Y = 180.98 \text{ mm}$$

Encontrando la longitud "x" por relación de triángulos y sustituyendo el valor de Y:

$$557 / Y = 352 / x$$

$$557 / 180.98 = 352 / x$$

$$x = 352 \times 180.98 / 557$$

$$x = 114.37 \text{ mm}$$

Encontrando el área transversal para un soporte de la estructura

$$A_T = (19)(131) + (19)(84.45) + (19)(114.37)$$

$$A_T = 6266.58 \text{ mm}^2$$

Debido a que son dos soportes el área transversal total es:

$$A_{\text{total}} = 2 A_T$$

$$A_{\text{total}} = (2)(6266.58)$$

$$A_{\text{total}} = 12533.16 \text{ mm}^2$$

Conociendo las áreas transversales, determinaremos la relación de áreas entre los soportes de la estructura y la probeta:

$$\frac{A_{\text{soportes}}}{A_{\text{probeta}}} = \frac{12533.16}{40}$$

$$\frac{A_{\text{soportes}}}{A_{\text{probeta}}} = 313.33$$

De esto concluimos que el área transversal de la probeta cabe exactamente 313.33 veces en el área transversal de los soportes de la estructura e implica que la probeta fallará antes de que se produzca la falla en los soportes, debido a su gran diferencia de áreas.

### 3.3.3 Forma de Fijación de la Estructura

Tanto los soportes como la base de la estructura deben ser fijadas a algún tipo de superficie, es por ello que los soportes se fijarán a la base por medio de soldadura, debido a su facilidad y económico que resulte y además la base se fijará por medio de 4 pernos a una fundición para darle la estabilidad y peso requerido por la norma ASTM – 23, la cual manifiesta que el peso de la estructura debe ser por lo menos 40 veces el peso del péndulo ( ver pág. 100), es decir:

$$40 \times 12.5 \text{ kg} = 500 \text{ kg}$$

#### 3.3.3.1. Fijación de los Soportes a la Base de la Estructura

Los soportes de la máquina se fijarán a la base por medio de soldadura eléctrica, debido a su fácil aplicación y bajo costo que resulta.

A continuación realizaremos el análisis de soldadura en todo el contorno del soporte, la cual se encuentra sometida a esfuerzos flexionantes y cortantes.



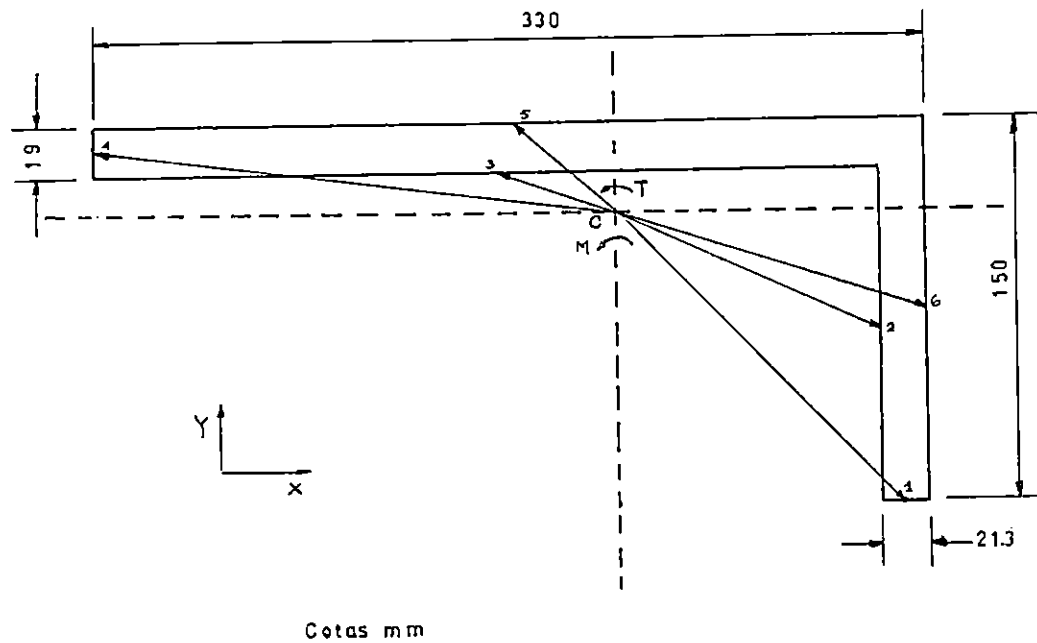


Figura 3.18 Dimensiones del cordón de soldadura en milímetros en la parte inferior (vista de planta de la parte inferior)

Como primer paso encontramos el centroide de cada línea de soldadura.

De anexo 8 , 9 y considerando una altura del filete de  $h = 6$  mm, tenemos:

Para cordón 1:

$$A = 0.707 hd = (0.707)(6)(21.3) = 90.35 \text{ mm}^2$$

$$J_u = I_u = d^3/12 = (21.3)^3 / 12 = 805.30 \text{ mm}^3$$

así sucesivamente para los demás cordones.

Cordón	A <sub>i</sub> (mm <sup>2</sup> )	X <sub>i</sub> (mm)	Y <sub>i</sub> (mm)	Σx <sub>i</sub> A <sub>i</sub> (mm <sup>2</sup> )	Σy <sub>i</sub> A <sub>i</sub> (mm <sup>2</sup> )	J <sub>u</sub> (mm <sup>3</sup> )
1	90.35	319.35	0	28853.27	0	805.3
2	555.70	308.70	65.5	171544.59	36398.35	187340.92
3	1309.51	154.35	131	202122.87	171545.81	2451481.63
4	80.60	0	146.5	0	11807.9	571.58
5	1399.86	165	150	230976.9	209979	2994750
6	636.31	330	75	209979	47722.5	281250
Σ	4072.32			843476.63	477453.56	

Tabla 3.2 Resumen del centroide de cada línea de soldadura

El centroide C del grupo de soldadura está situado en:

$$X_c = \frac{\sum X_i A_i}{\sum A_i} = \frac{843476.63}{4072.32} = 207.12 \text{ mm}$$

$$Y_c = \frac{\sum Y_i A_i}{\sum A_i} = \frac{477453.56}{4072.32} = 117.24 \text{ mm}$$

El esfuerzo cortante debido a la fuerza 15.07 kN, tiene por valor:

$$\tau' = \frac{V}{A} = \frac{15.07 \text{ kN}}{4072.32 \text{ mm}^2}$$

$$\tau' = 3.7 \text{ N/mm}^2$$

Aplicando ahora el teorema de los ejes paralelos se halla que el segundo momento polar de inercia de área del grupo de soldaduras respecto al centroide es:

$$J_{Uc} = (J_{U1} + A_1 r_1^2) + J_{U2} + A_2 r_2^2 + J_{Un} + A_n r_n^2$$

Donde:

Para cordón 1:

$$r_1 = \sqrt{(112.15)^2 + (117.24)^2} = 172.63 \text{ mm}$$

Para cordón 2:

$$r_2 = \sqrt{(101.5)^2 + (51.74)^2} = 113.7 \text{ mm}$$

Para cordón 3:

$$r_3 = \sqrt{(52.77)^2 + (13.76)^2} = 54.53\text{mm}$$

Para cordón 4:

$$r_4 = \sqrt{(207.12)^2 + (23.26)^2} = 208.42\text{mm}$$

Para cordón 5:

$$r_5 = \sqrt{(42.12)^2 + (32.76)^2} = 53.36\text{mm}$$

Para cordón 6:

$$r_6 = \sqrt{(122.8)^2 + (42.24)^2} = 129.86\text{mm}$$

Evaluando se tiene:

$$\begin{aligned} J_{Uc} = I_{Uc} &= [805.3 + (90.35)(172.63)^2] + [187340.92 + (555.7)(113.7)^2] \\ &+ [2451481.63 + (1309.51)(54.53)^2] + [571.58 + (80.6)(208.4)^2] \\ &+ [2994750 + (1399.86)(53.36)^2] + [281250 + (636.3)(129.86)^2] \end{aligned}$$

$$J_{Uc} = I_{Uc} = 37903806.05 \text{ mm}^3$$

Hallando el valor de J total:

$$\begin{aligned} J_T &= 0.707 \text{ h } J_u \\ &= (0.707)(6)(37903806.05) \end{aligned}$$

$$J = I = 160787945.2 \text{ mm}^4$$

A continuación determinaremos la distancia a los puntos más alejados para encontrar el esfuerzo cortante en cada punto producido por el torque:

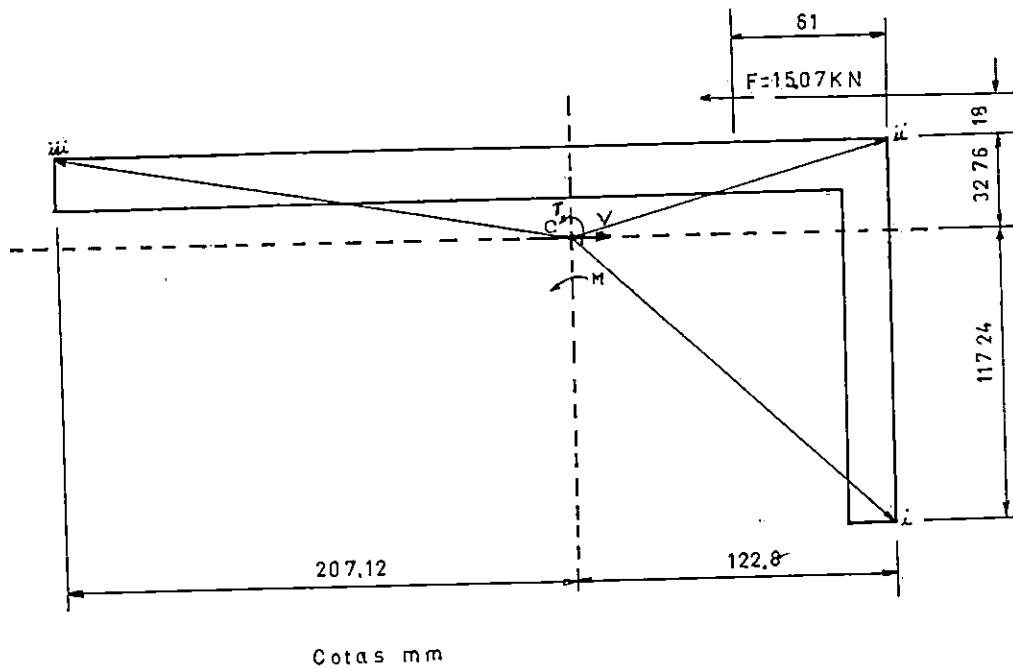


Figura 3.19 Puntos Críticos

Donde:

$$R_i = [(122.8)^2 + (117.24)^2]^{1/2} = 169.78 \text{ mm}$$

$$R_{ii} = [(122.8)^2 + (32.76)^2]^{1/2} = 127.09 \text{ mm}$$

$$R_{iii} = [(207.12)^2 + (32.76)^2]^{1/2} = 209.69 \text{ mm}$$

Ahora determinaremos el torque producido por la fuerza de  $F = 15.07 \text{ kN}$

$$T = F \cdot L$$

$$T = (15.07 \text{ kN})(32.76 \text{ mm} + 18 \text{ mm})$$

$$T = 764.95 \text{ kN}\cdot\text{mm}$$

Calculando el esfuerzo cortante producido por el torque en cada punto de análisis de la soldadura:

Punto i:

$$\begin{aligned}\tau_1 &= T R_i / J \\ &= (764.95 \text{ kN}\cdot\text{mm})(169.78\text{mm}) / 160787945.2 \text{ mm}^4 \\ &= 0.81 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Punto ii:

$$\begin{aligned}\tau_2 &= T R_{ii} / J = (764.95)(127.09) / 160787945.2 \text{ mm}^4 \\ &= 0.6 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

Punto iii:

$$\begin{aligned}\tau_3 &= (764.95)(209.69) / 160787945.2 \text{ mm}^4 \\ &= 1.0 \text{ N/mm}^2\end{aligned}$$

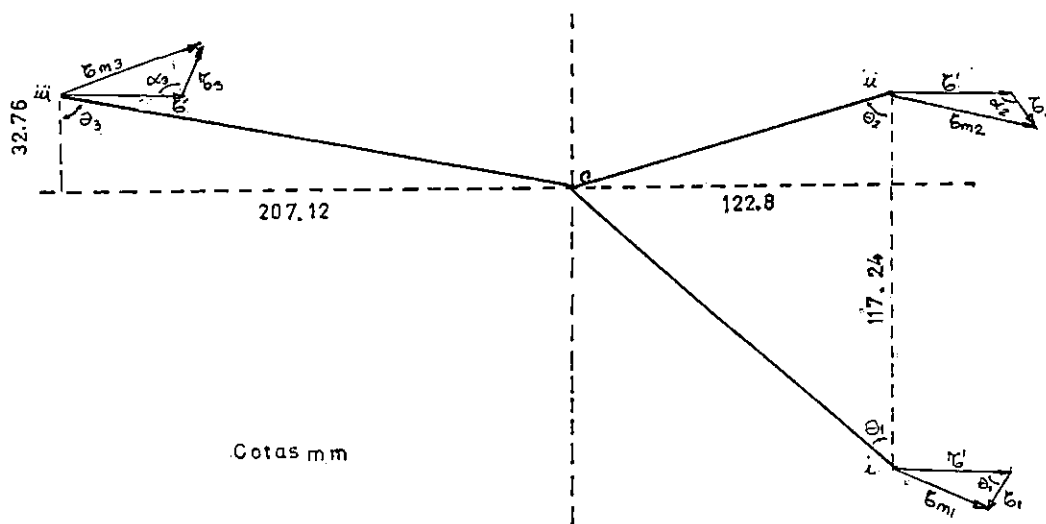


Figura 3.20 Esquematización de los Esfuerzos

Donde:

$$\text{Tg}\theta_1 = 122.8 / 117.24$$

$$\theta_1 = 46.33^\circ$$

$$\text{Tg}\theta_2 = 122.8 / 32.76$$

$$\theta_2 = 75.06^\circ$$

$$\text{Tg}\theta_3 = 207.12 / 32.76$$

$$\theta_3 = 81.01^\circ$$

Ahora aplicando la ley del coseno para encontrar el valor de los esfuerzos cortantes en cada punto de la soldadura son:

$$\begin{aligned} \tau_{m1} &= [(\tau)^2 + (\tau_1)^2 - 2(\tau)(\tau_1) \cos \theta_1]^{1/2} \\ &= [(3.7)^2 + (0.81)^2 - 2(3.7)(0.81) \cos 46.33^\circ]^{1/2} \\ &= 3.19 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{m2} &= [(3.7)^2 + (0.6)^2 - 2(3.7)(0.6) \cos \alpha_2]^{1/2} \\ &= [(3.7)^2 + (0.6)^2 - 2(3.7)(0.6) \cos (180^\circ - \theta_2)]^{1/2} \\ &= [(3.7)^2 + (0.6)^2 - 2(3.7)(0.6) \cos (180^\circ - 75.06^\circ)]^{1/2} \\ &= 3.90 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{m3} &= [(3.7)^2 + (1.0)^2 - 2(3.7)(1.0) \cos \alpha_3]^{1/2} \\ &= [(3.7)^2 + (1.0)^2 - 2(3.7)(1.0) \cos (180^\circ - \theta_3)]^{1/2} \\ &= [(3.7)^2 + (1.0)^2 - 2(3.7)(1.0) \cos (180^\circ - 81.01^\circ)]^{1/2} \\ &= 3.98 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

A continuación realizaremos el análisis del cordón de soldadura para cuando se encuentra sometida a flexión por la fuerza de  $F=15.07 \text{ kN}$ , donde el momento flexionante vale:

$$M = F \cdot D$$

$$M = (15.07 \text{ kN})(205 \text{ mm})$$

$$M = 3089.35 \text{ kN.m}$$

De tabla 3.2

$$\text{Area total de la soldadura} = A_{\text{Total}} = 4072.32 \text{ mm}^2$$

$$I = 160787945.2 \text{ mm}^4$$

Calculando el esfuerzo flexionante producido por el momento en cada punto de análisis de la soldadura. Tenemos que en los puntos i y ii la soldadura se encuentra sometida a tensión y el punto iii a compresión.

De modo que el esfuerzo de tensión en i y ii vale

$$\sigma = Mc / I$$

donde:

- c es la distancia medida desde el centroide de la soldadura a la fibra más alejada.

$$\sigma_{i \text{ y } ii} = \frac{(3089.35 \text{ kN.m})(122.8 \text{ mm})}{160787945.2 \text{ mm}^4}$$

$$\sigma_{i \text{ y } ii} = 2.36 \text{ N/mm}^2$$

El esfuerzo de compresión vale:

$$\sigma_{iii} = - Mc/I = (3089.35 \text{ kN.m})(207.12) / 160787945.2$$

$$\sigma_{iii} = - 3.98 \text{ N/mm}^2$$

Aplicando la teoría de Von Mises en el caso de flexión y torsión combinadas encontramos el esfuerzo equivalente:

$$\sigma' = (\sigma^2 + 3\tau^2)^{1/2}$$

$$\sigma' = (\sigma^2 + 3\tau_m^2)^{1/2}$$

Para el punto i:

$$\sigma_i = ((2.36)^2 + 3(3.19)^2)^{1/2}$$

$$\sigma_i = 6.0 \text{ N/mm}^2$$

Para el punto ii:

$$\sigma_{ii} = [(2.36)^2 + 3(3.90)^2]^{1/2}$$

$$\sigma_{ii} = 7.16 \text{ N/mm}^2$$

Para el punto iii:

$$\sigma_{iii} = [(-3.98)^2 + 3(3.98)^2]^{1/2}$$

$$\sigma_{iii} = 7.96 \text{ N/mm}^2$$

De esto concluimos que el punto de soldadura más crítico es  $\sigma_{iii}$

De modo que el factor de seguridad contra falla estática y según las propiedades de la lámina estructural ASTM – A36 se tienen las propiedades mecánicas mínimas del material de la estructura;  $S_u = 440 \text{ MPa}$  y  $S_y = 248 \text{ MPa}$ . Se utilizarán estas mismas propiedades para el metal soldante, aunque podrían ser empleados electrodos de mayor resistencia mecánica.

$$n = S_y / \sigma' = 248 \text{ MPa} / 7.96 \text{ N/mm}^2$$

$$n = 248 \text{ MPa} / 7.96 \text{ MPa}$$

$$n = 31.2$$

De anexo 10 y con un valor de  $S_y = 248 \text{ MPa}$  escogeremos un electrodo de la clasificación E 60 XX ( $S_y = 345 \text{ MPa}$ ).



De esto concluimos que tanto el material base como el soldante no fallará por carga estática.

### 3.3.3.2 Fijación de la Base de la Estructura

La base de la maquina se fijará por medio de 4 pernos de diámetro de 16 mm x 150 mm a una fundación de concreto; el cual debe tener una relación de 1:2:2 de cemento, grava y arena para obtener una resistencia de 21 MPa (Información brindada por la Escuela de Ingeniería Civil. UES)

Además para obtener los 500 Kg que pide la norma ASTM – E23, utilizaremos un bloque de concreto, el cual debe tener las siguientes dimensiones:

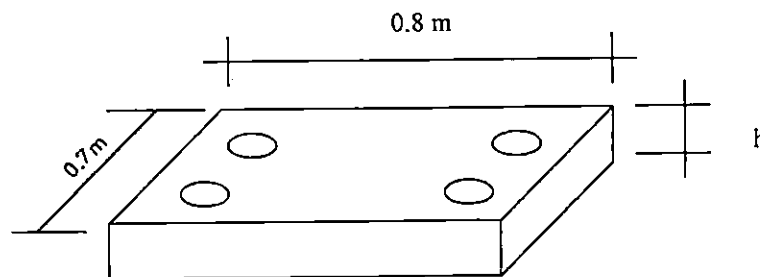


Figura 3.21 . Dimensiones del bloque de cemento

En la cual la incógnita a encontrar es la altura de dicho bloque.

Como primero paso encontraremos el peso de la máquina de ensayo Charpy debido solo a los soportes y a la base de la estructura:

Por medio de la ecuación siguiente:

$$\rho = m / V \quad (\text{Ec 3.27})$$

determinaremos a continuación la masa de la estructura:

Donde:

$\rho$  : densidad del acero [7806.12 kg/m<sup>3</sup>]

$m$  : masa de la estructura [kg]

$V$  : Volumen de la estructura [m<sup>3</sup>]

Encontrando el volumen de la estructura:

$$\begin{aligned} V_T &= V_{\text{base}} + V_{\text{soportes}} \\ &= 550 \times 500 \times 19 + 2[0.5 \times 19(180.98 \times 557 + 61 \times 120 + 105.55 \times 290) + \\ &\quad 131(21.3 \times 134.61 + 147 \times 19 + 21.3 \times 308.61 + 88.02 \times 557 \times 19)] \text{ mm}^3 \\ V &\approx 13.11 \times 10^6 \text{ mm}^3 \\ V &= 13.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Determinando la masa de la estructura:

$$\begin{aligned} m &= (V) (\rho) \\ m &= (13.11 \times 10^{-3} \text{ m}^3)(7806.12 \text{ kg/m}^3) \\ m &= 102.34 \text{ kg} \end{aligned}$$

Pero debido a que el peso total de la estructura debe de ser de 500 kg, es necesario que le agregue 397.7 kg, la cual lo obtendré de la fundación de concreto.

Auxiliándonos de figura anterior determinaremos la altura  $h$ , la cual es la necesaria para lograr los 397.7 kg, necesarios para lograr los 500 kg que exige la norma.

De ecuación 3.27 determinaremos la altura al bloque de concreto:

$$\begin{aligned} \rho &= m/V \\ V &= m / \rho \end{aligned}$$

Donde:

$$\rho^{14} = 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 397.7 \text{ kg}$$

$$V = 0.7\text{m} \times 0.8\text{m} \times h$$

Sustituyendo:

$$0.7\text{m} \times 0.8\text{m} \times h = 397.7 \text{ kg} / 2400 \text{ kg/m}^3$$

$$h = 397.7 / (0.7 \times 0.8 \times 2400) \text{ m}$$

$$h \approx 0.30 \text{ m de profundidad}$$

### 3.4 APOYO O SOPORTE DE LA PROBETA

La realización del ensayo Charpy, requiere de la fijación de la probeta en un sistema de apoyos, los cuales a la vez soportan a la misma.

Los apoyos tienen parámetros importantes que deben ser tomados en cuenta para garantizar el funcionamiento adecuado de la máquina. Estos parámetros son:

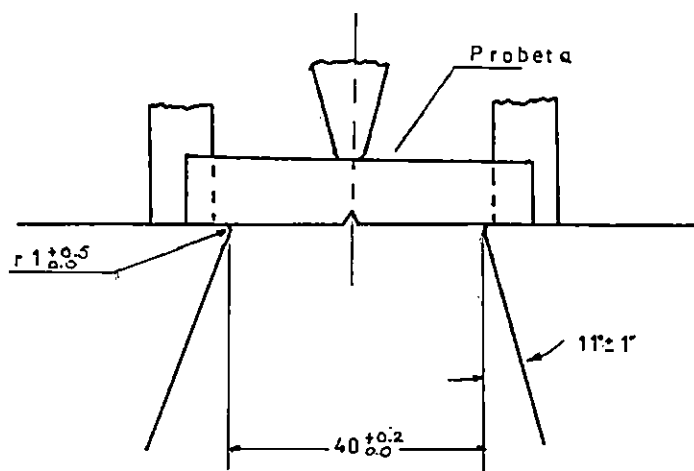
- Distancia entre apoyos
- Inclinación de los apoyos
- Radio de curvatura de los apoyos
- Dimensiones del apoyo y selección del material

---

<sup>14</sup> Información proporcionada por el laboratorio de Geología de la EIC, UES

### 3.4.1 Distancia entre Apoyos

Según tabla 2.6, la distancia entre apoyos para la máquina es de 40 mm, esta distancia garantiza que el péndulo pasará libremente después de fracturar la probeta, ver figura 3.22.



cotas: mm

Figura 3.22 Disposición de la probeta en la máquina (vista superior)

### 3.4.2 Inclinación de los Apoyos

La inclinación de los apoyos según tabla 2.6 es aproximadamente  $11^\circ \pm 1^\circ$ , tal como se aprecia en la figura 3.22, esta inclinación evita el arrastre entre la probeta y los apoyos.

### 3.4.3 Radio de curvatura del Apoyo

El radio de curvatura del apoyo, según tabla 2.6 debe estar comprendido entre 1 y 1.5 mm, tal como se observa en la figura 3.22. El borde redondeado minimiza la concentración de esfuerzos en la probeta al momento de impactar y producirse la ruptura de la probeta.

### 3.4.4 Dimensiones del Apoyo y Selección del Material

Por cuestiones de diseño se asumirá que el apoyo es un paralelepípedo el cual tiene las dimensiones siguientes:

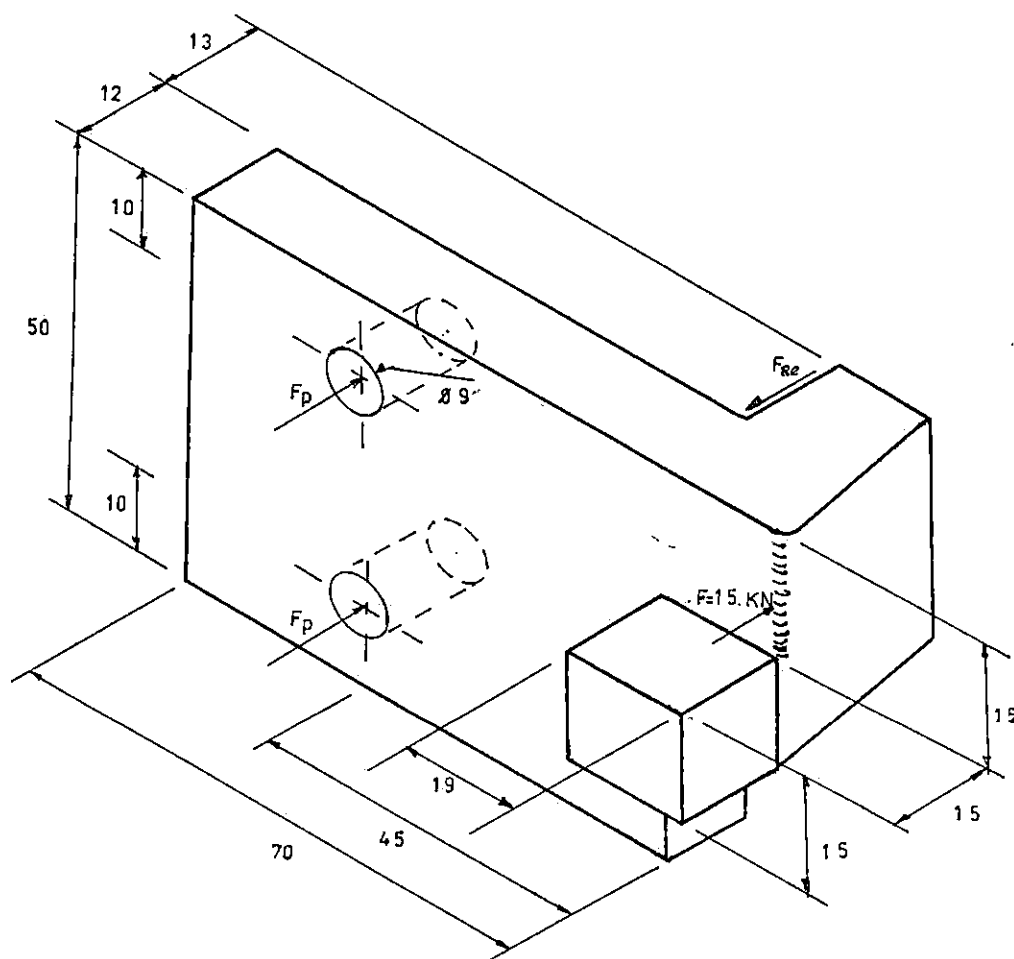


Figura 3.23. Apoyo de la probeta (dimensiones en mm)

Con base a las dimensiones se determinará el material a seleccionar en la construcción de dicho apoyo.

Para seleccionar el material adecuado se analizará el área donde se producen las condiciones críticas, que es en el radio de curvatura de dicho soporte, el cual favorece a la probeta para no producir un afilo agudo, que produzca la fractura en dicho elemento (probeta) al momento del impacto.

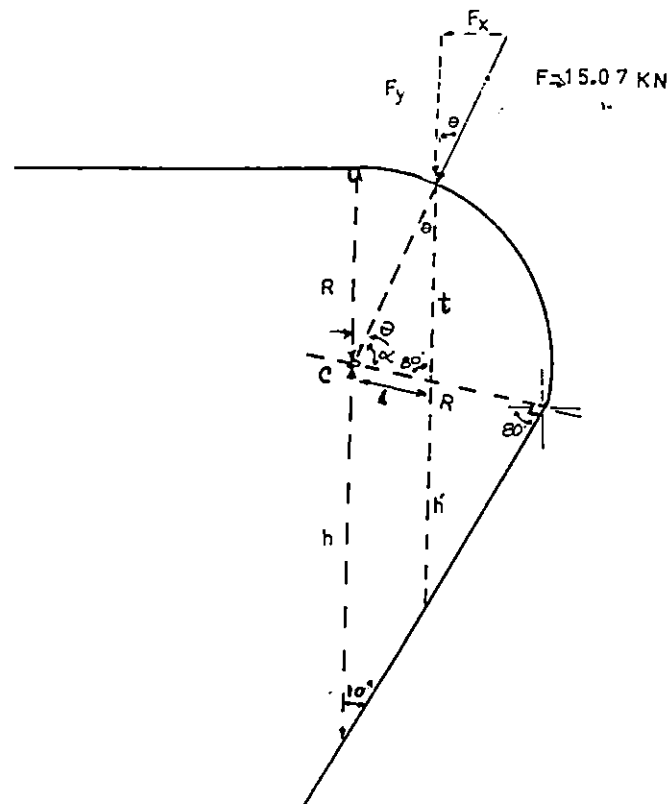


Figura 3.24 Distribución de la fuerza en el momento del impacto

Aplicando la ley del seno en la figura 3.24 tenemos:

$$\frac{L}{\text{sen}\theta} = \frac{t}{\text{sen}\alpha} = \frac{R}{\text{sen}80^\circ}$$

donde:

$$\alpha = 180^\circ - 80^\circ - \theta$$

$$\alpha = 100^\circ - \theta$$

Por triángulo rectángulo:

$$\text{Sen } 10^\circ = R / h$$

$$h = R / \text{sen } 10^\circ$$

Por relación de triángulos:

$$h/R = h' / (R - L)$$

$$h' = (R - L)(h) / R$$

Siendo:

$$h = R / \text{Sen } 10^\circ$$

$$L = R \text{ sen } \theta / \text{sen } 80^\circ$$

Se tiene:

$$h' = \frac{\left(R - \frac{R \text{ sen } \theta}{\text{sen}80^\circ}\right) \left(\frac{R}{\text{sen}10^\circ}\right)}{R}$$

Donde el espesor total (T) es la suma de las variables t y h'

$$T = t + h'$$

$$T = R \text{ sen } (100^\circ - \theta) / \text{sen } 80^\circ + (1 - \text{sen } \theta / \text{sen } 80^\circ)(R) / \text{sen } 10^\circ$$

Donde:

$$R = 1 \text{ mm}$$

$$T = \text{sen}(100^\circ - \theta) / \text{sen } 80^\circ + (1 - \text{sen } \theta / \text{sen } 80^\circ) / \text{sen } 10^\circ \text{ [mm]}$$

Para seleccionar el material se analizará solamente la componente de la fuerza en la dirección "Y", que produce cortante en la cara del apoyo y para valores diferentes de inclinación y ver en que ángulo se produce el esfuerzo cortante máximo y con base a el seleccionar el material.

Tabla 3.3 Distribución de la fuerza para diferentes valores de inclinación

$\theta$ (grados)	Fy (kN)	T (mm)	Area (15xT)[mm <sup>2</sup> ]	$\tau = Fy / A$ [MPa]
10°	14.84	5.76	86.25	172.06
20°	14.16	4.76	71.4	198.32
30°	13.05	3.79	56.85	229.55
40°	11.54	2.88	43.2	267.13

Asumiendo que en el ángulo a 40° se produce el mayor esfuerzo cortante y considerando que la probeta aún está en contacto con el borde redondeado del apoyo.

Aplicando la teoría del cortante máximo y tomando un factor de seguridad de 2.8 (de anexo 2) concluimos que:

$$n = S_y / (2 \tau_{\text{máx}})$$

$$S_y = 2 n \tau_{\text{max}}$$

$$S_y = 2 (2.8) (267.13 \text{ MPa})$$

$$S_y = 1495.93 \text{ MPa}$$



De anexo 11 seleccionaremos un acero AISI 1045 con un tratamiento térmico para lograr la resistencia de fluencia y el endurecimiento deseado en los soportes.

### 3.4.5 Forma de Fijación

Los soportes se fijarán a la estructura por medio de dos tornillos, los cuales se colocarán verticalmente uno arriba del otro con el objetivo de darle mayor rigidez a los soportes y así evitar que ellos puedan rotar y desalinearse.

De la figura 3.24 encontraremos la fuerza ejercida en cada tornillo:

$$\Sigma M_{\text{respecto a } F_{Re}} = 0$$

$$F_1 (19) - 2F_2 (45) = 0$$

$$F_2 = 19 F_1 / 2(45) = 19 F_1 / 90$$

Donde:

$$F_1 = F_{\text{maximo}} = 15.07 \text{ kN}$$

Por lo tanto:

$$F_2 = (15.07 \text{ kN})(19 \text{ mm}) / 90 \text{ mm}$$

$$F_2 = 3.18 \text{ kN.} \quad \text{fuerza ejercida en cada tornillo.}$$

Encontrando la fuerza de reacción ejercida sobre el apoyo:

$$\Sigma F = 0$$

$$2F_2 + F_1 = F_{Re}$$

$$F_{Re} = 2(3.18 \times 10^3 \text{ N}) + 15.67 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{Re} = 21.43 \text{ kN}$$

Como el soporte está sometido a cortante puro la región crítica es el área donde se encuentra ejercida la fuerza de reacción  $F_{Re}$ , con esta fuerza encontraremos el

esfuerzo cortante máximo en la región de análisis y determinaremos si el material falla o no.

Encontrando el esfuerzo cortante máximo en la región de análisis:

$$\tau = V / A = F_{Rc} / A$$

Donde:

V: Cortante

A: Area

$$\tau = 21.431 \text{ kN} / (30 \times 12) \text{ mm}^2$$

$$\tau = 59.53 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\max} = 59.53 \text{ MPa}$$

Aplicando la teoría del esfuerzo cortante máximo para determinar el factor de seguridad de la sección y asumiendo un acero AISI 1045 con un esfuerzo de fluencia de  $S_y = 310 \text{ MPa}$  tenemos:

$$n = S_y / 2 \tau_{\max}$$

$$n = 310 \times 10^6 \text{ Pa} / (2)(59.53 \times 10^6 \text{ Pa})$$

$$n = 2.6$$

Con estas dimensiones corroboramos que el material no fallará por cortante.

De acuerdo a la fuerza ejercida en los tornillos estos deben ser iniciados con una fuerza de precarga, la cual está determinada por la expresión:

$$F_i = 0.75 F_p \text{ (conexiones reutilizables)}$$

Donde:

$$F_p = (A_t) (S_p)$$

Debido a la configuración se seleccionarán pernos de 8 mm (M8) al cual se le calculará su rigidez efectiva ( ecuación 3.21) y considerando serie de paso basto.

$$K_b = (A_t)(E) / l$$

Donde:

$A_t$  : Area de tension

$E$  : Módulo de rigidez del acero

$l$  : Longitud de agarre

De anexo 3

$$A_t = 36.6 \text{ mm}^2$$

$$E = 207 \text{ kN/mm}^2$$

$$l = 12 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$K_b = (36.6 \text{ mm}^2)(207 \text{ kN/mm}^2) / 12 \text{ mm}$$

$$K_b = 631.35 \text{ kN / mm}$$

También es necesario determinar la rigidez de la placa a sujetar. De la ecuación siguiente:

$$K_m = \frac{0.577\pi E d}{2 \ln \left[ 5 \frac{0.577L + 0.5d}{0.577L + 2.5d} \right]}$$

Donde:

$d$ : Diámetro del tornillo (8mm)

$L$ : Longitud de agarre (12 mm)

Por lo tanto:

$$K_m = \frac{0.577\pi(207 \times 10^3)(8)}{2 \ln \left[ 5 \frac{0.577(12) + 0.5(8)}{0.577(12) + 2.5(8)} \right]}$$

$$K_m = \frac{3001.83 \times 10^3}{2(0.707)}$$

$$K_m = \frac{3001.83 \times 10^3}{1.41} \text{ N/mm}^2$$

$$K_m = 2128.96 \text{ kN/mm}^2$$

Ahora utilizando un factor de carga ( $n=4$ ) para cada tornillo se procederá a calcular la resistencia mínima a la tensión ( $S_p$ ) en los tornillos por medio de la ecuación 3.23:

$$S_p = \frac{\left( \frac{K_b}{K_b + K_m} \right) nP + F_i}{A_t}$$

Donde:

$P = F_2 = 3.18 \text{ kN}$ ; fuerza soportada por cada tornillo

$n = 4$

$A_t = 36.6 \text{ mm}^2$

$K_b = 631.35 \text{ kN/mm}$

$K_m = 2128.96 \text{ kN/mm}$

$F_i = (0.75)(A_t S_p)$

Sustituyendo en la ecuación 3.23 tenemos:

$$S_p = \frac{\left( \frac{631.35 \times 10^3}{631.35 \times 10^3 + 2128.96 \times 10^3} \right) (4)(3.18 \times 10^3) + 0.75(36.6)S_p}{36.6}$$

$$36.6 S_p = 2909.37 + 27.45 S_p$$

$$S_p (36.6 - 27.45) = 2909.37$$

$$S_p = 2909.37 / 9.15$$

$$S_p = 317.96 \text{ N/mm}^2$$

$$S_p = 317.96 \text{ MPa}$$

De anexo 4 con  $d = 8 \text{ mm}$  y  $S_p = 318 \text{ MPa}$ , seleccionaremos cuatro tornillos con las características siguientes:

Clase 5.8

M8 x1.25

$S_p = 380 \text{ MPa}$

### 3.5 DISEÑO DEL MEDIDOR DE ENERGÍA

El dispositivo de medición de energía a diseñar es de aguja de arrastre, en el cual la fuerza de fricción es necesaria para inmovilizar el dispositivo en el punto máximo y así obtener la lectura de energía.

La aguja del medidor debe ser arrastrada desde la menor posición del péndulo, es decir, cuando el péndulo pase por su posición de descanso libre; hasta la máxima altura alcanzada en el ensayo. Para lograr estas características se propone el diseño representado en el siguiente esquema.

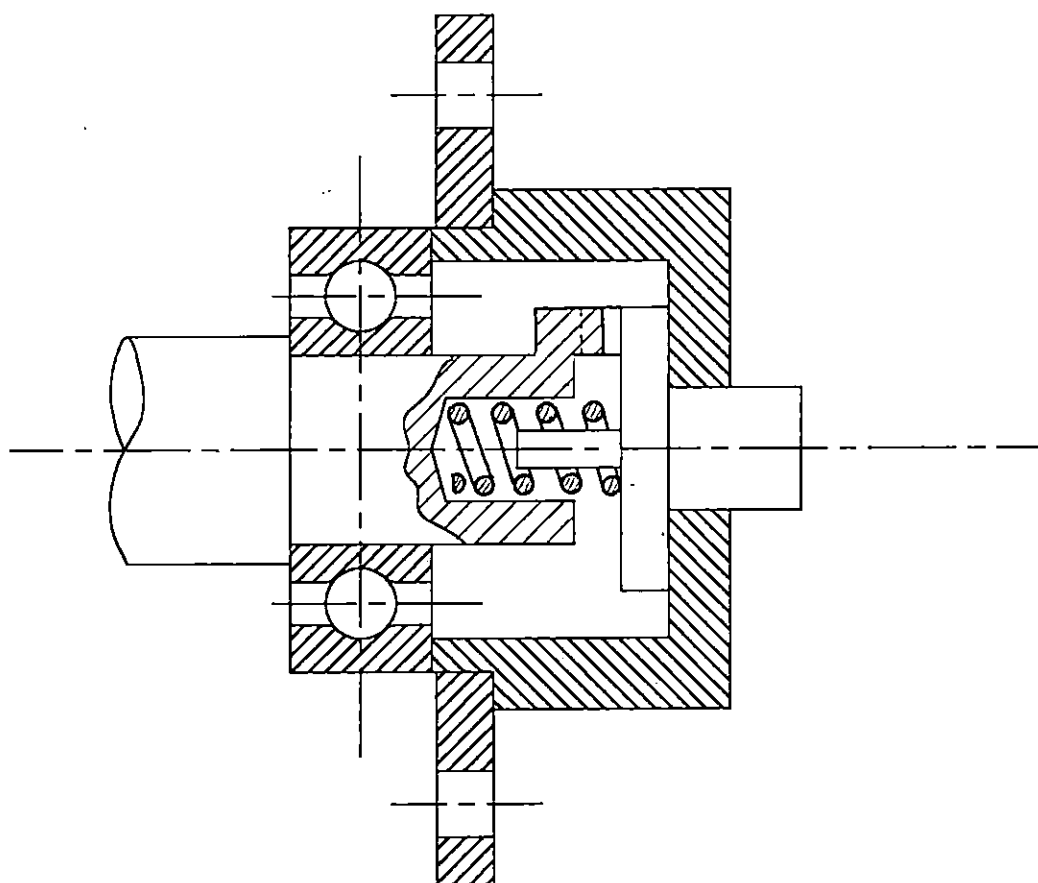


Figura 3.25 Esquema del dispositivo de medición.

La graduación se hará efectiva hasta el momento en que se monte la máquina, para así tomar en cuenta las pérdidas, según las indicaciones mencionadas en el apartado 2.6.1.4.

### 3.6 DISEÑO O SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO DE NIVELACIÓN DE LA MÁQUINA

El dispositivo de nivelación de la máquina a seleccionar consiste en un aparato, el cual tiene una escala medida en grados y una aguja indicadora.

Según normas ASTM E – 23, esta permite una inclinación del eje de rotación de 3:1000 (0.2°) respecto al eje transversal de los soportes en donde se encuentra montada la muestra Charpy. Con este dispositivo también se pretende nivelar la máquina de impacto respecto a la superficie donde se encontrará montada. (no exceder de 0.2° respecto a la superficie horizontal).

Características del dispositivo de nivelación:

Modelo A –100

Marca SOMET

Dimensiones 78 x 62 x14 mm

Menor de rango de lectura (incerteza) 0.2°

Rango mayor de lectura 360° de 1° en 1°

Con el cual cumplimos las especificaciones de la ASTM E – 23.

## CAPITULO IV



#### 4.0 PROCESO DE FABRICACIÓN Y ENSAMBLE DE LOS ELEMENTOS DISEÑADOS DE LA MÁQUINA

Los sistemas mecánicos que componen la máquina para ensayos de impacto Charpy, tienen como función desarrollar satisfactoriamente la prueba de impacto Charpy en materiales metálicos, para lo cual es utilizada una probeta normalizada.

Para cada uno de los elementos que componen la máquina se ha desarrollado previamente un estudio de diseño, el cual ha dado como resultado las dimensiones, geometría y tipo de material a utilizar para cada uno de ellos.

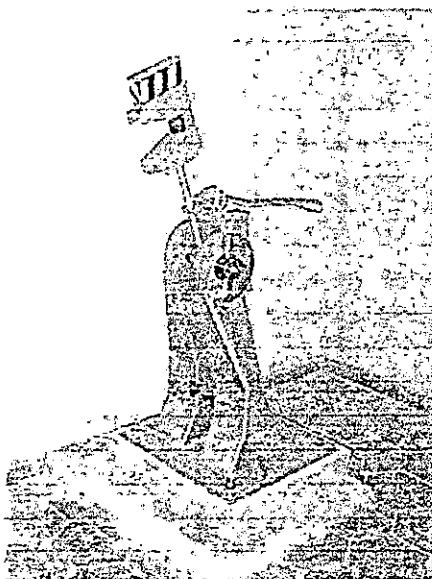


Figura 4.1 Máquina de ensayo Charpy

La máquina se compone de aproximadamente trece elementos. También, para determinar el costo total de la máquina, se establece el costo de materiales de la máquina y el costo de mano de obra o fabricación de ella.

#### 4.1 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA MÁQUINA

El proceso de fabricación de cada uno de uno de los elementos de la máquina se presenta en una hoja de proceso, en la cual se establecen los pasos a seguir para la fabricación de los mismos. La hoja de proceso incluye el nombre del elemento, número de piezas a fabricar, material a utilizar, número de operaciones, el equipo y las herramientas necesarias para la fabricación de los elementos de la máquina. También se incluye el método de programación de Gantt (Diagrama 4.1).

A continuación se detallan las hojas de proceso de cada elemento:

Elemento: Base de la estructura de la máquina			
No. Piezas: 1		Material: Lámina de acero ASTM- A36	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Trazo de las dimensiones de la pieza a 550 x500 x19 mm (ver plano N° 2)</li> <li>◦ Corte de la pieza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinta métrica</li> <li>• Escuadra</li> <li>• Rayador</li> <li>• Equipo de oxi-acetileno</li> <li>• Boquilla No.1</li> </ul>	1
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulido de las áreas cortadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulidora</li> </ul>	½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>◦ Maquinar los cuatro bordes de la lámina según dimensiones requeridas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresadora</li> <li>• Fresa de desbaste</li> </ul>	2
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taladrar cuatro agujeros de dieciocho milímetros de diámetro</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Centro punto</li> <li>• Martillo</li> <li>• Broca de 18 mm</li> <li>• Taladro</li> </ul>	1

Elemento: Soportes de la máquina o estructura			
No. Piezas: 2		Material: Lámina de acero ASTM- A36, 2000 x1000 x19 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Trazado de las piezas (ver plano N° 3)</li> <li>Corte de la pieza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cinta métrica</li> <li>Escuadra</li> <li>Rayador</li> <li>Equipo de oxi-acetileno</li> <li>Boquilla No.1</li> </ul>	4
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulido de las áreas cortadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulidora</li> </ul>	1
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maquinado de contornos hasta obtener dimensiones requeridas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Fresa de desbaste</li> </ul>	2
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Preparar piezas para soldadura (biselar)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escuadra</li> <li>Rayador</li> <li>Pulidora</li> </ul>	2
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unión por soldadura de las piezas para formar los soportes de la máquina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escuadra</li> <li>Electrodo E6013 de <math>\Phi</math> 6.3 ó 4.7 mm</li> </ul>	5
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulido de las áreas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pulidora</li> <li>Cepillo de alambre</li> </ul>	½

Elemento: Eje del péndulo de la máquina			
No. Piezas: 1		Material: Barra de acero AISI- 1045 de $\Phi$ 31.7 mm x 250 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montar la barra de acero 1045 en el torno</li> <li>• Refrentado de la pieza</li> <li>• Cilindrar a diámetro de 28 mm por 210 mm de largo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibrador</li> <li>• Butil para refrentar</li> <li>• Butil para cilindrar</li> </ul>	1
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cilindrar a diámetro de 24 mm (ver plano N° 5)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibrador</li> <li>• Butil</li> <li>• Torno</li> </ul>	½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cilindrar a diámetro de 20 mm (ver plano N° 5)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibrador</li> <li>• Butil</li> <li>• Torno</li> </ul>	½
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tronzar eje a la dimensión de 210 mm de longitud</li> <li>• Refrentar cara hasta obtener 190 mm de longitud</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Butil para tronzar</li> <li>• Butil para refrentar</li> <li>• Calibrador</li> <li>• Torno</li> </ul>	¼
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Montar eje del péndulo en plato divisor</li> <li>• Fresar en la parte central un plano a 2 mm de profundidad de la superficie con un ancho de 22 mm</li> <li>• Girar el eje 90° y ejecutar el paso anterior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresa de desbaste</li> <li>• Calibrador</li> <li>• Fresadora</li> </ul>	1
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresar para construir pestaña en el borde del eje de acuerdo a plano N° 5</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresa de desbaste</li> <li>• Fresadora</li> </ul>	½
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taladrar un agujero de 11 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Broca de <math>\Phi</math>11 mm</li> <li>• Taladro</li> </ul>	¼

Elemento: Barra del péndulo			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI 1045 $\Phi$ 1"	
Pasos	Operaciones	Equipos y herramientas	Tiempo Horas
1	• Refrentar las caras de la barra	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buril para refrentar</li> <li>• Broca de centro</li> <li>• Torno</li> <li>• Buril de tronzado</li> <li>• Broca</li> </ul>	¼
2	• Hacer agujero en uno de los extremos con broca de centrar		1/12
3	• Cilindrar el diámetro mayor de 24 mm (ver plano N° 10)		¼
4	• Efectuar el escalón de 22 mm		¼
5	• Realizar tronzado en el lado de $\Phi$ 22 mm con 2.5 mm de profundidad		1/5
6	• Efectuar cono de 120° en el extremo cilindrado a 24 mm $\Phi$		5/12
7	• Fresar cuñero de 10 mm de ancho y 6 mm de profundidad sobre la parte $\Phi$ 24 mm	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresa de 8 mm</li> <li>• Fresadora</li> </ul>	½
8	• Fresar una ranura en "V" en el extremo del diámetro de $\Phi$ 22 mm		¾

Elemento: Percutor			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI D - 2 de 48 x52 x32 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar un bloque de 46.5 x30 x50 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresa de 12 mm</li> <li>Buril / fresar</li> <li>Broca</li> <li>Juego de machuelos M5</li> <li>Nivel</li> <li>Goniómetro</li> <li>Calibrador</li> <li>Fresadora</li> </ul>	2
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efectuar la ranura de 18 mm de ancho y 12 mm de profundidad en la cara de 50 x30 mm (ver plano N° 8)</li> </ul>		½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>A 20 mm del borde de la cara de la ranura, fresar desbastando 6 mm de profundidad a ambos lados de la cara de 30 x46.5 mm.</li> </ul>		½
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>A partir del vértice interno de la sección de 18 mm fresar a 15° hacia el centro de los 18 mm. Hacer lo mismo con la cara contraria.</li> </ul>		1
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elaborar sección semi - circular en la punta formada con un radio de 2.5 mm</li> </ul>		1/3
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elaborar 4 agujeros roscados en las paredes de la ranura, los cuales servirán para la sujeción a la masa del péndulo.</li> </ul>		2

Elemento: Fijador barra – masa del péndulo			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI- 1045. 128 x17 x42 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar un bloque rectangular de 40 x15.5 x126 mm (ver plano N° 9)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresa</li> <li>Brocas de 5, 10, 12.5, 18 y 24 mm</li> <li>Rima de 24 mm</li> <li>Fresa de 10 mm</li> <li>Fresadora</li> </ul>	2
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taladrar un agujero de 24 mm al centro del bloque sobre la cara de 40 x126 mm; y efectuar su respectivo rimado</li> </ul>		½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taladrar 2 agujeros de <math>\Phi</math> 12.5 mm en la misma cara del agujero anterior</li> </ul>		¼
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Efectuar ranura de 13 mm de ancho sobre una de las caras de 40 x 126 mm y perpendicular al lado de 126 mm</li> </ul>		¾

Elemento: Masa principal del péndulo			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI- 1045, 200 x265 x42 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Trazar el contorno de la figura sobre la placa y cortar con oxiacetileno, con una sobre dimensión de 8 mm (ver plano N° 7)</li> </ul>		2
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Quitar las irregularidades dejadas por el corte con esmeril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipo de corte oxiacetilénico</li> <li>Regla</li> <li>Rayador</li> <li>Esmeril</li> <li>Fresa de ½" x 2"</li> <li>Buril / fresar</li> <li>Brocas</li> <li>Fresadora</li> <li>Machuelos</li> <li>Fresa de ¼"</li> </ul>	3
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar la placa hasta obtener un espesor de 40 mm</li> </ul>		1
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar los contornos de la pieza con una tolerancia de <math>\pm 0.1</math> mm.</li> </ul>		4
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taladrar un agujero de 24 mm con broca de 120° de abertura del filo de corte</li> </ul>		½
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hacer dos agujeros roscados de 12 mm con 25 mm de profundidad a los lados del agujero de 24 mm</li> </ul>		1 ½
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maquinar ranura al centro del bloque con un ángulo de 30°, la cual servirá para poder colocar el percutor</li> </ul>		1



Elemento: Posicionador			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI- 1020. 80 x17 x40 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar el material en bruto a un bloque rectangular de 77 x37 x15 mm (ver plano N° 11)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresa</li> <li>Buril / fresar</li> <li>Brocas de 3, 10, 15, 22 mm</li> <li>Centro punto</li> <li>Martillo</li> <li>Broca</li> <li>Machuelo 8 mm</li> <li>Fresadora</li> </ul>	1
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taladrar agujero de 22 mm de diámetro en la cara de 77 x37 mm</li> </ul>		¼
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Taladrar agujeros de <math>\Phi</math> 3 mm en los bordes internos al rectángulo de 16 x20 mm; para luego sacar el bocado y formar tal rectángulo</li> </ul>		3
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hacer un agujero roscado de <math>\Phi</math> 8 mm que intercepte el agujero de <math>\Phi</math> 22 mm</li> </ul>		½

Elemento: Acople Eje - barra del péndulo (A)			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI 1045, 54 x54 x46 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar el material un bruto a dimensionar de 50 x50 x44 mm (ver plano N° 13)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Calibrador</li> <li>Comparador de reloj</li> <li>Buril / fresar</li> </ul>	2
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>En una de las caras de 50 x44 mm efectuar agujero de 28 mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Escariador 28 mm</li> <li>Brocas de 10, 15, 20 y 28 mm</li> <li>Centropunto</li> </ul>	½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>En la misma cara efectuar 3 agujeros para realizar rosca M3. Realizar la misma operación en la cara posterior.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Regla</li> <li>Centro punto</li> <li>Broca</li> <li>Machuelos 3 mm</li> <li>Nivel</li> <li>Escuadra</li> </ul>	¾
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>En la cara más lejana paralela al agujero de 28 mm, hacer agujero de 22 mm hasta que lo intercepte.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Regla</li> <li>Centropunto</li> <li>Broca</li> <li>Nivel</li> <li>escuadra</li> </ul>	1/3

Elemento: Acople Eje – Barra del péndulo (B)			
No. Piezas: 1		Material: Acero AISI- 1045. 13 x54 x54	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar el material en bruto a dimensiones de 11 x50 x50 mm (ver plano N° 15)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Calibrador</li> <li>Escuadra</li> <li>Nivel</li> <li>Buril / fresa</li> </ul>	1 3/4
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>En una de las caras de 50 x50 mm hacer agujero de 8 mm en los 4 vértices.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Calibrador</li> <li>Nivel</li> <li>Centro punto</li> <li>Broca</li> </ul>	1/3
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Montar la pieza en el torno en un plato de 4 mordazas y efectuar agujero escalonado de <math>\Phi</math> 22 y <math>\Phi</math> 29 mm con un buril de interiores. (ver plano N° 15)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Torno</li> <li>Calibrador</li> <li>Comparador de reloj</li> <li>Buril de interiores</li> </ul>	3

Elemento: Acople eje – barra del péndulo (C)			
No. Piezas: 2		Material: Acero AISI- 1020, 45 x52 x15 mm	
Pasos	Operaciones	Equipos y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresar el material en bruto a dimensión de 43 x50 x11 mm (ver plano N° 14)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Calibrador</li> <li>Comparador de reloj</li> <li>Buril / fresar</li> <li>Fresa de 3/8"</li> </ul>	1 ½
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hacer agujero de 24 mm pasado a través de la superficie de 43 x50 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Broca 22 mm</li> <li>Centro punto</li> <li>Calibrador</li> </ul>	¼
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Hacer 3 agujeros de <math>\Phi</math> 3 mm, los cuales deberán ubicarse 2 en los vértices y uno en la parte central del lado contrario a los otros.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Broca de <math>\Phi</math> 3 mm</li> <li>Centro punto</li> <li>Calibrador</li> <li>Fresadora</li> </ul>	¼
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Con avellanador de 90° efectuar avellanado en los 3 agujeros de 3 mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Avellanado</li> </ul>	3/20

Elemento: Alojamiento para rodamientos			
No. Piezas: 1		Material: Lamina de Acero ASTM- A36, 2000 x1000 x19 mm	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trazado de las piezas (ver plano N° 6)</li> <li>• Corte de las piezas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cinta métrica</li> <li>• Escuadra</li> <li>• Rayador</li> <li>• Equipo de oxi - acetileno</li> <li>• Boquillas No 0 y 1</li> </ul>	2
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulido de las áreas cortadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulidora</li> </ul>	½
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinar contornos hasta dimensiones requeridas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fresa de desbaste</li> <li>• Fresadora</li> </ul>	3
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparar piezas para soldadura (biselar)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escuadra</li> <li>• Rayador</li> <li>• Pulidora o banco de esmeril</li> </ul>	1
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unión por soldadura de las piezas para formar el alojamiento para rodamientos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Escuadra</li> <li>• Electrodo E6013 de <math>\Phi</math> 6.3 mm ó 4.7 mm.</li> <li>• Equipo de soldadura</li> <li>• Cepillo de alambre</li> </ul>	3
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulido de las áreas soldadas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulidora</li> </ul>	¼
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinado de agujeros <math>\Phi</math> 47 mm de diámetro por 14 mm de profundidad (ver plano N° 6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Broca <math>\Phi</math> 41 mm</li> <li>• Taladro</li> <li>• Centro punto</li> </ul>	1 ½
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinado de agujeros de 41 mm por 5 milímetros de profundidad (ver plano No 6)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Broca de <math>\Phi</math> 41 mm</li> <li>• Taladro</li> <li>• Centro punto</li> </ul>	1 ½
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maquinar seis agujeros de <math>\Phi</math> 10 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Broca de <math>\Phi</math> 10 mm</li> <li>• Taladro</li> <li>• Centro punto</li> </ul>	2

Elemento: Soportes de la probeta			
No. Piezas: 2		Material: Lamina de Acero AISI- 1045. 70 x110 x60 mm	
Pasos	Operaciones	Equipos y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Montar lámina de 70 x110 x60 mm en la fresadora</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> </ul>	½
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maquinar lámina de dimensiones de 50 x90 x40 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresadora</li> <li>Fresa de desbaste</li> <li>Calibrador</li> </ul>	5
3	Taladrar dos agujeros de 9 mm de diámetros (ver plano N° 4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Broca de <math>\Phi</math> 9 mm</li> <li>Centro punto</li> </ul>	¾
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Darle acabado final a la pieza</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fresa de acabado</li> </ul>	¼
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Darle un tratamiento térmico (temple en agua) a la temperatura de 850 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Horno para tratamiento térmico</li> <li>Agua</li> </ul>	3

Elemento: Maquina para realizar ensayos de impacto Charpy			
No. Piezas: 1		Material:	
Pasos	Operaciones	Equipo y herramientas	Tiempo Horas
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pulido de las áreas oxidadas y remoción de virutas o rebabas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lija No 150</li> <li>• Cepillo de alambre</li> </ul>	4
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparación de pintura</li> <li>• Pintado de la máquina</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Compresor</li> <li>• Pistola para pintar</li> <li>• Solvente industrial R2K4</li> <li>• Máscara contra gases</li> </ul>	2 ½

DIAGRAMA 4.1 DIAGRAMA DE GANTT

Nº	ACTIVIDAD	HORAS																	
		08	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128	136	144
1	Estructura de la Máquina																		
	Trazo y corte	█																	
	Ensamble		█	█	█														
2	Alojamiento del Rodamiento																		
	Trazo y corte				█														
	Ensamble					█	█	█											
3	Péndulo																		
	Trazo y corte							█	█	█	█								
	Ensamble										█	█							
4	Apoyos de la Probeta																		
	Trazo y maquinado											█	█	█	█				
	Ensamble													█					
5	Medidor de Energía																		
	Trazo y maquinado														█	█			
	Ensamble															█			
6	Dispositivo de Sujeción																		
	Trazo y maquinado																█	█	
	Ensamble																	█	
7	Acabados																		
	Trazo y maquinado																		
	Ensamble																		
8	Ensamble y Montaje																		
	Trazo y maquinado																		
	Ensamble																		█



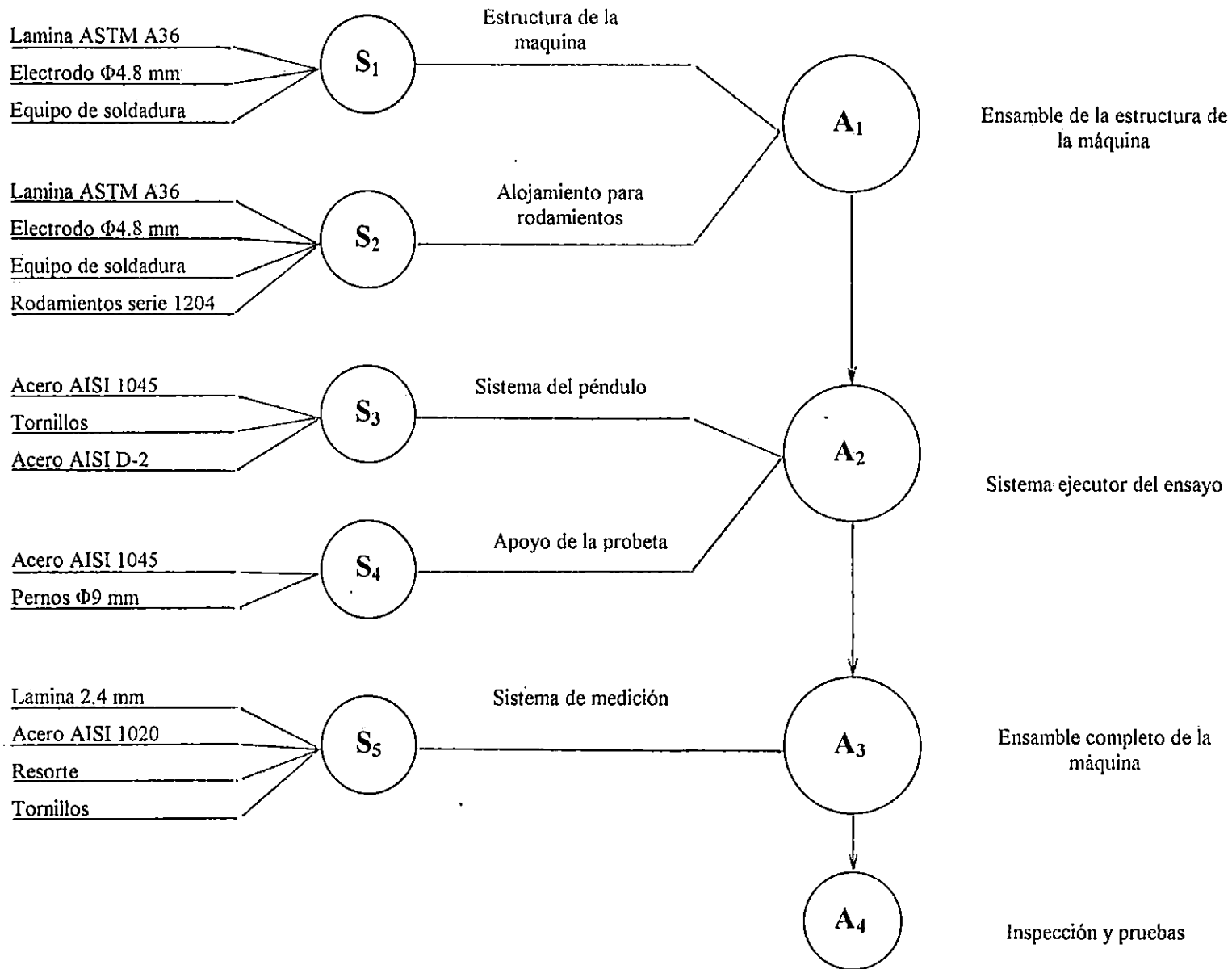
### 4.3 ENSAMBLE Y MONTAJE DE LA MAQUINA.

Después de efectuar el diseño de la máquina para pruebas de impacto Charpy, así como seleccionar los elementos y dispositivos necesarios para su correcto funcionamiento, se procede a efectuar la construcción de la misma.

Con el objeto de facilitar la construcción, cada sistema se desarrollará por separado, tal como se desglosa en la gráfica de ensamble (figura 4.2), además el montaje se hará sobre una fundación de cemento, el cuál tiene las dimensiones de 0.7 x 0.8 x 0.3 m.

La máquina se fijará por medio de 4 pernos de 16 mm de diámetro por una longitud de 150 mm, los cuales estarán enclavados en el bloque de cemento.

FIGURA 4.2 GRAFICA DE ENSAMBLE



#### 4.3 PUESTA A PUNTO DE LA MAQUINA.

La instalación o montaje de la máquina deberá cumplir con los requerimientos detallados en los párrafos 2.5.1 y 2.5.2.

Los requerimientos más importantes para que la máquina funcione correctamente son:

- ⇒ Alineamiento de ejes.
- ⇒ Alineamiento del soporte de la probeta.
- ⇒ Determinación de energía perdida.

El último requerimiento se utilizará para la calibración del dial. El proceso a seguir para la calibración es:

- 1) Verificar que eje y soporte de probeta estén perfectamente alineados.
- 2) Llevar la masa del péndulo a la posición de disparo.
- 3) Colocar la aguja del medidor en la posición de máxima energía (parte inferior vertical)
- 4) Efectuar una prueba en vacío (sin probeta) para determinar las pérdidas en el sistema.
- 5) Calibrar el medidor, teniendo en cuenta las pérdidas antes determinadas.
- 6) Realizar los ensayos en probetas de acero AISI 1020

#### 4.4 COSTOS DE FABRICACIÓN

La determinación de costos de fabricación de la máquina, incluye dos categorías básicas de costos, los cuales son:

- 1) Costos de los materiales a utilizar en la fabricación de la máquina, como los materiales para fabricación de las probetas.
- 2) Costos de mano de obra.

Estos dos tipos, son los rubros que establecen el costo total de fabricación de la máquina. A continuación se detalla para cada uno de los numerales anteriores:

### COSTOS DE MATERIALES

Cantidad	Unidad	Descripción	Costo Unitario (¢)	Costo Total (¢)
1	—	Lámina ASTM-A36 espesor 19 mm	2440.00	2440.00
1	—	Un bloque de acero AISI-1020 de 265 x42 x200 mm	800.00	800.00
1	m	Barra acero AISI-1045 $\Phi$ 31.7 mm	150.00	150.00
2	—	Rodamientos de bolas auto-alineantes. Serie 1204	112.00	224.00
4	—	Pernos de $\Phi$ 16 mm por 150 mm de longitud	25.00	100.00
4	—	Tuercas de $\Phi$ 16 mm	5.25	5.25
4	—	Pernos de $\Phi$ 8 mm por 50 mm de longitud	4.30	17.20
4	—	Tuercas de $\Phi$ 8 mm	0.70	2.80
6	—	Pernos de $\Phi$ 10 mm por 50 mm de longitud	5.50	33.00
6	—	Tuercas de $\Phi$ 10 mm	1.25	7.50
6	Lb.	Electrodo $\Phi$ 4.7 mm	8.50	51.00
½	Gal.	Pintura gris	150.00	150.00
1/8	Gal.	Solvente R2K4	10.50	10.50
2	M	Acero AISI 1020	19.00	38.00
1	—	Fresa cilíndrica ½" x 1"	350.00	350.00
1	—	Fundación de cemento 0.8 x 0.7 x 0.3 m	875.00	875.00
1	—	Canasta para la fundación de cemento donde se ensambla la máquina.	330.00	330.00
1	—	Nivel indicador de ángulos modelo A-100	114.00	114.00
½	—	Lámina de espesor 1.6 mm	60.00	60.00

1	—	Bloque de acero AISI D-2 50 x 48 x 32 mm	400.00	400.00
1	—	Buril HSS	87.50	87.50

Subtotal: ¢ 6261.50

5% imprevistos: ¢ 313.08

Total : ¢ 6574.58

### COSTOS DE MANO DE OBRA

Descripción	Costo Total (¢)
Fabricación y rectificado de probetas	1635.00
Fabricación de la Máquina	<u>8350.50</u>
	<u>Total : 9985.50</u>

Por lo tanto el costo total de la fabricación de la máquina es:

¢ 16 560.00

# CAPITULO V

## 5.0 PRUEBAS EN MUESTRAS DE MATERIALES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Es posible plantear en la transmisión de información, para propósitos de ingeniería, que los datos no son de valor mientras no se les ha dado una forma que pueda fácilmente entenderse y utilizarse. La forma particular en que los datos deben ser recopilados y la extensión de su interpretación obviamente dependerán del auditorio previsto.

El empleo de la Estadística en el diseño mecánico proporciona un método de estudio de las características que poseen variabilidad. Los métodos estadísticos se utilizan con el fin de que puedan expresarse en términos numéricos, conceptos como la confiabilidad y la duración de una pieza o elemento.

En la actualidad, cuando suelen presentarse demandas judiciales acerca de la calidad y seguridad de uso de un producto, ya no es satisfactorio asegurar que se espera que un cierto objeto tenga una duración prolongada y libre de desperfectos sino que es necesario disponer de un medio para representar en forma numérica los conceptos de duración y confiabilidad de un producto manufacturado.

Debido a la variación en las propiedades de los materiales, la preparación de las probetas, las condiciones de ensayos, etc., es de esperar alguna dispersión en todos los resultados de ensayos para determinación de las propiedades de los materiales, aún en condiciones supuestamente idénticas.

### 5.1 SELECCIÓN DE LOS MATERIALES A SOMETER A PRUEBAS.

Por los factores de tiempo y económicos, las pruebas se realizaron solo con 21 probetas elaboradas de un acero AISI 1020. Estas probetas inicialmente son mecanizadas (sección de 5 x 10 x 55 mm) de manera que la profundidad de corte

se va reduciendo gradualmente de forma que los últimos cortes sean de 0.03 mm (0.001 pulgada) de profundidad, luego se procede a elaborar la entalla en "V" en la parte media de la probeta de la sección transversal (5 x 10 mm). Por último se procede a rectificar las probetas en dirección longitudinal para eliminar rayaduras que puedan contribuir como un concentrador de esfuerzos.

## 5.2 PROCEDIMIENTO

Antes de efectuar ensayos en un grupo de muestras, es indispensable cerciorarse que la máquina esté en las condiciones adecuadas para obtener datos reales. Para ello deben seguirse los pasos que se detallan en el apartado 4.3.

Una vez se ha verificado que la máquina está a punto, debe seguirse el procedimiento detallado en el apartado 2.5.4. y proceder al respectivo análisis de los materiales a evaluar.

## 5.3 REALIZACIÓN DE ENSAYOS Y TABULACIÓN DE LOS DATOS.

Las pruebas realizadas en la máquina de impacto Charpy, inicialmente, se dividieron en cinco grupos, el primero a una temperatura de 0° C, el segundo a 11° C, el tercero a la temperatura ambiente (26 °C), el cuarto a 42° C y el último a la temperatura de 102° C, tal como se muestra en la tabla 5.1.

Antes de determinar la energía absorbida se calculará la energía perdida en el péndulo. Las pérdidas se considerarán lineales respecto al ángulo recorrido por el péndulo.

De pruebas en vacío se obtuvieron los siguientes resultados:

Altura inicial: 0.815 m (para ángulo de 160°)

Altura final : 0.81 m ( para ángulo de 158.5°)



Por lo tanto la energía perdida será:

$$E_{\text{PERD}} = W(h_i - h_f)$$

donde:

W= peso del péndulo (122.63 N)

$h_i$ = altura inicial de caída del péndulo (0.815 m)

$h_f$ = altura final alcanzada por el péndulo ( $0.42 * (1 - \cos\theta)$ )

$$E_{\text{PERD}} = 122.63(0.815 - 0.81)$$

$$E_{\text{PERD}} = 0.52 \text{ Joules}$$

Como el recorrido del péndulo es básicamente simétrico con respecto al límite inferior, esto indica que al pasar el péndulo por el límite inferior habrá una pérdida de 0.26 Joules durante la etapa de caída y la restante energía perdida puede variar de acuerdo con el ángulo recorrido por el péndulo después del impacto, lo cual se asumirá como una fracción de 0.26 Joules proporcional al ángulo indicado en el medidor.

$$E_{\text{Perdida}} = 0.26 + 0.26(\theta/160)$$

Para calcular los valores de energía absorbida por la probeta se utilizará la siguiente ecuación, en la cual la energía potencial esta calculada en base al ángulo inicial y final leídos en el medidor:

$$E_{\text{ABS}} = W(h_i - h_f) - E_{\text{perdida}}$$

$$E_{\text{ABS}} = 122.63[0.815 - 0.42(1 - \cos\theta)] - \left(0.26\left(1 + \frac{\theta}{160}\right)\right) \text{ (Joules) Ec 5.1}$$

16.5

TABLA 5.1 TABULACIÓN DE LOS DATOS

Nº	TEMPERATURA (°C)	LECTURA LEIDA EN EL INDICADOR DE ANGULO (Grados)	ENERGÍA ABSORBIDA CUANDO OCURRE LA FALLA † (Joule)
1	0	137.5	10.0
2		137.5	10.0
3		141.0	7.9
4		144.0	6.3*
5	11	137.0	10.3
6		133.0	12.8
7		133.5	12.5
8		133.5	12.5
9	26	145.0	5.8*
10		145.0	5.8*
11		133.5	12.5
12		131.0	14.2
13		133.5	14.5
14	42	127.0	17.0
15		128.0	16.3
16		127.5	16.6
17		125.5	18.1
18	102	125.0	18.4
19		135.0	11.5*
20		125.0	18.4
21		126.0	17.7

\* Estos valores no se tomaron en cuenta para realizar el análisis del acero 1020, ya que se dedujo por la energía absorbida, que el material es otro acero diferente al 1020 debido a que durante el proceso de fabricación de las probetas, se utilizó al inicio una barra de acero para la fabricación de ellas y posteriormente se utilizó otra barra para completar cierto número de probetas para la realización de los ensayos, siendo esta última barra un acero diferente.

† Estos valores se obtuvieron según ecuación 5.1

#### 5.4 ANÁLISIS DE LOS DATOS Y RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

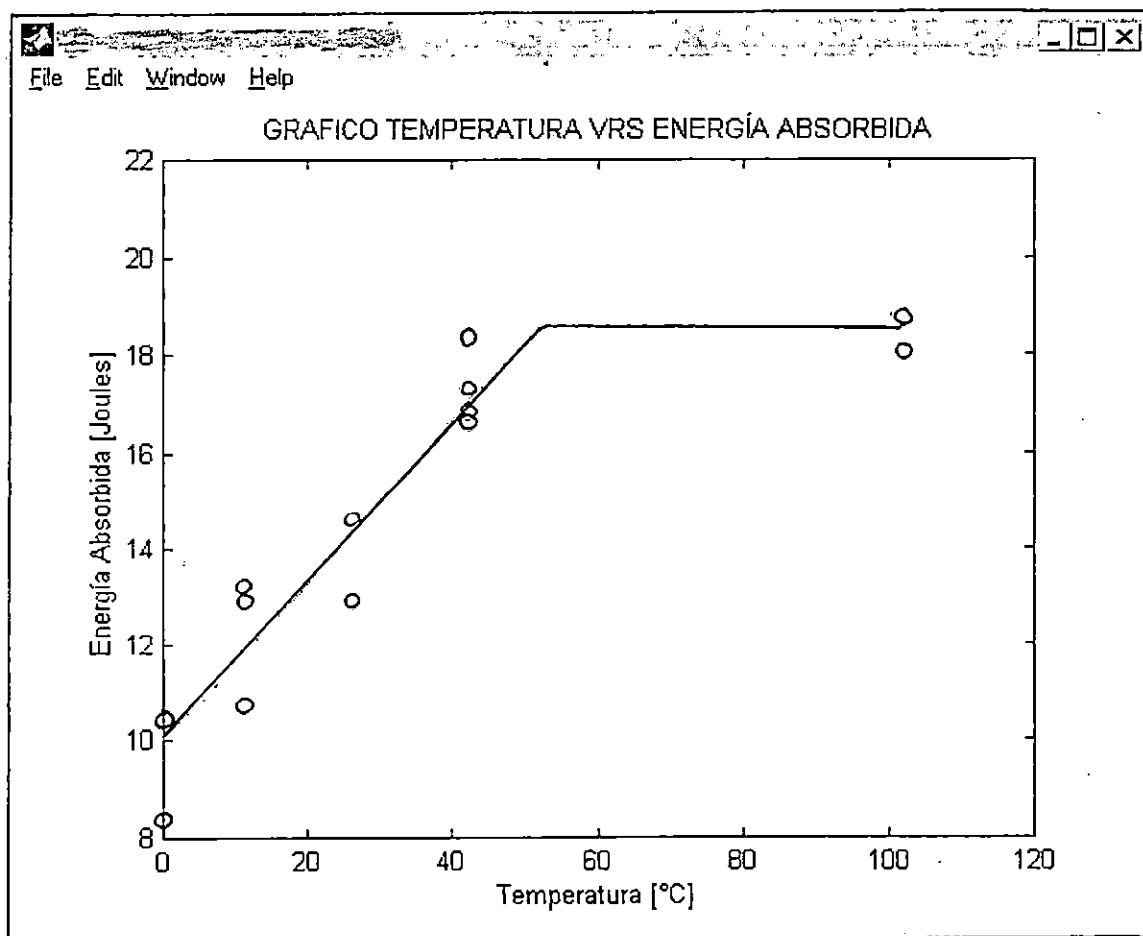
Ya que los resultados de los ensayos por impacto no son constantes para condiciones similares, al hacer un estudio sobre este tipo de fractura, en cualquier

material, se necesitará realizar varias pruebas para obtener un punto representativo de la gráfica energía absorbida vrs. temperatura.

Siempre se debe tomar en cuenta el hecho de que en este tipo de ensayo, los resultados solo serán comparables bajo las mismas condiciones y con el mismo tipo de probetas utilizadas en el ensayo, por lo que los resultados obtenidos no pueden ser utilizados como parámetros de diseño de elementos mecánicos.

Los resultados se muestran en la tabla 5.1 y con dichos datos se obtiene la gráfica 5.1 (energía absorbida vrs. temperatura).

Grafico 5.1



## 5.5 CONCLUSIONES

- ✓ La tendencia de energía absorbida obtenida de los ensayos (grafico 5.1) se asemeja a la tendencia de ensayos normalizados y certificados según la figura 1.45 para un acero de bajo carbono (0.2% C y probeta estándar 10x10x55 mm).
- ✓ La energía absorbida por el acero AISI 1020 varía con la temperatura según lo siguiente:
  - A mayor temperatura la energía absorbida se incrementa hasta un máximo en donde la energía absorbida se vuelve constante.
- ✓ Todas las probetas fallan en la sección de la entalla ya que en ella se producen esfuerzos muy grandes debido a la configuración del concentrador.
- ✓ A temperaturas menores que la ambiente la ruptura de la probeta tiene características frágiles, notándose una superficie rugosa y uniforme.
- ✓ Al comparar los valores obtenidos con los suministrados por medio de una máquina universal a condiciones similares (anexo 14, a temperatura ambiente), se puede garantizar que estos valores son confiables, ya que existe una diferencia del tres por ciento con los valores obtenidos.
- ✓ La eficiencia de la máquina es del 99.5% ya que en ella se producen pérdidas por rozamiento en los rodamientos del eje del péndulo y en el aparato de medición.

## 5.6 OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Consideramos que el número de pruebas que se efectuaron durante la elaboración del trabajo de graduación no son las suficientes para determinar resultados confiables.
- ✓ Del ensayo de dureza realizado a las probetas se observó que existe una diferencia apreciable entre el material de las probetas (101 HRB) y el acero AISI 1020 (55-76 HRB).
- ✓ Al efectuar cualquier ensayo a temperaturas diferentes de la ambiente, el tiempo desde que se saca la probeta del medio en que está inmersa hasta la realización del ensayo debe ser menor o igual a 5 segundos, ya que la temperatura de la probeta puede variar grandemente en pocos segundos, haciendo que los resultados del ensayo no sean confiables.
- ✓ Recomendamos hacer pruebas de distintos distribuidores de aceros y así poder comparar la calidad de aceros que distribuyen.
- ✓ Si no existe forma de garantizar que el material a ensayar tiene las propiedades que indica su carta técnica, es recomendable realizar otro tipo de ensayo para verificar sus propiedades (metalografía, dureza, etc.).
- ✓ A las probetas a ensayar se les debe realizar un tratamiento térmico (recocido), para evitar esfuerzos residuales, producidos durante el maquinado de dichas probetas.
- ✓ Para la medición de la temperatura de la probeta un instante antes del impacto se recomienda utilizar un termómetro óptico con la siguientes características:

MARCA	: 3M
MODELO	: IR-16
RANGO	: -100° C A 1500° C
MENOR DIVISION	: 1° C

# CAPITULO VI

## 6.0 MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

### 6.1 MANUAL DE OPERACIÓN

Con el propósito de asegurar un funcionamiento óptimo de la máquina para ensayo de impacto Charpy, y de disminuir fallas debido a mal uso durante la operación, se presenta la secuencia de pasos a seguir durante la realización del ensayo:

1. Colocar la aguja del indicador de energía en la posición cero, de manera que el medidor haga tope con el eje del péndulo cuando este se encuentra en la posición de descanso.
2. Llevar el péndulo hasta su posición de disparo; teniendo siempre presente que se debe colocar por seguridad el pin para evitar accidentes.
3. Verificar que el eje de la entalla de la probeta coincida con el eje de la barra del péndulo
4. Colocar la probeta entre los soportes de la máquina, con la entalla en "V", viendo hacia adentro de la máquina. Cuando la probeta está a una temperatura diferente de la ambiente, se tienen 5 segundos como máximo para efectuar el ensayo desde que la probeta se saca del medio donde se encuentra inmersa.
5. Accionar la palanca de disparo para realizar el ensayo.
6. Tomar la lectura obtenida (en grados) y verificar la energía absorbida en el anexo 13.
7. Repetir el procedimiento anterior, para otro ensayo.

## 6.2 MANUAL DE MANTENIMIENTO

Las fallas en servicio de cualquier equipo, puede evitarse o disminuirse por el mantenimiento regular.

Con el fin de lograr lo anterior se considera los tres tipos de mantenimiento: Mantenimiento Preventivo, Mantenimiento Predictivo y Mantenimiento Correctivo.

De los tres tipos de mantenimiento analizaremos el mantenimiento preventivo, ya que este se realizará cuando la máquina o equipo no ha sufrido alguna falla o interrupción.

### 6.2.1 Mantenimiento Preventivo

Este mantenimiento consiste en una serie de intervenciones periódicas, que es necesario realizar para que la máquina o equipo no falle. Para nuestro caso se sugiere que las revisiones de la máquina se realicen semanalmente, trimestralmente y anualmente, dado que la utilización de la máquina se destina para uso de laboratorio.

#### 6.2.1.1 Semanalmente

- Efectuar una limpieza general con aire comprimido en la parte superficial de los elementos de la máquina.
- Colocar una película de aceite a los elementos desprotegidos del medio ambiente (eje, soportes para la probeta, etc).



#### 6.2.1.2 Trimestralmente

- Revisar todos los elementos de sujeción (pernos, prisioneros, etc), de estar flojos darles el debido apriete.
- Revisar el alineamiento del eje entre los soportes (con un nivel)
- Lubricar los rodamientos con grasa NLGI No. 2.
- Revisar o calibrar el medidor de energía.

#### 6.2.1.2 Anualmente

- Revisión de los rodamientos.
- Revisión del dispositivo de disparo.
- Darle un recubrimiento con pintura.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Principios de Metalúrgica Física  
Robert E. Reed – Hill  
2ª Edición, CECSA
2. Ciencia e Ingeniería de los Materiales  
Donald R. Askeland  
1ª Edición, Grupo Editorial Iberoamerica
3. Introducción a la Metalurgia Física  
SYDNEY H. AVNER  
2ª Edición, McGraw-Hill
4. Ciencia de Materiales para Ingeniería  
Peter. A. Thornton  
1ª Edición. Prentice Hall – Hispanoamericana S.A.
5. Naturaleza y Propiedades de los materiales para ingeniería  
ZBIGNIEW D. JASTRZEBKI  
2ª Edición, Interamericana
6. Metalurgia Mecánica  
George E. Dieter
7. Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales  
William F. Smith  
2ª edición, McGraw-Hill

8. Ciencia de los Materials  
J.C. Anderson  
1ª Edición, LIMUSA
  
9. Materiales y Procesos de Manufactura  
Para Ingenieros  
Laurence E. Doyle  
Prentice Hall Hispanoamericana S.A.
  
10. Ensayos No Destructivos  
Jorge A. Seaman  
ITEM S.A. DE C.V.
  
11. Procesos Básicos de Manufactura  
H. C. Kazanas  
1ª Edición  
Editorial McGraw – Hill
  
12. Mecánica de Fractura  
Luis A. de Vedia  
1ª Edición, Editorial CNEA – AC 13/86
  
13. Ensayo e Inspección en Ingeniería de Materiales  
Davis Harmer  
2ª Edición, Compañía Editorial Continental S.A.  
México, 1967
  
14. Anual Book ASTM Estándar, 1996,  
Vol. 3, parte 1.

15. Normas IRAM – IAS U-500-17 y V-500 - 18  
Argentina
16. Normas UNE 7 – 290 – 72 y UNE 7-475 – 92
17. Proyecto de Ingeniería  
Análisis y Diseño de una Máquina tipo Péndulo para  
Ensayos a la Flexión por Impacto.  
Br. Jorge Alberto Fuentes Hidalgo
18. Catálogo de Rodamientos FAG  
41000 s
19. Diseño en Ingeniería Mecánica  
Joseph Edward Shigley.  
5ª edición  
Editorial McGraw-Hill
20. Mecánica para Ingenieros- Estática  
Russell C. Hibbeler  
3ª edición  
Editorial Continental
21. Mecánica de Materiales  
Ferdinand P. Beer  
1ª edición  
Editorial McGraw-Hill

22. Fundamentos de Diseño para Ingeniería Mecánica.  
Robert C. Juvinall  
1ª edición, 1981  
Editorial Limusa
  
23. Diseño y Construcción de una Máquina para efectuar Pruebas de Flexión Rotativa en Materiales Metálicos.  
José Manuel Tovar  
1996
  
24. Diseño y Construcción de una Máquina para Pruebas de Torsión en Materiales Metálicos.  
Ángel Arnulfo Guevara  
1995

## GLOSARIO

**Austenita:** Solución sólida de uno o mas elementos en hierro cúbico centrado en la cara. En general, se supone que el carbono es el soluto.

**Catetómetro:** Instrumento de medición de ángulos.

**Clivaje:** La separación ( fractura ) de un cristal sobre un plano cristalográfico de bajo índice.

**Constantán:** Grupo de aleaciones al cobre-níquel que contiene de 45% a 60% de Cu con menores cantidades de hierro y manganeso, y caracterizado por una resistividad eléctrica relativamente constante, independiente de la temperatura; utilizado en resistores y termopares.

**CC:** Estructura cúbica de cuerpo centrada

**CCC:** Estructura cúbica de cara centrada.

**Ductilidad:** Capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por la elongación o reducción de área en un ensayo de tracción.

**Estrías:** Acanaladuras o rayas profundas en la superficie de un material.

**Fragilidad:** Calidad de un material que da lugar a la propagación de fisuras sin deformación plástica apreciable.

**Hierro forjado:** Hierro comercial que consta de fibras de escoria (silicato de hierro) introducidas en una matriz de ferrita.

**Macla:** Dos porciones de un cristal con una relación cristalográfica definida; una puede considerarse como el padre, y la otra como la macla ( o gemelo ). La orientación de la macla es una imagen especular de la orientación del padre respecto a un plano de macla o una orientación que puede derivarse al rotar la porción de macla respecto a un eje de macla.

**Normalización:** Calentar una aleación ferrosa a una temperatura adecuada por arriba del intervalo de temperatura de transformación y luego enfriar en aire a una temperatura sustancialmente inferior al intervalo de transformación.

**Nucleación:** Inicio de una transformación de fase en sitios discretos, creciendo la nueva fase.

**Percutor:** Pieza que golpea la probeta en una máquina.

**Templado:** Enfriamiento brusco de los metales para modificar sus propiedades.

**Tenacidad:** Capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse.

**Temperatura de transición:** a) Temperatura arbitrariamente definida dentro del intervalo de temperatura en el que las características de fractura del metal, determinadas generalmente por ensayos muescados, cambian con rapidez; por ejemplo: desde fractura fibrosa principalmente( corte ) hasta cristalina ( clivaje ). Las definiciones que más se utilizan son temperatura de transición para fractura al 50% de clivaje, temperatura de transición a 10 Lb – pie y temperatura de transición para energía media máxima. b) Alguna veces también se emplea para denotar la temperatura arbitrariamente definida en un intervalo en el que la ductilidad cambia en forma rápida con la temperatura.

## ANEXOS



ANEXO 1

Características y propiedades mecánicas a la tensión de algunos aceros rolados en caliente (HR) y estirados en frío (CD).

[Las resistencias indicadas son valores mínimos ASTM estimados en el intervalo de tamaños de 18 a 32 mm (¾ a 1¼ in). Tales resistencias son adecuadas para el uso con el factor de diseño definido en la sección 1-9, siempre que los materiales cumplan los requisitos ASTM A6 o A568, o sean requeridos en las especificaciones de compra. Conviene recordar que una designación numérica no es una especificación. Ref. 1-9 Pag 859

1	2	3	4	5	6	7	8
UNS NÚM.	SAE Y/O AISI NO.	PROCESAMIENTO	RESISTENCIA ÚLTIMA, MPa (kpsi)	RESISTENCIA DE FLUENCIA, MPa (kpsi)	ELONGACIÓN EN 2 in, %	REDUCCIÓN EN ÁREA %	DUREZA BRINELL
G10060	1006	HR	300 (43)	170 (24)	30	55	86
		CD	330 (48)	280 (41)	20	45	95
G10100	1010	HR	320 (47)	180 (26)	28	50	95
		CD	370 (53)	300 (44)	20	40	105
G10150	1015	HR	340 (50)	190 (27.5)	28	50	101
		CD	390 (56)	320 (47)	18	40	111
G10180	1018	HR	400 (58)	220 (32)	25	50	116
		CD	440 (64)	370 (54)	15	40	126
G10200	1020	HR	380 (55)	210 (30)	25	50	111
		CD	470 (68)	390 (57)	15	40	131
G10300	1030	HR	470 (68)	260 (37.5)	20	42	137
		CD	520 (76)	440 (64)	12	35	149
G10350	1035	HR	500 (72)	270 (39.5)	18	40	143
		CD	550 (80)	460 (67)	12	35	163
G10400	1040	HR	520 (76)	290 (42)	18	40	149
		CD	590 (85)	490 (71)	12	35	170
G10450	1045	HR	570 (82)	310 (45)	16	40	163
		CD	630 (91)	530 (77)	12	35	179
G10500	1050	HR	620 (90)	340 (49.5)	15	35	179
		CD	690 (100)	580 (84)	10	30	197
G10600	1060	HR	680 (98)	370 (54)	12	30	201
G10800	1080	HR	770 (112)	420 (61.5)	10	25	229
G10950	1095	HR	830 (120)	460 (66)	10	25	248

continuación A NEXO 1

Propiedades mecánicas a la tensión de algunos aceros con tratamiento térmico. [Son propiedades comunes de materiales normalizados y recocidos. Las propiedades para aceros templados y revenidos (*Quenched and Tempered, Q & T*) corresponden a un solo calor o grado. Debido al gran número de variables, las propiedades enunciadas podrían considerarse obtenibles pero no deben tomarse como valores medios o mínimos. En todos los casos, los datos proceden de probetas con diámetro igual o 0.505 in, maquinadas a partir de barras redondas de 1 in; la longitud de calibración es 2 in. A menos que se indique otra cosa, todas las probetas o muestras de ensayo se templaron en aceite.] Ref. 19 Pag 860

1	2	3	4	5	6	7	8
AISI NÚM.	TRATAMIENTO	TEMPERATURA °C (°F)	RESISTENCIA ÚLTIMA, MPa (kpsi)	RESISTENCIA DE FLUENCIA, MPa (kpsi)	ELONGACIÓN %	REDUCCIÓN DE ÁREA, %	DUREZA BRINELL
1030	Q&T*	205 (400)	848 (123)	648 (94)	17	47	495
	Q&T*	315 (600)	800 (116)	621 (90)	19	53	401
	Q&T*	425 (800)	731 (106)	579 (84)	23	60	302
	Q&T*	540 (1000)	669 (97)	517 (75)	28	65	255
	Q&T*	650 (1200)	586 (85)	441 (64)	32	70	207
	Normalizado Recocido	925 (1700) 870 (1600)	521 (75) 430 (62)	345 (50) 317 (46)	32 35	61 64	149 137
1040	Q&T	205 (400)	779 (113)	593 (86)	19	48	262
	Q&T	425 (800)	758 (110)	552 (80)	21	54	241
	Q&T	650 (1200)	634 (92)	434 (63)	29	65	192
	Normalizado Recocido	900 (1650) 790 (1450)	590 (86) 519 (75)	374 (54) 353 (51)	28 30	55 57	170 149
1050	Q&T*	205 (400)	1120 (163)	807 (117)	9	27	514
	Q&T*	425 (800)	1090 (158)	793 (115)	13	36	444
	Q&T*	650 (1200)	717 (104)	538 (78)	28	65	235
	Normalizado Recocido	900 (1650) 790 (1450)	748 (108) 636 (92)	427 (62) 365 (53)	20 24	39 40	217 187
1060	Q&T	425 (800)	1080 (156)	765 (111)	14	41	311
	Q&T	540 (1000)	965 (140)	669 (97)	17	45	277
	Q&T	650 (1200)	800 (116)	524 (76)	23	54	229
	Normalizado Recocido	900 (1650) 790 (1450)	776 (112) 626 (91)	421 (61) 372 (54)	18 22	37 38	229 179
	1095	Q&T	315 (600)	1260 (183)	813 (118)	10	30
Q&T		425 (800)	1210 (176)	772 (112)	12	32	363
Q&T		540 (1000)	1090 (158)	676 (98)	15	37	321
Q&T		650 (1200)	896 (130)	552 (80)	21	47	269
Normalizado Recocido		900 (1650) 790 (1450)	1010 (147) 658 (95)	500 (72) 380 (55)	9 13	13 21	293 192
1141	Q&T	315 (600)	1460 (212)	1280 (186)	9	32	415
	Q&T	540 (1000)	896 (130)	765 (111)	18	57	262
4130	Q&T*	205 (400)	1630 (236)	1460 (212)	10	41	467
	Q&T*	315 (600)	1500 (217)	1380 (200)	11	43	435
	Q&T*	425 (800)	1280 (186)	1190 (173)	13	49	380
	Q&T*	540 (1000)	1030 (150)	910 (132)	17	57	315
	Q&T*	650 (1200)	814 (118)	703 (102)	22	64	245
	Normalizado Recocido	870 (1600) 865 (1585)	670 (97) 560 (81)	436 (63) 361 (52)	25 28	59 56	197 156
	4140	Q&T	205 (400)	1770 (257)	1640 (238)	8	38
Q&T		315 (600)	1550 (225)	1430 (208)	9	43	445
4140	Q&T	425 (800)	1250 (181)	1140 (165)	13	49	370
	Q&T	540 (1000)	951 (138)	834 (121)	18	58	285
	Q&T	650 (1200)	758 (110)	655 (95)	22	63	230
	Normalizado Recocido	870 (1600) 815 (1500)	1020 (148) 655 (95)	655 (95) 417 (61)	18 26	47 57	302 197
	4340	Q&T	315 (600)	1720 (250)	1590 (230)	10	40
Q&T		425 (800)	1470 (213)	1360 (198)	10	44	430
Q&T		540 (1000)	1170 (170)	1080 (156)	13	51	360
Q&T		650 (1200)	965 (140)	855 (124)	19	60	280

\*Templado en agua

Fuente: ASM Metals Reference Book, 2d ed., American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1983.

ANEXO 1. Propiedades mecánicas de algunas Aceros Comerciales.

DENOMINACION	NORMA AISI SAE	ALEACION APROXIMADA %								TRATAMIENTO
		C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	W	V	
Acero de Transmisión	1020	0.20	0.20	0.65						NORMALIZADO
Acero al Carbono	1045	0.45	0.22	0.75						RECOCIDO
Barra perforada	1518	0.18	0.30	1.40						RECOCIDO
Assab 7210 M	3115	0.15	0.25	0.90	0.80	1.20	0.10			RECOCIDO
Assab 709 M	4140	0.42	0.25	0.75	1.05		0.20			BONIFICADO
Assab 705 M	4340	0.35	0.25	0.70	1.40	1.40	0.20			BONIFICADO
UHB ARNE	0-1	0.90		1.20	0.50			0.50	0.10	RECOCIDO
UHB SVERKER 21	D-2	1.55	0.30	0.30	12		0.80		0.80	RECOCIDO
ACERO INOXIDABLE	304	0.05	0.50	1.00	18.40	0.90				RECOCIDO

ANEXO 1 (Continuación)

NORMA AISI SAE	ESTADO DE ENTREGA		PROPIEDADES MECANICAS		
	(BRIN) DUREZA BRINELL	CODIGO DE COLOR	RESISTENCIA A LA TRACCION(Kg/mm <sup>2</sup> )	LIMITE DE FUERZA(Kg/mm) <sup>2</sup>	DUREZA DESPUES DE TRATAMIENTO (HRC)
1020	100 - 140	ROSADO	32 - 37	23 - 27	
1045	180	BLANCO	60	35	40 - 55
1518	162	VERDE	52 - 62	36	55 - 60
3115	215	AZUL - PLATA	70 - 100	45	50 - 60
4140	245 - 320	AZUL BLANCO	82 - 96	61	55 - 60
4340	275 - 335	AZUL ORO	91 - 112	71	55 - 60
0-1	190	AMARILLO			50 - 62
D-2	210	AMARILLO BLANCO	70 - 80	65	50 - 64
304	165 - 200	NARANJA	62	33	

ANEXO 1 (Continuación)

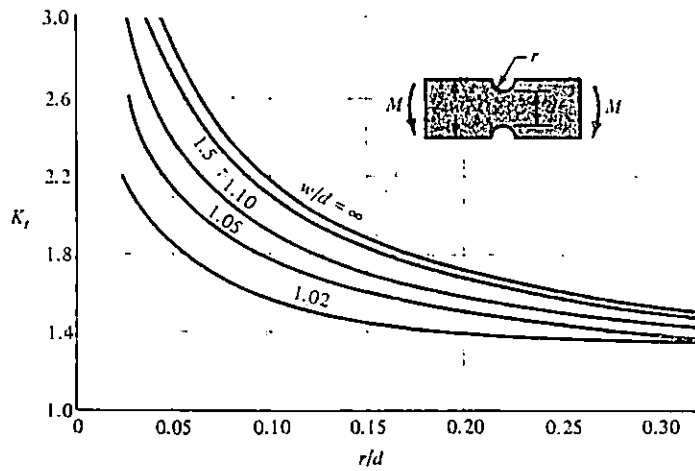
NORMA AISI SAE	CARACTERISTICAS Y APLICACIONES											
1 0 2 0	<p><b>AISI 1020</b> Acero calibrado en frío, fácil de maquinar y soldar. Se utiliza para ejes en general donde la resistencia a la tracción no es severa. Entre sus aplicaciones están: Construcción de partes de maquinaria, pernos, pines de sujeción, utillaje, pernos, etc.</p>											
1 0 4 5	<p><b>AISI 1045</b> Acero al carbono, fácilmente maquinable, con excelentes propiedades mecánicas. Es templable y puede soldarse bajo métodos adecuados. Se utiliza para ejes, porta-punzones, porta-dados, porta-cuchillas, placas de guías, placas de respaldo, bastidores, conductoras de bagazo de caña, de coronas, herramientas sencillas, utillaje.</p>											
1 5 1 8	<p><b>AISI 1518</b> Barras perforadas de acero al manganeso, con buenas propiedades mecánicas, fácil de maquinar, soldable y permite cementación. Se utiliza para la construcción de anillos, casquetes, bujes, rodillos, guías, portanatrices para troqueles, cilindros para prensas hidráulicas, extrusoras, soportes de chumacera, extensiones de brocas para sondeo de suelo, etc.</p>											
3 1 1 5	<p><b>ASSAB 7210 M.</b> Acero aleado para cementación, maquinable, diseñado para la fabricación de piezas donde se requiere excelente tenacidad en el núcleo y alta resistencia al desgaste superficial. Entre sus aplicaciones típicas están los componentes de transmisión de la industria automotriz: Muñones, pines, flechas, engranajes rectos, cónicos, helicoidales; etc.</p> <table border="0" style="width: 100%; margin-left: 100px;"> <tr> <td style="width: 50%;"></td> <td style="text-align: center;">GAS</td> <td style="text-align: right;">880° a 950 °C</td> </tr> <tr> <td>T° de carburación Polvo:</td> <td style="text-align: center;">880 °C a 925 °C</td> <td>T° Temple</td> <td style="text-align: right;">780° a 830 °C</td> </tr> <tr> <td>Baño de sal</td> <td style="text-align: center;">850 °C a 900 °C</td> <td>Revenido</td> <td style="text-align: right;">160° a 200 °C</td> </tr> </table>		GAS	880° a 950 °C	T° de carburación Polvo:	880 °C a 925 °C	T° Temple	780° a 830 °C	Baño de sal	850 °C a 900 °C	Revenido	160° a 200 °C
	GAS	880° a 950 °C										
T° de carburación Polvo:	880 °C a 925 °C	T° Temple	780° a 830 °C									
Baño de sal	850 °C a 900 °C	Revenido	160° a 200 °C									
4 1 4 0	<p><b>ASSAB 709 M</b> Acero para maquinaria aleado al Cromo-molibdeno, con excelente resistencia a la tracción, Como norma el ASSAB 709 M es suministrado bonificado, no requiere tratamiento térmico posterior, sin embargo puede templarse para aumentar sus propiedades mecánicas. Soldable con precaución. Se utiliza para ejes que trabajen dentro de un margen normal de esfuerzo, engranajes para cadena, pines, tuercas, pernos, rotores de ventilador calderas etc. Temperatura de temple: 830 - 850°, Alivio de tensiones después de desbastado: 450°-550°C Temperatura Revenido: 500°-600 °C</p>											

ANEXO 1 (Continuación)

NORMA AISI SAE	CARACTERISTICAS Y APLICACIONES
4340	<p><b>ASSAB 705 M</b>                      Acero para maquinaria aleado al cromo, molibdeno, Níquel.                      Combina alta resistencia con buena tenacidad, diseñado para trabajos sujetos a severos esfuerzos de torsión y tracción. Como norma el ASSAB705 M es suministrado bonificado, no requiriendo tratamiento térmico posterior; sin embargo, puede templarse para aumentar sus propiedades mecánicas.</p>
0-1	<p><b>UHB ARNE:</b>                      Acero al Manganeso-Cromo-Tungsteno para trabajo en frío, con excelente estabilidad dimensional en el temple, combina elevada dureza superficial con buena tenacidad. Se conoce como acero - plata cuando se suministrada rectificado y entre sus usos están la fabricación de herramientas para cizallado, punzonado, troquelado, desbarbado, tronzado, doblado, embutido profundo, expulsores, como también brocas, machuelos de roscar, puntos de torno, etc.                      Temperatura de Temple: 790°-850°C                      Alivio de tensiones después de desbastado: 650° Temperatura de Revenido: 200°-600°C</p>
D-2	<p><b>UHB SVERKER 21.</b>                      Acero al Cromo-Molibdeno-Vanadio, con alto contenido de carbono, para la fabricación de herramientas para trabajos en frío. Tiene buenas propiedades de endurecimiento, alta estabilidad en el temple, resistencia al desgaste superficial y de moderada tenacidad.                      Se utiliza en la fabricación de herramientas para estampado ordinario y fino, perforación, cizallado, corte y desbastado de piezas forjadas, cuchillas desmenuzadoras de plástico, troqueles, matrices, escariadores, fresas, hileras para extrusión en frío, punzones, herramientas de medición calibres, etc.                      Temperatura de Temple: 990°- 1050°C                      Alivio de tensiones después de desbastado: 650° Temperatura de Revenido: 200°-600°C</p>
304	<p><b>AISI 304</b>                      Acero inoxidable calidad auténtica con excelentes propiedades mecánicas, soldable, resistencia a algunos ácidos y sales. Se utiliza en la industria alimenticia y azucarera, también para la fabricación de tuberías para lavado de pulpa de papel, tuberías para secadoras, equipo para manejo de ácido nítrico y fertilizantes nitrogenados, muebles de cocina, cacerolas, ollas, máquinas lavadoras, compuertas de válvula, etc.</p>

LOS FACTORES SE BASAN EN LA RESISTENCIA  
DE FLUENCIA

1.  $N = 1.25$  a  $1.5$  para materiales excepcionalmente confiables que se usan bajo condiciones controladas y sujetos a cargas y esfuerzos que puede determinarse con certeza; usados en forma casi invariable donde el bajo peso es una consideración particularmente importante.
2.  $N = 1.5$  a  $2$  para materiales bien conocidos, bajo condiciones razonablemente constantes del ambiente, sujetos a cargas y esfuerzos que pueden determinarse fácilmente.
3.  $N = 2$  a  $2.5$  para materiales promedio que operan en ambientes comunes y sujetos a cargas y esfuerzos que pueden determinarse.
4.  $N = 2.5$  a  $3$  para materiales frágiles o para los que no han sido examinados bajo condiciones promedio del ambiente, carga y esfuerzo.
5.  $N = 3$  a  $4$  para materiales que no se han examinado y que se han usado bajo condiciones promedio de ambiente, carga y esfuerzo.
6.  $N = 3$  a  $4$  debe usarse también con materiales mejor conocidos que se usarán en medios inciertos o estarán sometidos a esfuerzos indeterminados.
7. Cargas repetidas: los factores establecidos en los puntos 1 a 6 son aceptables, pero se deben aplicar a *la resistencia a la fatiga* y no a la resistencia a la cedencia del material.
8. Fuerzas de impacto: los factores dados en los puntos 3 a 6 son aceptables, pero se debe incluir un *factor por impacto*.
9. Materiales frágiles: si la resistencia final se usa como el máximo teórico, los factores presentados en los puntos 1 a 6 se deben casi duplicar.
10. Cuando son favorables factores más altos, se debe realizar un análisis más cuidadoso del problema antes de decidir su uso.










ANEXO 3 Diagramas de factores de concentración de esfuerzo teórico  $K_t$ .  
 Barra rectangular con ranuras transversales sometida a flexión.  $\sigma_o = Mc/I$ , donde  $c = d/2$ ,  $I = td^3/12$ , y  $t$  es el espesor. Ref. 19 Pag 845

ANEXO 4 Características de roscas métricas de-paso fino y-de paso basto. (Todas las dimensiones están en milímetros)\* Ref. 19 Pag 36 9

DIÁMETRO MAYOR NOMINAL $d$	SERIE DE PASO BASTO			SERIE DE PASO FINO		
	PASO $p$	ÁREA DE ESFUERZO DE TENSIÓN $A_t$	ÁREA AL DIÁMETRO MENOR $A_r$	PASO $p$	ÁREA DE ESFUERZO DE TENSIÓN $A_t$	ÁREA AL DIÁMETRO MENOR $A_r$
1.6	0.35	1.27	1.07			
2	0.40	2.07	1.79			
2.5	0.45	3.39	2.98			
3	0.5	5.03	4.47			
3.5	0.6	6.78	6.00			
4	0.7	8.78	7.75			
5	0.8	14.2	12.7			
6	1	20.1	17.9			
8	1.25	36.6	32.8	1	39.2	36.0
10	1.5	58.0	52.3	1.25	61.2	56.3
12	1.75	84.3	76.3	1.25	92.1	86.0
14	2	115	104	1.5	125	116
16	2	157	144	1.5	167	157
20	2.5	245	225	1.5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3.5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4.5	1120	1050	2	1260	1230
48	5	1470	1380	2	1670	1630
56	5.5	2030	1910	2	2300	2250
64	6	2680	2520	2	3030	2980
72	6	3460	3280	2	3860	3800
80	6	4340	4140	1.5	4850	4800
90	6	5590	5360	2	6100	6020
100	6	6990	6740	2	7560	7470
110				2	9180	9080



ANEXO 5  
Especificaciones mecánicas métricas para pernos, tornillos comunes y tornillos de presión o prisioneros de acero.\* Ref. 19 Pág. 388

CLASE DE PROPIEDAD	INTERVALO DE TAMAÑOS INCLUSIVE	RESISTENCIA LÍMITE MÍNIMA A LA TENSIÓN MPa	RESISTENCIA ÚLTIMA MÍNIMA A LA TENSIÓN MPa	RESISTENCIA DE FLUENCIA MÍNIMA A LA TENSIÓN MPa	MATERIAL	MARCA DE CABEZA
4.6	M5-M36	225	400	240	Acero de mediano o bajo carbono	
4.8	M1.6-M16	310	420	340	Acero de mediano o bajo carbono	
5.8	M5-M24	380	520	420	Acero de mediano o bajo carbono	
8.8	M16-M36	600	830	660	Acero de mediano o bajo carbono, T y R	
9.8	M1.6-M16	650	900	720	Acero de mediano o bajo carbono, T y R	
10.9	M5-M36	830	1040	940	Acero martensítico de bajo carbono, T y R	
12.9	M1.6-M36	970	1220	1100	Acero de aleación, T y R	

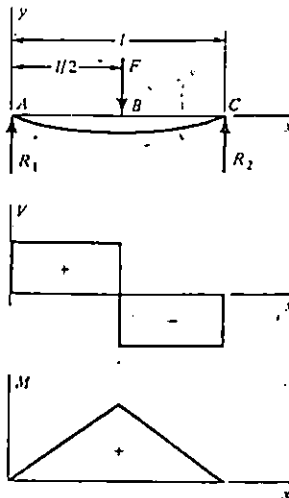
\*La longitud roscada para pernos y tornillos de maquinaria es

$$L_r = \begin{cases} 2d + 6 & L \leq 125 \\ 2d + 12 & 125 < L \leq 200 \\ 2d + 25 & L > 200 \end{cases}$$

donde  $L$  es la longitud total del sujetador. La longitud de la cuerda para pernos estructurales es ligeramente menor que la indicada.

ANEXO 6  
Cortante, momento y deflexión de vigas. Ref. 19 Pág. 833

Apoyos simples. Carga en el centro



$$R_1 = R_2 = \frac{F}{2} \quad V_{AB} = R_1$$

$$V_{BC} = -R_2$$

$$M_{AB} = \frac{Fx}{2} \quad M_{BC} = \frac{F}{2}(l-x)$$

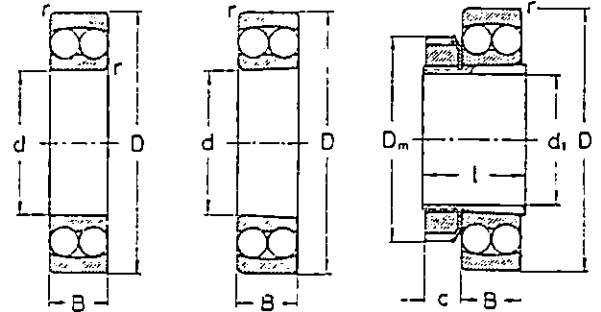
$$y_{AB} = \frac{Fx}{48EI}(4x^2 - 3l^2)$$

$$y_{max} = -\frac{Fl^3}{48EI}$$

# Rodamientos FAG oscilantes de bolas

Serie 12 y 12 K  
Serie 12 K/H 2

según DIN 630  
según DIN 630 y DIN 5415



Rodamientos con agujero cilíndrico

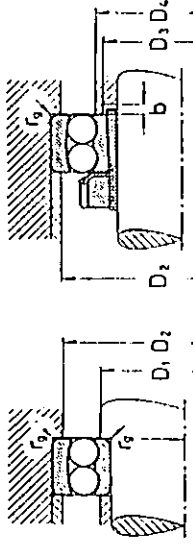
Rodamientos con agujero cónico. Cono 1 : 12

Rodamientos con agujero cónico y manguito de montaje

## Dimensiones · Capacidades de carga · Factores

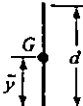
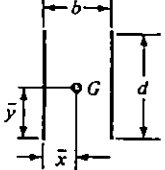
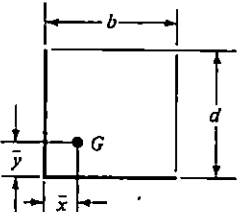
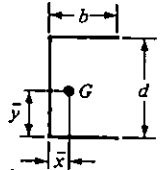
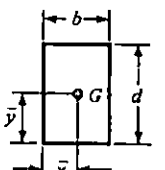

Denominación abreviada			Dimensiones							Capacidades de carga								
										dinámica		$\frac{F_a}{F_r} \leq e$		$\frac{F_a}{F_r} > e$		estática		
Rodamientos con agujero cilíndrico	Rodamientos con agujero cónico	Rodamientos con agujero cónico y manguito de montaje	d	D	B	r mm	d <sub>1</sub>	l	D <sub>m</sub>	c	C kg	e	X	Y	X	Y	C <sub>0</sub> kg	Y <sub>0</sub>
12 00			10	30	9	1					430	0,32	1	2,0	0,65	3,0	137	2,1
12 01			12	32	10	1					440	0,37	1	1,7	0,65	2,6	150	1,8
12 02			15	35	11	1					585	0,34	1	1,9	0,65	2,9	204	1,9
12 03			17	40	12	1					620	0,33	1	1,9	0,65	3,0	245	2,0
12 04	12 04 K	12 04 K/H 204	20	47	14	1,5	17	24	32	7	780	0,28	1	2,3	0,65	3,5	325	2,4
12 05	12 05 K	12 05 K/H 205	25	52	15	1,5	20	26	38	8	950	0,27	1	2,3	0,65	3,6	415	2,4
12 06	12 06 K	12 06 K/H 206	30	62	16	1,5	25	27	45	8	1 220	0,25	1	2,5	0,65	3,9	585	2,6
12 07	12 07 K	12 07 K/H 207	35	72	17	2	30	29	52	9	1 250	0,22	1	2,9	0,65	4,4	680	3,0
12 08	12 08 K	12 08 K/H 208	40	80	18	2	35	31	58	10	1 500	0,22	1	2,9	0,65	4,4	865	3,0
12 09	12 09 K	12 09 K/H 209	45	85	19	2	40	33	65	11	1 700	0,21	1	3,0	0,65	4,6	980	3,1
12 10	12 10 K	12 10 K/H 210	50	90	20	2	45	35	70	12	1 800	0,20	1	3,2	0,65	4,9	1 100	3,3
12 11	12 11 K	12 11 K/H 211	55	100	21	2,5	50	37	75	12	2 120	0,19	1	3,3	0,65	5,1	1 370	3,5
12 12	12 12 K	12 12 K/H 212	60	110	22	2,5	55	38	80	13	2 380	0,18	1	3,5	0,65	5,4	1 600	3,7
12 13	12 13 K	12 13 K/H 213	65	120	23	2,5	60	40	85	14	2 450	0,18	1	3,5	0,65	5,4	1 760	3,7
12 14	12 14 K	12 14 K/H 214	70	125	24	2,5	60	41	92	14	2 700	0,19	1	3,3	0,65	5,1	1 900	3,5
12 15	12 15 K	12 15 K/H 215	75	130	25	2,5	65	43	98	15	3 050	0,18	1	3,5	0,65	5,4	2 160	3,7
12 16	12 16 K	12 16 K/H 216	80	140	26	3	70	46	105	17	3 100	0,16	1	3,9	0,65	6,1	2 400	4,1
12 17	12 17 K	12 17 K/H 217	85	150	28	3	75	50	110	18	3 900	0,17	1	3,7	0,65	5,7	2 900	3,9
12 18	12 18 K	12 18 K/H 218	90	160	30	3	80	52	120	18	4 500	0,17	1	3,7	0,65	5,7	3 250	3,9
12 19	12 19 K	12 19 K/H 219	95	170	32	3,5	85	55	125	19	5 000	0,17	1	3,7	0,65	5,7	3 750	3,9
12 20	12 20 K	12 20 K/H 220	100	180	34	3,5	90	58	130	20	5 500	0,18	1	3,5	0,65	5,4	4 150	3,7
12 21	12 21 K	12 21 K/H 221	105	190	36	3,5	95	60	140	20	5 850	0,19	1	3,3	0,65	5,1	4 500	3,5
12 22	12 22 K	12 22 K/H 222	110	200	38	3,5	100	63	145	21	6 950	0,19	1	3,3	0,65	5,1	5 300	3,5

continuación ANEXO7

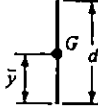
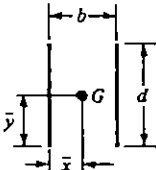
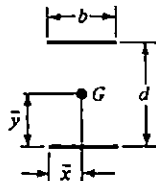
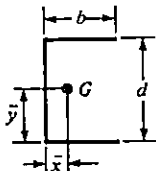
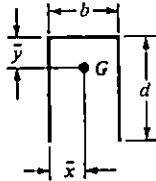
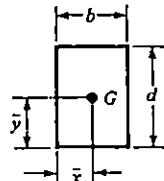



### Medidas auxiliares · Número límite de revoluciones · Peso

Número característico del agujero	Medidas auxiliares						Número límite de revoluciones		Peso $\approx$ kg
	D <sub>1</sub> mín	D <sub>2</sub> máx	D <sub>3</sub> mín	D <sub>4</sub> máx	b mín	r <sub>g</sub> máx	Lubricación con grasa	Lubricación con aceite	
00	14	26				0,6	25 000	32 000	0,034
01	16	28				0,6	22 000	28 000	0,040
02	19	31				0,6	20 000	25 000	0,049
03	21	36				0,6	16 000	20 000	0,073
04	26	41	23	27	5	1	14 000	18 000	0,120
05	31	46	28	32	5	1	12 000	16 000	0,141
06	36	56	33	38	5	1	10 000	12 000	0,220
07	42	65	38	45	5	1	8 000	10 000	0,323
08	47	73	43	52	5	1	7 100	9 000	0,417
09	52	78	48	57	5	1	7 100	9 000	0,465
10	57	83	53	62	5	1	6 300	8 000	0,525
11	64	91	60	69	6	1,5	5 600	7 100	0,705
12	69	101	64	75	5	1,5	5 000	6 300	0,900
13	74	111	70	83	5	1,5	4 500	5 600	1,15
14	79	116	75	86	5	1,5	4 500	5 600	1,26
15	84	121	80	92	5	1,5	4 000	5 000	1,36
16	91	129	85	99	5	2	4 000	5 000	1,67
17	96	139	90	105	6	2	3 600	4 500	2,07
18	101	149	95	110	6	2	3 200	4 000	2,52
19	107	158	100	117	7	2	3 200	4 000	3,10
20	112	168	106	124	7	2	2 800	3 600	3,70
21	117	178	111	131	7	2	2 800	3 600	4,37
22	122	188	116	138	7	2	2 500	3 200	5,15

SOLDADURA	ÁREA DE GARGANTA	UBICACIÓN DE G	SEGUNDO MOMENTO POLAR DE ÁREA UNITARIO
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = d^3/12$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{d(3b^2 + d^2)}{6}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2(b + d)}$ $\bar{y} = \frac{d^2}{2(b + d)}$	$J_u = \frac{(b + d)^4 - 6b^2d^2}{12(b + d)}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{8b^3 + 6bd^2 + d^3}{12} - \frac{b^4}{2b + d}$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$J_u = \frac{(b + d)^3}{6}$
	$A = 1.414\pi hr$		$J_u = 2\pi r^3$

\*G es el centroide del grupo de uniones de soldadura; h es el tamaño de junta; el plano de momento de torsión coincide con el plano de la página; todas las juntas son de ancho unitario.

FORMA DE UNIÓN	ÁREA DE GARGANTA	UBICACIÓN DE G	SEGUNDO MOMENTO DE ÁREA UNITARIO
	$A = 0.707hd$	$\bar{x} = 0$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{12}$
	$A = 1.414hd$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^3}{6}$
	$A = 1.414hb$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{bd^2}{2}$
	$A = 0.707h(2b + d)$	$\bar{x} = \frac{b^2}{2b + d}$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{12}(6b + d)$
	$A = 0.707h(b + 2d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = \frac{d^2}{b + 2d}$	$I_u = \frac{2d^3}{3} - 2d^2\bar{y} + (b + 2d)\bar{y}^2$
	$A = 1.414h(b + d)$	$\bar{x} = b/2$ $\bar{y} = d/2$	$I_u = \frac{d^2}{6}(3b + d)$
	$A = 1.414\pi hr$		$I_u = \pi r^3$

\* $I_u$ , el segundo momento de área unitario, se toma con respecto a un eje que pasa por G, el centroide del grupo de juntas soldadas;  $h$  es el tamaño de junta; el plano del par flexionante es normal al de la página y paralelo al eje  $y$ ; todas las juntas de soldadura son del mismo tamaño.

ANEXO 10

Propiedades mínimas a la tensión del metal soldante para soldadura al arco. Ref. 1.9 Pág 450

NÚMERO DE ELECTRODO AWS	RESISTENCIA ÚLTIMA kpsi (MPa)	RESISTENCIA DE FLUENCIA kpsi (MPa)	ELONGACIÓN (%)
E60xx	62 (427)	50 (345)	17-25
E70xx	70 (482)	57 (393)	22
E80xx	80 (551)	67 (462)	19
E90xx	90 (620)	77 (531)	14-17
E100xx	100 (689)	87 (600)	13-16
E120xx	120 (827)	107 (737)	14

\*Sistema de designación numérica de los electrodos según el código de especificaciones de la American Welding Society (AWS). Se utiliza un prefijo literal E con un grupo de cuatro o cinco dígitos, los dos o tres primeros indican la resistencia aproximada a la tensión. El último indica variantes en la técnica de soldadura, como la corriente eléctrica a usar. El penúltimo señala la posición de la junta como, por ejemplo, en plano horizontal, vertical o sobre cabeza. El conjunto completo de especificaciones puede obtenerse solicitándolo a la AWS.

ANEXO 11

Resultados de pruebas a la tensión de algunos metales\* Ref. 1.9 Pág 861

NÚMERO	MATERIAL	CONDICIÓN	RESISTENCIA				EXP. RESIST. A DEFORM. $m$	DEFORM. A LA FRACT. $\epsilon_f$
			DE FLUENCIA. $S_y$ MPa (kpsi)	ÚLTIMA. $S_u$ MPa (kpsi)	DE FRACTURA. $\sigma_f$ MPa (kpsi)	COEFICIENTE DE DEFORM. $\sigma_e$ MPa (kpsi)		
1018	Acero	Recocido	220 (32.0)	341 (49.5)	628 (91.1)†	620 (90.0)	0.25	1.05
1144	Acero	Recocido	358 (52.0)	646 (93.7)	898 (130)†	992 (144)	0.14	0.49
1212	Acero	HR	193 (28.0)	424 (61.5)	729 (106)†	758 (110)	0.24	0.85
1045	Acero	Q&T 600°F	1520 (220)	1580 (230)	2380 (345)	1880 (273)†	0.041	0.81
4142	Acero	Q&T 600°F	1720 (250)	1930 (210)	2340 (340)	1760 (255)†	0.048	0.43
303	Acero inoxidable	Recocido	241 (35.0)	601 (87.3)	1520 (221)†	1410 (205)	0.51	1.16
304	Acero inoxidable	Recocido	276 (40.0)	568 (82.4)	1600 (233)†	1270 (185)	0.45	1.67
2011	Aleación de aluminio	T6	169 (24.5)	324 (47.0)	325 (47.2)†	620 (90)	0.28	0.10
2024	Aleación de aluminio	T4	296 (43.0)	446 (64.8)	533 (77.3)†	689 (100)	0.15	0.18
7075	Aleación de aluminio	T6	542 (78.6)	593 (86.0)	706 (102)†	882 (128)	0.13	0.18

\*Valores provenientes de uno o más grados (calores) y que se cree pueden obtenerse por especificaciones de compra apropiadas. La deformación a la fractura puede variar hasta en 100%.

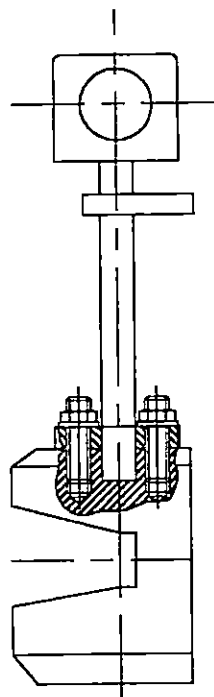
† Valor derivado.

## ANEXO 12

### DETERMINACIÓN DEL CENTROIDE

El centro de la masa del péndulo estará ubicado exactamente en el punto de impacto. Para poder diseñar este sistema se dimensionarán cada parte que lo constituyen, calculando su respectivo centroide para posteriormente diseñar la masa del péndulo con las condiciones antes mencionadas.

Los elementos a los cuales se les determinará su centroide serán los que se muestran en la siguiente figura:



**A - Acople Eje-Péndulo**

**C - Dispositivo de posición.**

**B - Barra del Péndulo**

**D - Fijador Barra-Masa del Péndulo**

**E -Percutor**

**F - Masa del Péndulo.**

El método a usar para calcular el centroide es el del volumen, asumiendo que los materiales son homogéneos y además poseen la misma densidad.

Si la masa del péndulo es de 12.5 kg el volumen que ocupará dicha masa se calcula por medio de la ecuación:

$$\rho = m / V$$

$$V = m / \rho$$

Donde:

V: Volumen total del péndulo

M: Masa del péndulo (12.5 kg)

$\rho$ : Densidad del acero ( $\rho = 7.806 \times 10^{-6} \text{ Kg/mm}^2$ )

Por lo tanto el volumen total del péndulo es:

$$V = m/\rho$$

$$V = 12.5 / (7.806 \times 10^{-6})$$

$$V = 1,601,307.19 \text{ mm}^3$$

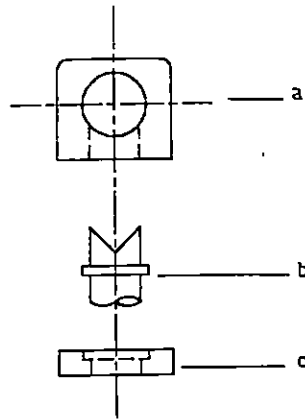
Este volumen será distribuido entre todos los elementos que conforman el péndulo.

#### A. ACOPLÉ EJE – PÉNDULO

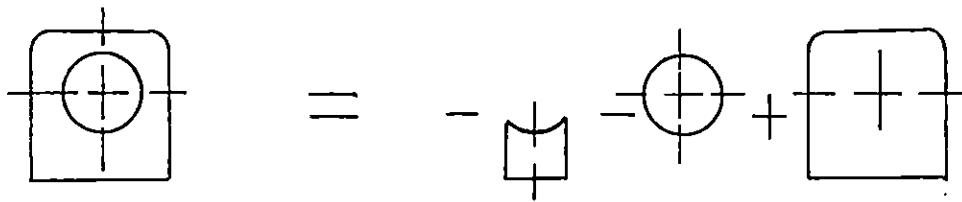
Este elemento permitirá poder acoplar el péndulo al eje de rotación. Por su función en el sistema, este elemento se considera fundamental para el buen funcionamiento de la máquina, ya que la rigidez y la alineación del péndulo depende de él.

Para calcular su centroide, dividiremos la pieza en 2 partes: la primera de ella la constituirá el elemento que va sujeta al péndulo (a) y la segunda un anillo sujetador (b) que acoplará la barra más la sección de la barra interna al acople eje – péndulo.

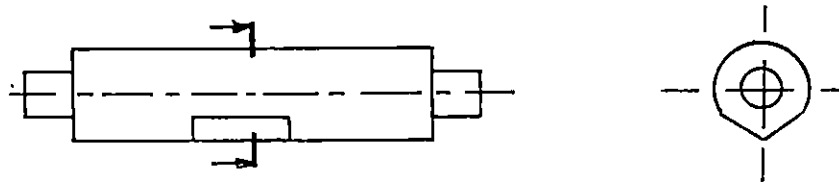




- a) Este sólido puede considerarse como un paralelepípedo con 2 agujeros mutuamente perpendiculares, que forman una especie de "T". Un diagrama de este proceso es:

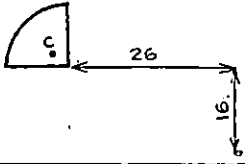
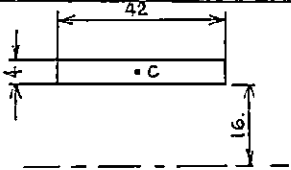
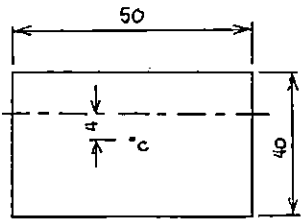
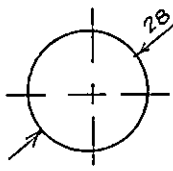
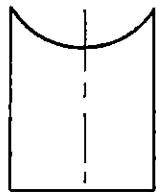
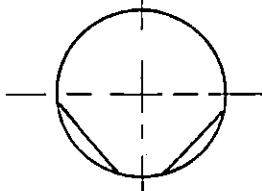


Otro elemento que hay que considerar es el hecho que una sección del eje tendrá un maquinado en forma de "V", como se muestra:



Esta pequeña sección influirá en cierta medida en la ubicación del centroide, por lo que se incluirá en el análisis al hacer momento respecto al eje de rotación se notará que cierta masa se cancelará por ser contraria, por lo cual se considera un volumen efectivo de todo este elemento.

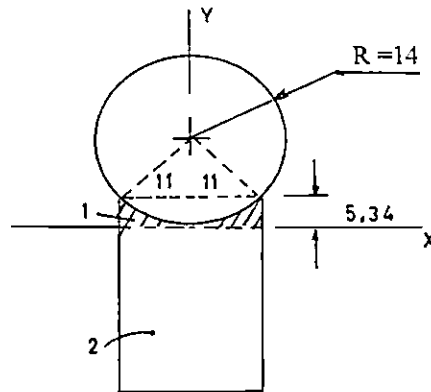
La siguiente tabla es un resumen del cálculo del centroide de este elemento.

	Figura	V (mm <sup>3</sup> )	y (mm)	yV (mm <sup>4</sup> )
I		1256.64	-17.697	-22,239.57
II		8400	- 18	-151,200
III		100,000	+4	400,000
IV		- 30,787.68	0	0
V		- 4252.34	18.34	-77,987.915
VI		12687.98	- 0.618	- 7775.23
	$\Sigma V$	87304.6	$\Sigma Vg$	140797.285

$$\bar{y} = \frac{\sum yV}{\sum V} = \frac{140797.285}{87304.6} = 1.61 \text{ mm}$$

$$V_{\text{efectivo}} = 12008.68$$

La figura V posee una configuración compleja en su parte superior debido a que esta parte es la intersección entre los 2 agujeros. Para determinar su volumen y centroide se procederá a analizarlo por integración.



El volumen de la zona achurada (1) es lo que nos interesa, por lo tanto:

Límites:

$$0 \leq y < -\sqrt{196 - X^2} + 14$$

$$0 < x < 11$$

$$-\sqrt{121 - X^2} < z < \sqrt{121 - X^2}$$

$$V = 2 \int_0^{11} \int_0^{-\sqrt{196 - X^2} + 14} \int_{-\sqrt{121 - X^2}}^{\sqrt{121 - X^2}} dz dy dx$$

$$V = 4 \int_0^{11} \int_0^{-\sqrt{196 - X^2} + 14} \sqrt{121 - X^2} dy dx$$

$$V = 451 \text{ mm}^3$$

Integrando para yV:

$$yV = 4 \int_0^{11} \int_0^{-\sqrt{196-X^2}+14} y \sqrt{121-X^2} dy dz$$

$$yV = 564.5 \text{ mm}^4$$

Por lo que el centroide es:

$$\bar{y} = \frac{yV}{V}$$

$$= 564.5 / 451$$

$$= 1.25 \text{ mm}$$

Resumiendo para las zonas (1) y (2):

Figura	V (mm <sup>3</sup> )	y (mm)	yV (mm <sup>4</sup> )
1	-451.0	12.75	-5750.25
2	-3801.34	19	-72225.22
$\Sigma V$	-4252.34	$\Sigma yV$	-77975.46

El centroide y para toda la figura V es:

$$Y = -77975.46 / -4252.34$$

$$Y = 18.34 \text{ mm}$$

La figura VI se resume en la tabla siguiente, según el proceso:

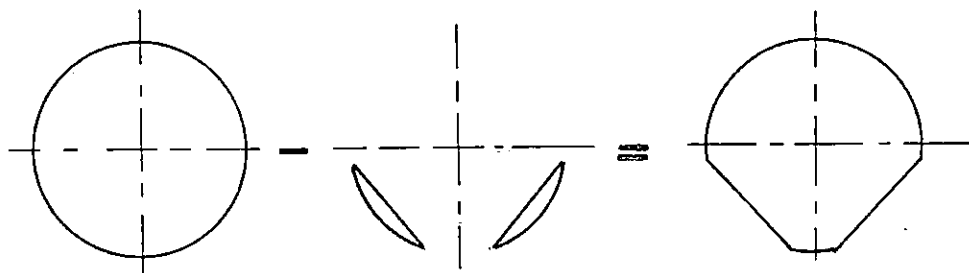
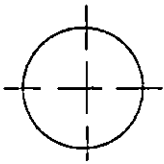
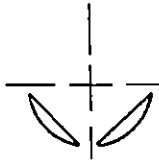
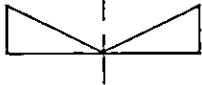
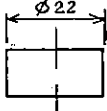
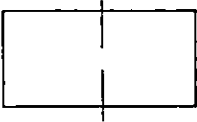


Figura	V (mm <sup>3</sup> )	Y (mm)	yV (mm <sup>4</sup> )
	13,546.55	0	0
	-858.572	9.056	-7775.23
$\Sigma V$	12687.98	$\Sigma yV$	-7775.23

$$Y = -7775.23 / 12687.98 \text{ mm}$$

$$Y = -0.613 \text{ mm}$$

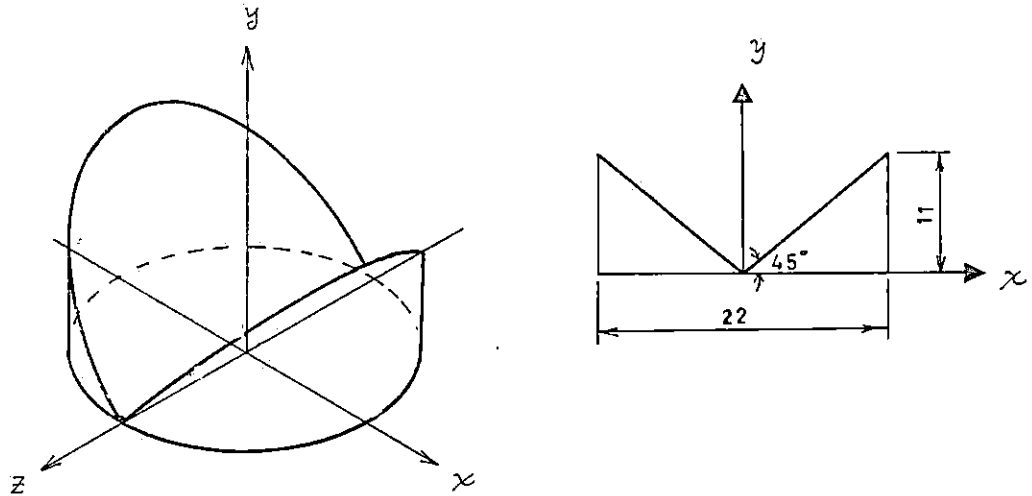
b) y c), Los elementos b y c se analizarán en conjunto, siendo la tabla resumen la que se presenta a continuación:

	Figura	V(mm <sup>3</sup> )	y (mm)	yV (mm <sup>4</sup> )
I		887.33	15.35	13620.515
II		665.232	20.5	13637.256
III		27,500	29.5	811250
	$\Sigma V$	29052.56	$\Sigma yV$	838507.76

$$Y = 838507.76 / 29052.56$$

$$Y = 28.86 \text{ mm}$$

El proceso de calculo para la figura I se utiliza el método de integración, según se muestra.



Se integrará el volumen de la mitad del cilindro cortado:

$$X^2 + Z^2 = r^2, \text{ donde } r = 11, \text{ por lo tanto: } z = \sqrt{r^2 - x^2}$$

$$X^2 + Z^2 = 121$$

Límites:

$$0 \leq y < x$$

$$0 < x < 11$$

$$-\sqrt{r^2 - X^2} < z < \sqrt{r^2 - X^2}$$

$$V = \int_0^{11} \int_0^x \int_{-\sqrt{r^2 - X^2}}^{\sqrt{r^2 - X^2}} dz dy dx$$

$$V = \int_0^{11} \int_0^X \sqrt{121 - X^2} dy dx$$

$$V = 443.666 \text{ mm}^3$$

$$V_T = 2V = 887.33 \text{ mm}^3$$

$$yV = \int_0^{11} \int_0^X y \sqrt{121 - X^2} dy dz$$

$$yV = 1437.37 \text{ mm}^4$$

$$\bar{y} = \frac{yV}{V}$$

$$= 1437.37 / 887.33$$

$$= 1.62 \text{ mm (respecto al centro de rotación)}$$

## B) BARRA DEL PÉNDULO.

Los valores de volumen y centroide de la barra del péndulo se han colocado en la tabla general.

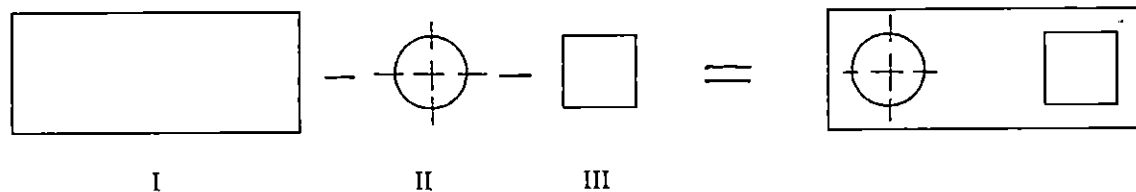
Este elemento contará con dos secciones, es decir con diámetros distintos los cuales se muestran en la tabla general. Esto se debe al hecho de la necesidad de disminuir en lo posible la mayor cantidad de masa en los extremos del centroide.

## C) DISPOSITIVO DE POSICIÓN.

Este dispositivo es el encargado de mantener al péndulo en su posición de disparo y soltarlo en el momento que se desea efectuar un ensayo. Su configuración geométrica es la de una placa rectangular con dos agujeros en

sus extremos, uno circular que servirá para montarlo en la barra del péndulo y uno cuadrado para ajustarse al dispositivo de disparo.

El proceso a seguir para calcular su centroide y su volumen es:



La tabla resumen del cálculo es la siguiente, en donde los valores por centroide se calculan respecto al eje de la barra del péndulo.

Figura	V (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	xV (mm <sup>4</sup> )
I	42735.0	20.0	854700
II	-5702.0	0.0	0.0
III	-7500.0	42.5	-318750
ΣV	29533.0	ΣxV	535950

$$x = \frac{\sum xV}{\sum V}$$

$$= 535950 / 29533.0$$

$$= 18.15 \text{ mm}$$

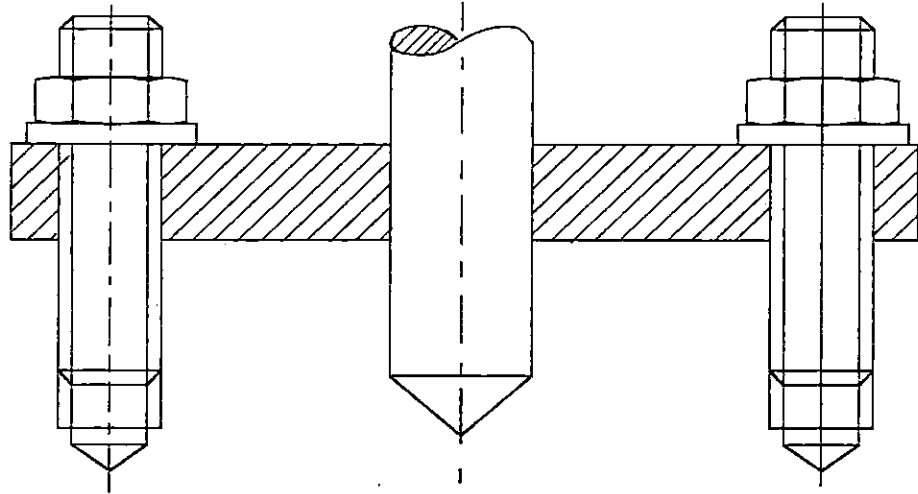
$$y = 167.5 \text{ mm (en base al eje de rotación)}$$

#### D) FIJADOR BARRA-MASA DEL PÉNDULO

Este elemento consiste de una placa base perforada; dos espárragos como sujetadores, dos tuercas y una cuña.



Su configuración es como la mostrada en la siguiente figura

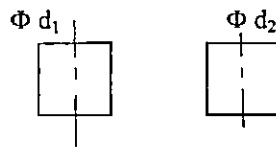


En el calculo del centroide solo se tomara en cuenta desde el plano de unión de la placa hacia arriba y la parte de los espárragos dentro de la masa del péndulo se tomaran como parte de ella (masa).

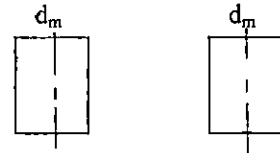
I- PLACA SOLIDA



II - AGUJEROS DEL ESPARRAGO



III - ESPARRAGOS



IV - ARANDELAS



V - TUERCAS



El proceso a seguir en el calculo es:

Figura	V (mm <sup>3</sup> )	Y (mm)	YV (mm <sup>4</sup> )
I	78120.0	7.75	605430.0
II	-6232.92	7.75	-48305.13
III	6488.85	17.5	113554.875
IV	1068.14	16.75	17891.345
V	3676.2	22.75	83633.55
$\Sigma V$	83120.27	$\Sigma yV$	772204.64

$$\bar{y} = \frac{\sum yV}{\sum V}$$

$$= 772204.64 / 83120.27$$

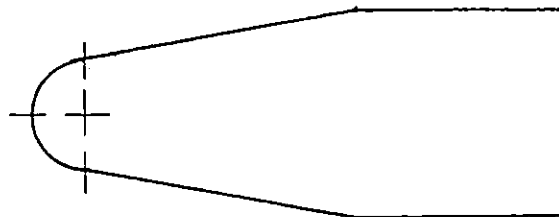
$$= 18.15 \text{ mm}$$

$$y = 9.29 \text{ mm}$$

#### E) PERCUTOR

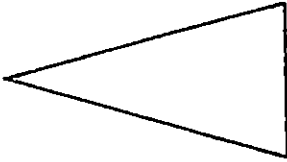
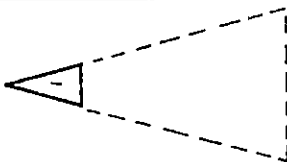
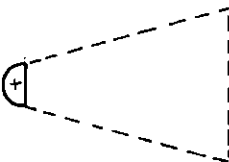
El calculo del centroide de este elemento se centrará solamente a la parte externa cuando se ha montado en la masa del péndulo.

La sección transversal del percutor es:



Donde la parte achurada es la externa en el montaje.

Como es simétrica para la coordenada en "y" solamente se calculara su centroide en la coordenada "x", la que se muestra a continuación

Figura	V (mm <sup>3</sup> )	x (mm)	xV (mm <sup>4</sup> )
	15120	15.23	230277.6
	-1208.75	-0.72	830.3
	409	-1.27	519.43
ΣV	14320.2	ΣxV	231627.33

$$\bar{x} = \frac{\sum xV}{\sum V}$$

$$= 231627.33 / 14320.20$$

$$= 16.75 \text{ mm}$$

$$y = 422.5 \text{ mm}$$

## F) MASA DEL PÉNDULO

Teniendo calculados los centroides de todos los elementos exceptuando el de la masa del péndulo, es fácil determinar la ubicación del centroide de la masa, pues ya se conocen también las coordenadas del centroide de todo el sistema (péndulo).

Para la masa específicamente, las coordenadas de su centroide són:

$$\bar{x} = -0.572 \text{ mm}$$

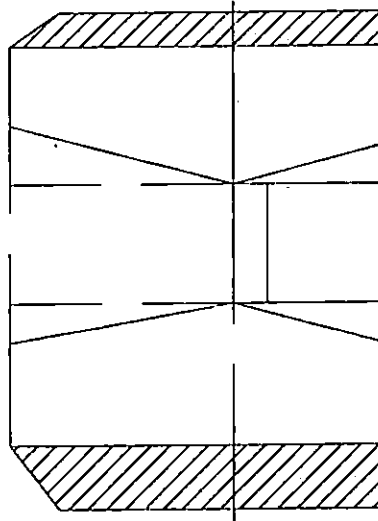
$$\bar{y} = 457.17 \text{ mm}$$

El volumen residual con el que se cuenta para dimensionar la masa es:

$$V = 1341731.88 \text{ mm}^3$$

A continuación se procederá a dimensionar la masa del péndulo, teniendo como restricciones la ubicación del percutor el cual ya está dimensionado y requerirá un espacio físico ya determinado.

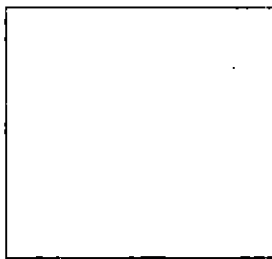
La forma esquemática de la masa se muestra a continuación:



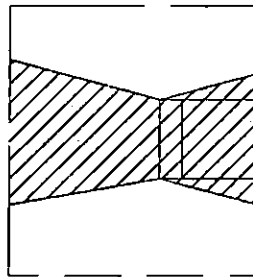
Para el dimensionamiento se considerará lo siguiente

- La no inclusión de las partes achuradas para dimensionar respecto a la coordenada "x". Ya que estas secciones serán masas libres para ajustar después la coordenada "y"
- En el primer cálculo, la masa se considera simétrica. Utilizando las dimensiones establecidas se encontrara el valor adecuado para "A" de tal manera que la coordenada del centroide "x" se ajuste a la establecida para la masa del péndulo.
- Se partirá de una placa rectangular, a la que se le restaran los vacíos para darle la configuración requerida.

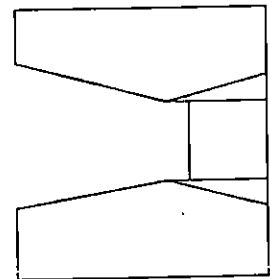
El proceso a seguir es el siguiente:



VOLUMEN TOTAL



SECCIONES A REDUCIR



SOLIDO REQUERIDO

El volumen total es:

$$V = (82 + A) (85 \times 40 \times 2)$$


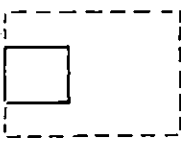
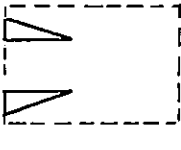
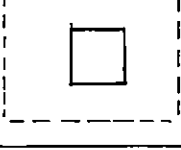
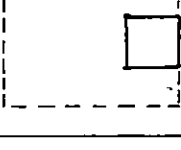
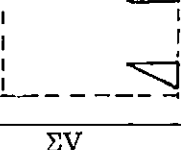
$$V = 6800A + 557600 \quad (\text{mm}^3)$$

Y sus coordenadas

$$x = (82 - A) / 2$$

$$y = 0$$

El orden de secuencia para el cálculo se indica en la figura anterior. Cada una de estas secciones se reducirán del bloque total y así obtener el sólido requerido. Todo el proceso se resume en la tabla siguiente:

	figura	Volumen	X	XV
		$6800 A + 557600$	$(82 - A)/2$	$-3400 A^2 + 22,861,600$
1		$-2000 A$	$-A/2$	$1000 A^2$
2 y 3		$-40 \cdot \tan(15) A^2$	$-2 A/3$	$(80/3) \tan(15) A^3$
4		$-52800$	13.2	$-696,960$
5		$-27800$	54.2	$-1,506,760$
6 y 7		$-11856.226$	54.66	$-648,140.36$
	$\Sigma V$	$-10.718 A^2 + 4800 A + 465143.774$	$\Sigma xV$	$7.145 A^3 - 2400 A^2 + 20,009739.64$

Del principio de centroide:

$$X = \Sigma xV / \Sigma V$$

Sustituimos los resultados de la tabla y la igualamos al valor del centroide de la masa:

$$\frac{7.145 A^3 - 2400 A^2 + 20,009739.64}{-10.718 A^2 + 4800 A + 465143.774} = -0.57$$

Resolviendo para "A":

$$A = 113.65 \text{ mm}$$

Con este valor de "A", el volumen que se ha utilizado es

$$V = 872,227.047 \text{ mm}^3$$

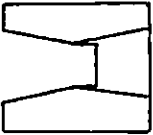
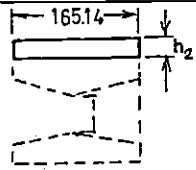
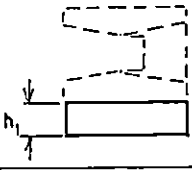
Por lo tanto restan:

$$465\,866.603 \text{ mm}^3$$

para poder ajustar la coordenada "Y", distribuyendo el material residual en los extremos superior e inferior.

Para ajustar la coordenada "y" al centroide se procederá a distribuir la masa, pero teniendo el cuidado de no afectar la coordenada "X".

La siguiente tabla resume este proceso:

figura	Volumen	y	yV
	872 227.047	0	0
	6605.6 h <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> /2 + 85	3302.8h <sub>2</sub> <sup>2</sup> + 561,476 h <sub>2</sub>
	4954.2 h <sub>1</sub>	- h <sub>1</sub> /2 - 85	- 2477.1h <sub>1</sub> <sup>2</sup> - 421 107 h <sub>1</sub>
ΣV	4954.2h <sub>1</sub> + 6605.6 h <sub>2</sub> + 872 227.047	Σ yV	-2477.1h <sub>1</sub> <sup>2</sup> - 421 107h <sub>1</sub> + 3302.8h <sub>2</sub> <sup>2</sup> + 561 476 h <sub>2</sub>

Específicamente para la masa del péndulo su centroide en "y" está a 34.67 mm abajo de su eje de simetría. Por lo tanto:

$$Y = \Sigma yV / \Sigma V$$

$$34.67 = \frac{-2477.1h_1^2 - 421107h_1 + 3302.8h_2^2 + 561476h_2}{4954.2h_1 + 6605.6h_2 + 872227.047}$$

Ya que la ecuación está en función de 2 variables, se hace necesario otra ecuación para poder resolver las variables. Esta ecuación es la que relaciona el volumen residual y el que ocupará las secciones  $h_1$  y  $h_2$ .

$$4954.2 h_1 + 6605.6h_2 = 469 504.83$$

$$h_2 = 71.077 - 0.75 h_1$$

Resolviendo la ecuación anterior y la de centroide tenemos:

$$h_1 = 82.78 \text{ mm}$$

$$h_2 = 8.992 \text{ mm}$$

Con lo cual queda dimensionado el péndulo, con las coordenadas buscadas.



### ANEXO 13. CONVERSION DE GRADOS A ENERGIA ABSORBIDA

ANGULO [Grados]	ENERGIA ABSORBIDA [Julios]
0	100
1	99.67
2	99.65
3	99.61
4	99.55
5	99.48
6	99.39
7	99.29
8	99.17
9	99.03
10	98.88
11	98.72
12	98.54
13	98.34
14	98.13
15	97.90
16	97.66
17	97.41
18	97.13
19	96.85
20	96.54
21	96.23
22	95.90
23	95.55
24	95.19
25	94.82
26	94.43
27	94.03
28	93.61
29	93.18
30	92.73
31	92.28
32	91.81
33	91.32
34	90.82
35	90.31

ANGULO [Grados]	ENERGIA ABSORBIDA [Julios]
36	89.79
37	89.25
38	88.70
39	88.14
40	87.57
41	86.98
42	86.39
43	85.78
44	85.16
45	84.52
46	83.88
47	83.23
48	82.56
49	81.89
50	81.20
51	80.51
52	79.80
53	79.09
54	78.36
55	77.63
56	76.89
57	76.14
58	75.38
59	74.61
60	73.83
61	73.05
62	72.26
63	71.46
64	70.65
65	69.84
66	69.02
67	68.19
68	67.36
69	66.52
70	65.68

ANGULO [Grados]	ENERGIA ABSORBIDA [Julios]
71	64.83
72	63.98
73	63.12
74	62.26
75	61.39
76	60.52
77	59.64
78	58.76
79	57.88
80	56.99
81	56.10
82	55.21
83	54.32
84	53.43
85	52.53
86	51.63
87	50.73
88	49.83
89	48.93
90	48.03
91	47.13
92	46.23
93	45.33
94	44.43
95	43.54
96	42.64
97	41.74
98	40.85
99	39.96
100	39.07
101	38.19
102	37.30
103	36.43
104	35.55
105	34.68

ANGULO [Grados]	ENERGIA ABSORBIDA [Julios]
106	33.81
107	32.95
108	32.09
109	31.23
110	30.38
111	29.54
112	28.70
113	27.87
114	27.04
115	26.22
116	25.41
117	24.61
118	23.81
119	23.02
120	22.23
121	21.46
122	20.69
123	19.93
124	19.18
125	18.43
126	17.70
127	16.98
128	16.26
129	15.56
130	14.86
131	14.18
132	13.50
133	12.84
134	12.18
135	11.54
136	10.91
137	10.29
138	9.68
139	9.08
140	8.50

ANGULO [Grados]	ENERGIA ABSORBIDA [Julios]
141	7.92
142	7.36
143	6.81
144	6.28
145	5.75
146	5.24
147	4.74
148	4.26
149	3.79
150	3.33
151	2.89
152	2.46
153	2.04
154	1.64
155	1.25
156	0.87
157	0.51
158	0.17



ANEXO 14

PRUEBA DE RESILIENCIA

Cliente: Díaz Vega, Luis Jaime  
Institución: Universidad Nacional de El Salvador  
Fecha: 11 de octubre de 2000

Probeta N°: 1

Características de la Probeta:

Material: AISI 1020  
Longitud: 55.10 mm  
Ancho: 5.00 mm  
Altura: 10.00 mm  
Muesca: 45°x2  
Norma: UNI EN 10045/1 (Sección reducida)

Condición de la calibración del Péndulo:

Error: 2 Joules

Lectura: 17 - 2 = 15 Jöules

Resiliencia:  $\frac{15 \text{ joules}}{5 \times 10 \text{ mm}^2} = 03 \text{ Joules/mm}^2$

  
Leonel Guzmán

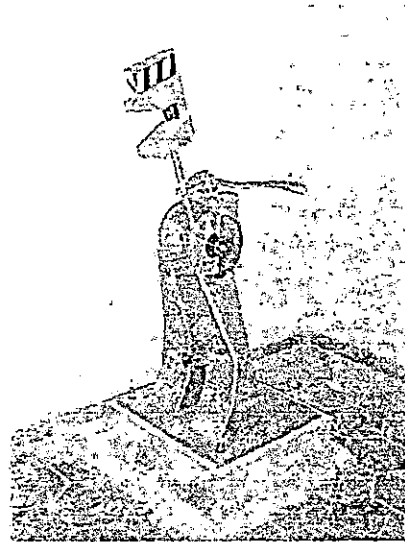
Laboratorista

UNIVERSIDAD DON BOSCO



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
DEPARTAMENTO DE MATERIALES Y PROCESOS DE FABRICACIÓN

ENSAYO DE PRUEBAS DE IMPACTO CHARPY.



I. OBJETIVO GENERAL:

- Determinar las propiedades mecánicas de los materiales metálicos, cuando son sometidos a ensayos de impacto tipo Charpy.

II. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la tenacidad o absorción de energía de un material metálico antes de fracturarse, utilizando la máquina Charpy.
- Graficar curvas experimentales de Temperatura vrs. Energía absorbida.
- Comparar los resultados con los especificados para el material, y si hay diferencias determinar las causas.

### III. MATERIALES Y EQUIPOS

- Máquina de ensayos Charpy.
- Probetas de 5 x 10 x 55 mm con entalla en "V".
- Medio acondicionador para bajas y altas temperaturas.
- Pinzas.
- Termómetro para determinar la temperatura de la probeta en el instante del impacto (se recomienda utilizar un termómetro óptico)
- Nivel de ángulo.

### IV. MARCO TEÓRICO

Se ha observado que, aunque ciertos materiales presentan una considerable resistencia a las cargas estáticas, se fracturan con facilidad con cargas dinámicas. Un buen ejemplo es el vidrio, que puede soportar considerables esfuerzos de tracción y compresión, pero se astilla con un golpe ligero con un martillo. Otros materiales que tienen el mismo comportamiento son los hierros fundidos, plásticos rígidos, cerámicas y aceros al alto carbono. Las pruebas de impacto se han creado para estudiar el comportamiento de los materiales al recibir un golpe. El propósito principal de las pruebas de impacto es determinar la energía absorbida por una muestra hasta ocasionar la fractura. La propiedad relacionada con las pruebas de impacto es la tenacidad, que se define como la capacidad de un material para resistir la fractura al someterlo a carga de impacto. Muchas partes y estructuras mecánicas como tornillos, ejes, martillos, yunques y matrices de forja se someten a pruebas de impacto o dinámicas.

Las pruebas de impacto son de tres tipos: *torsión*, *tensión* y *viga*, según la forma en que se aplique la carga a la muestra. Las

pruebas de impacto de torsión se usan rara vez y suelen ser para aceros de herramientas. Las pruebas de impacto de tensión tienen cierto uso, pero hasta la fecha no se han normalizado. Las pruebas de impacto de viga o brazo son las más comunes y son de dos clases: *Izod* y *Charpy* y difieren en el modo de aplicar la carga a la muestra.

En la prueba Charpy la muestra se carga como un viga con apoyo sencillo o libre y se golpea en el lado opuesto a la muesca (figura A). Las probetas con muescas en V miden de mejor manera la resistencia del material a la propagación de la fractura. (Figura B)

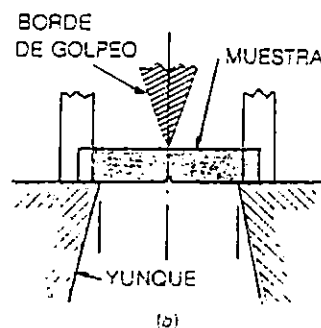


Figura A. Método para pruebas de impacto Charpy

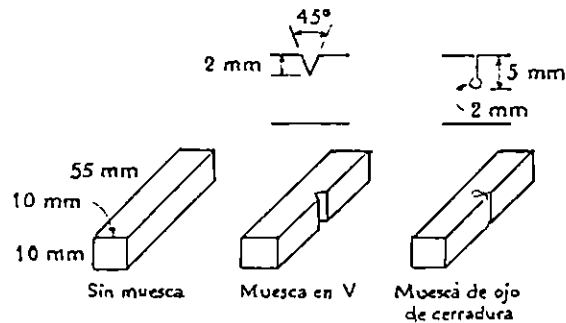


Figura B. Muestras Típicas

Los resultados de la prueba de impacto son útiles al comparar, para una composición dada, los efectos de la historia previa en la tenacidad. De interés particular a este respecto, es el efecto del tratamiento térmico en las propiedades del acero. El sobrecalentamiento del acero menoscaba su tenacidad. Esto puede detectarse con facilidad mediante una prueba de impacto en barra con muesca y por examen de la apariencia de la superficie fracturada. Otra aplicación es la determinación de las temperaturas de fragilización, en particular para las aleaciones ferrosas. Muchas composiciones de acero tienden a perder tenacidad conforme se aproximan a temperaturas más bajas del punto de congelación. La prueba de impacto en barra con muesca proporciona un medio para determinar los márgenes de fragilización para composiciones diferentes. El ensayo de impacto se utiliza mejor para la comparación y selección de los materiales, que para obtener criterios de diseño.

## V. PROCEDIMIENTO

1. Colocar la aguja del indicador de energía en la posición cero, de manera que el medidor haga tope con el eje del péndulo.
2. Llevar el péndulo hasta su posición de disparo; teniendo siempre presente que se debe colocar por seguridad el pin para evitar accidentes.
3. Colocar la probeta entre los soportes de la máquina, con la entalla en "V", viendo hacia adentro de la máquina. Cuando la probeta está a una temperatura diferente de la ambiente, se tienen 5 segundos como máximo para efectuar el ensayo desde que la probeta se saca del medio donde se encuentra inmersa.
4. Verificar que el eje de la probeta coincide con el eje del péndulo
5. Accionar la palanca de disparo para realizar el ensayo.
6. Tomar la lectura obtenida (en grados) y verificar la energía absorbida en el anexo 13.
7. Repetir el procedimiento anterior, para otro ensayo.

## VI. TABULACIÓN DE LOS DATOS

Nº	TEMPERATURA (°C)	LECTURA LEIDA EN EL INDICADOR DE ANGULO (Grados)	ENERGÍA ABSORBIDA CUANDO OCURRE LA FALLA † (Joule)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			

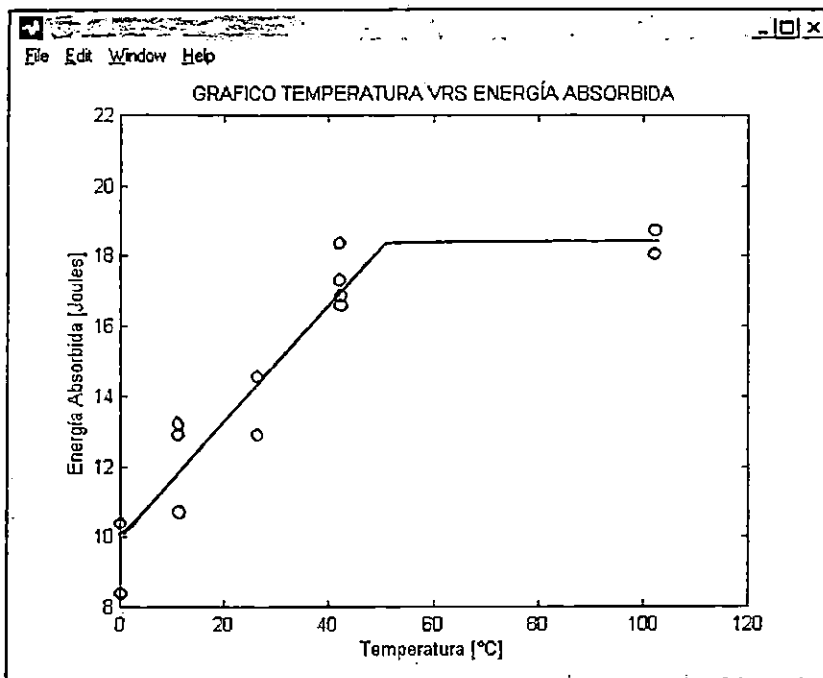
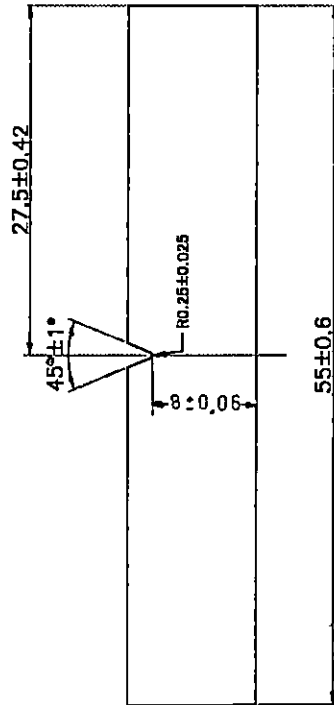
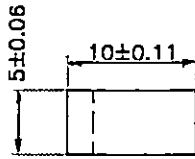


Figura C. Gráfico de comportamiento para un acero AISI 1020

## VII. REQUISITOS PARA EL INFORME

- Tabla de datos.
- Resúmenes de resultados numéricos.
- Gráfico Temperatura vrs. Energía absorbida.

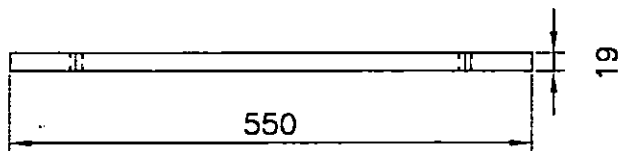
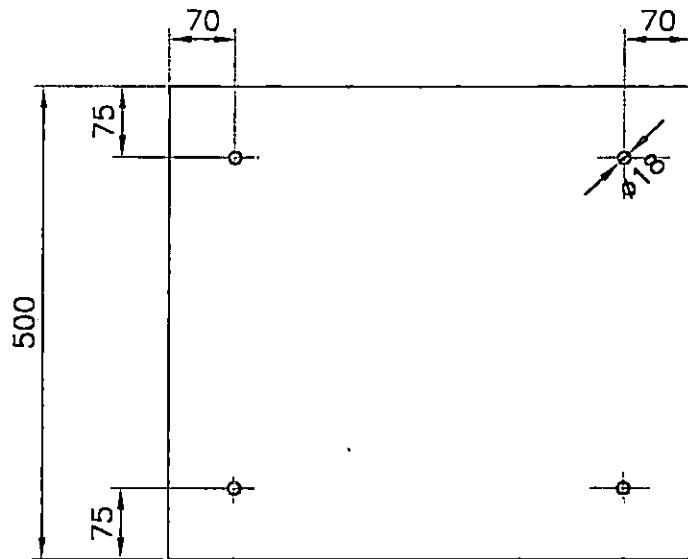




REQUERIMIENTOS DE ACABADO: 2 μm EN LA SUPERFICIE DE LA MUESCA Y LA CARA OPUESTA;  
4 μm EN LAS OTRAS DOS SUPERFICIES

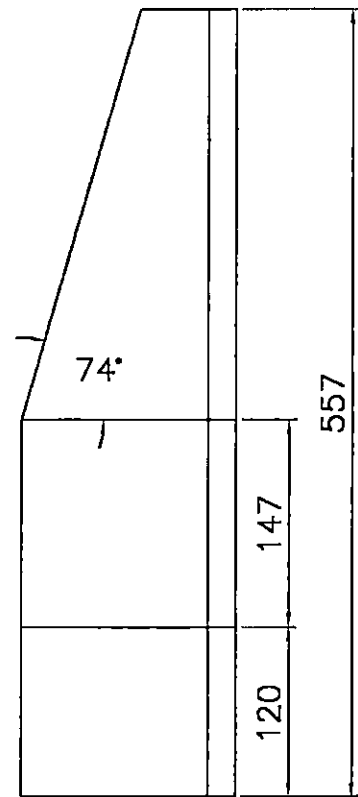
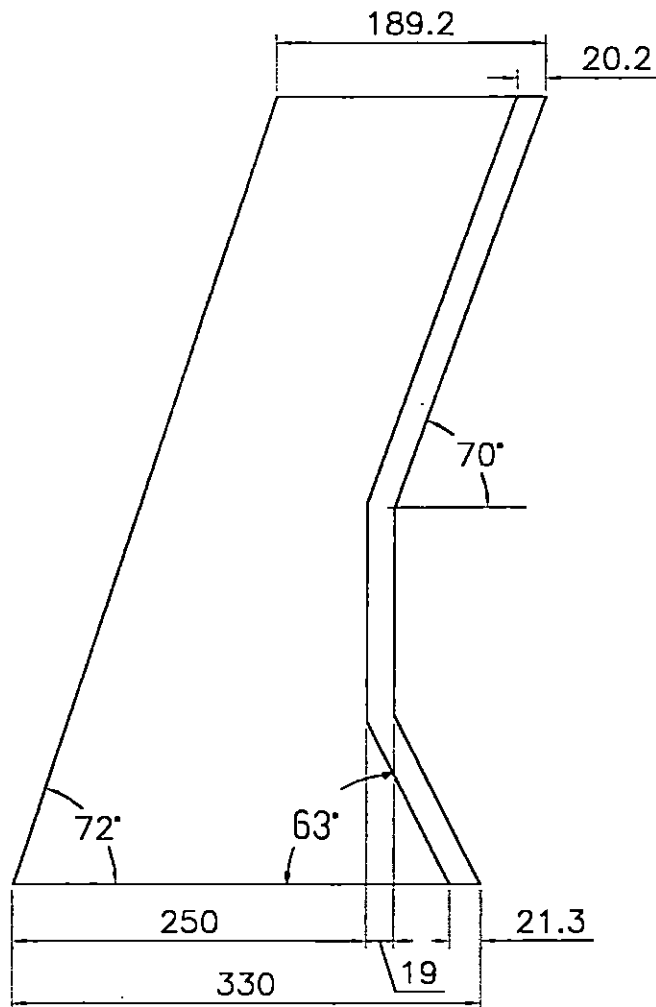
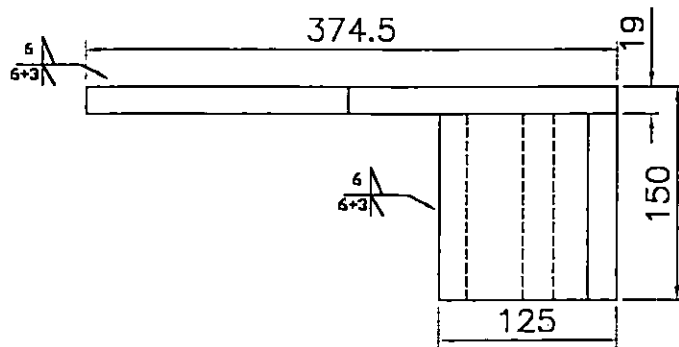
ISO-A  
COTAS: MM

		PROBETA CON ENTALLA EN "V"		
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION		MATERIALES
	FECHA	NOMBRE		FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA		
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ		
NORMA		I C A I T I		
ESCALA: 2:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS			PLANO N°: 1



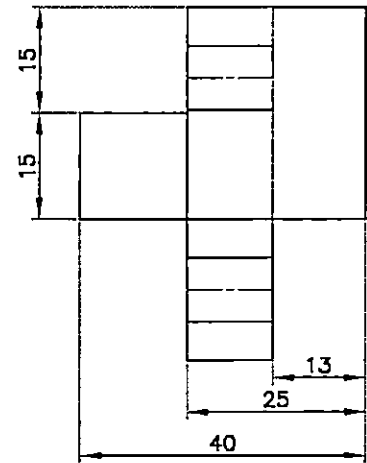
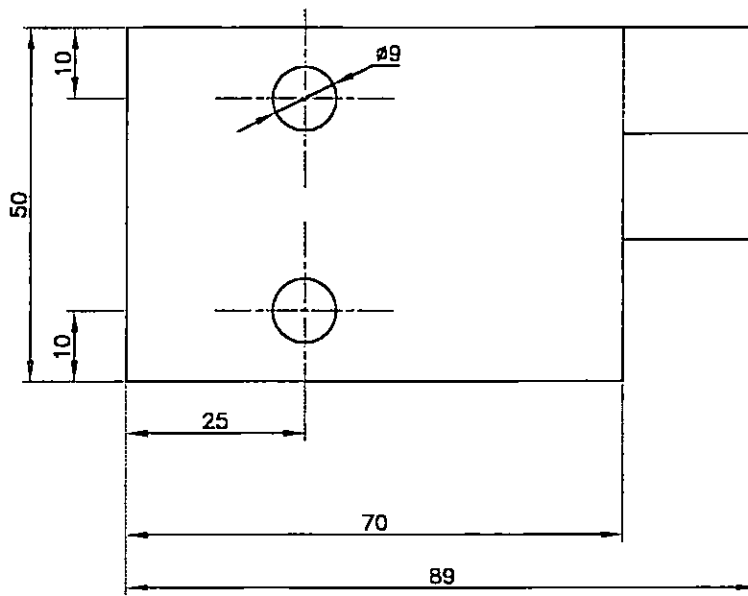
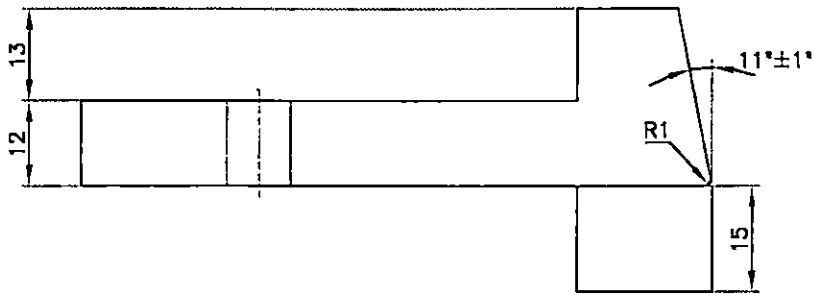
ISO - A  
COTAS: MM

1	1	BASE DE LA ESTRUCTURA DE LA MAQUINA	LAMINA ASTM A-36, 19MM
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. ROBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:7.5	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 2



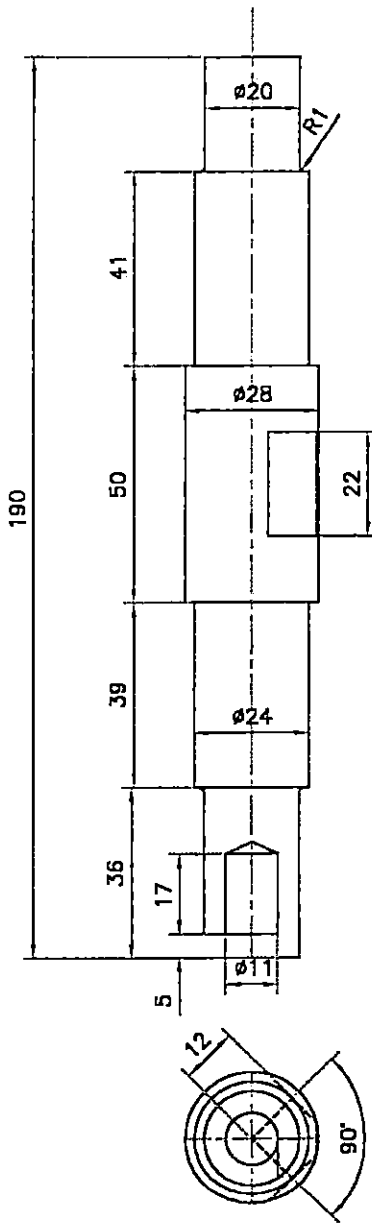
ISO-A  
COTAS: MM

2	2	CUERPO DE LA ESTRUCTURA (UN IZQUIERDO Y UN DERECHO)	LAMINA ASTM A-36, 19 MM
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		I C A I T I	
ESCALA: 1:5	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 3



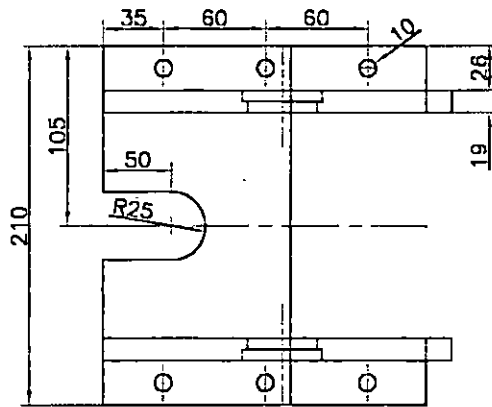
ISO - A  
COTAS:MM

3	2	APOYO PARA LA PROBETA (UN IZQUIERDO Y UN DERECHO)	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		I C A I T I	
ESCALA: 1:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 4

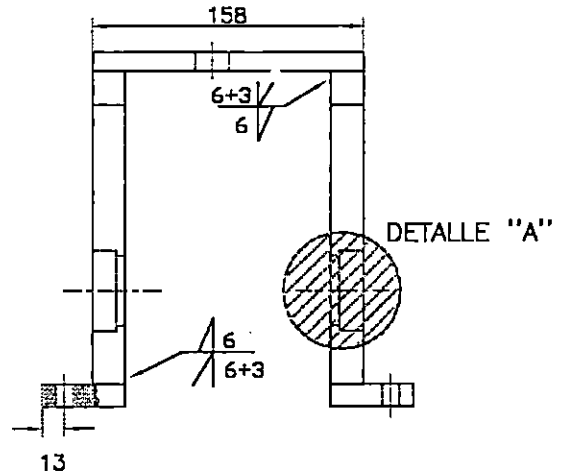
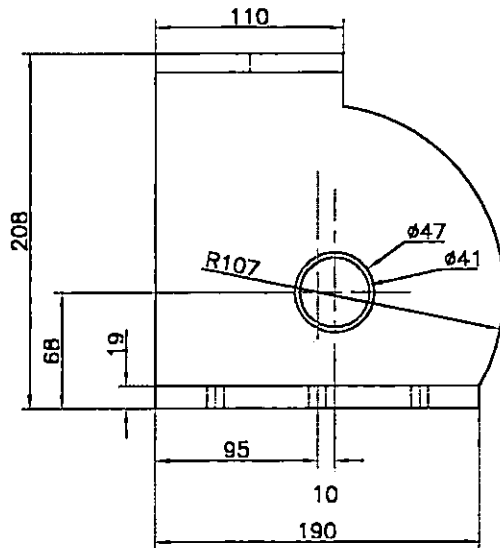
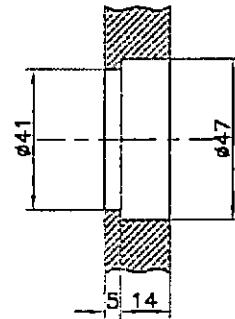


ISO-A  
COTAS: MM

6	1	EJE DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:1.5	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 5

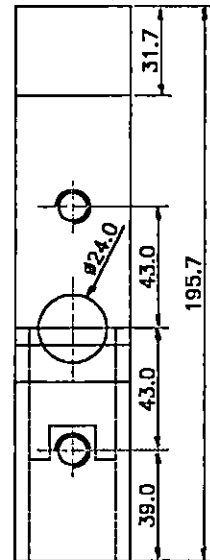
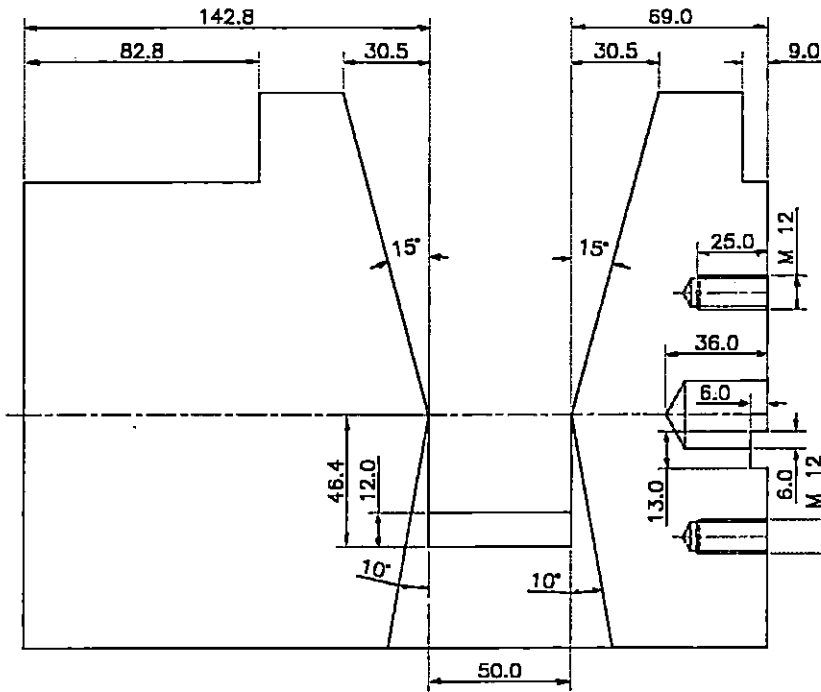
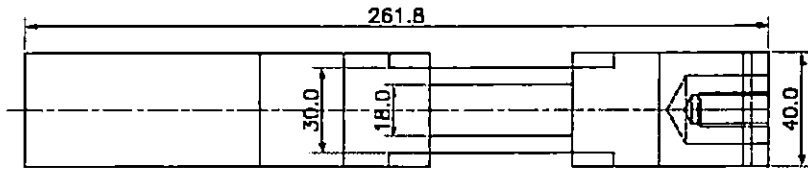


DETALLE "A"  
SIN ESCALA



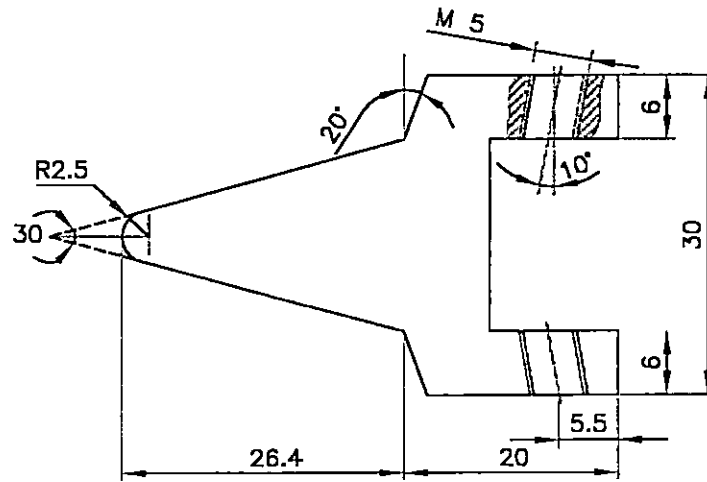
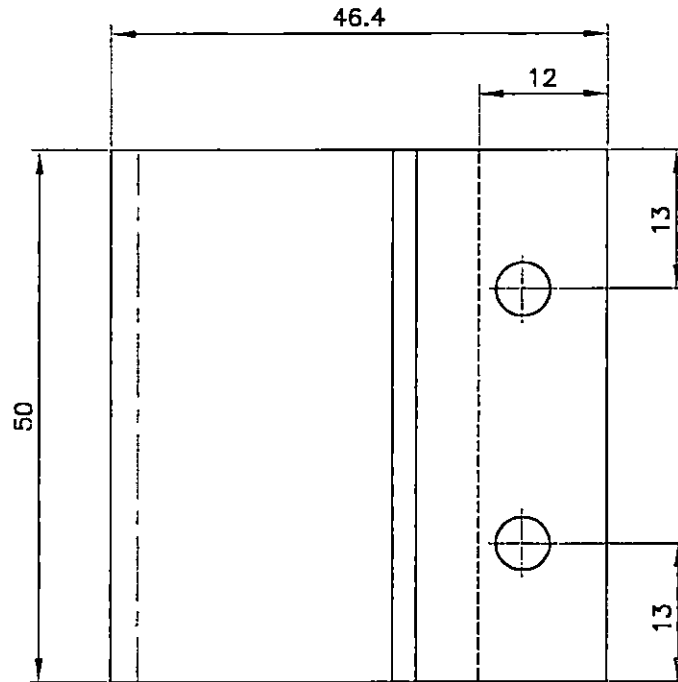
ISO -A  
COTAS: MM

7	1	ALOJAMIENTO PARA LOS RODAMIENTOS	LAMINA ASTM A-36, 19MM
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:4	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 6



ISO-A  
COTAS: MM

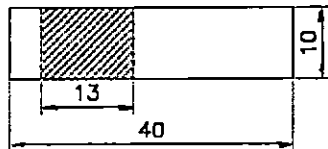
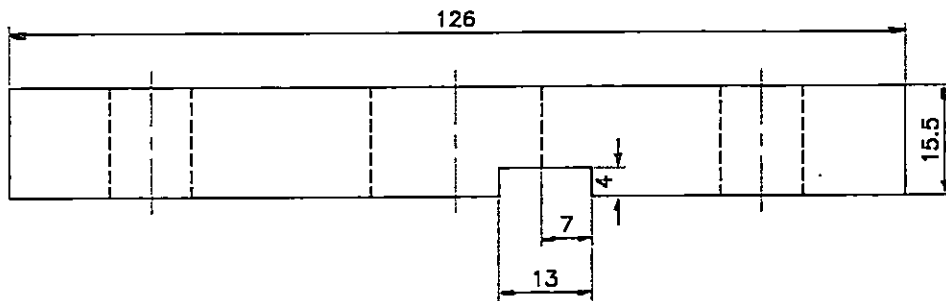
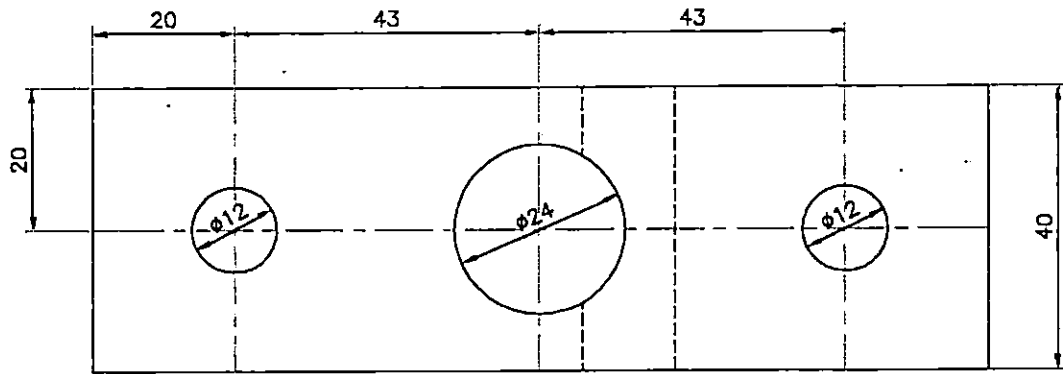
9	1	MASA PRINCIPAL DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		I C A I T I	
ESCALA: 1:2.5	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 7



ISO-A  
COTAS: MM

10	1	PERCUTOR	ACERO AISI D2
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1.5:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 8

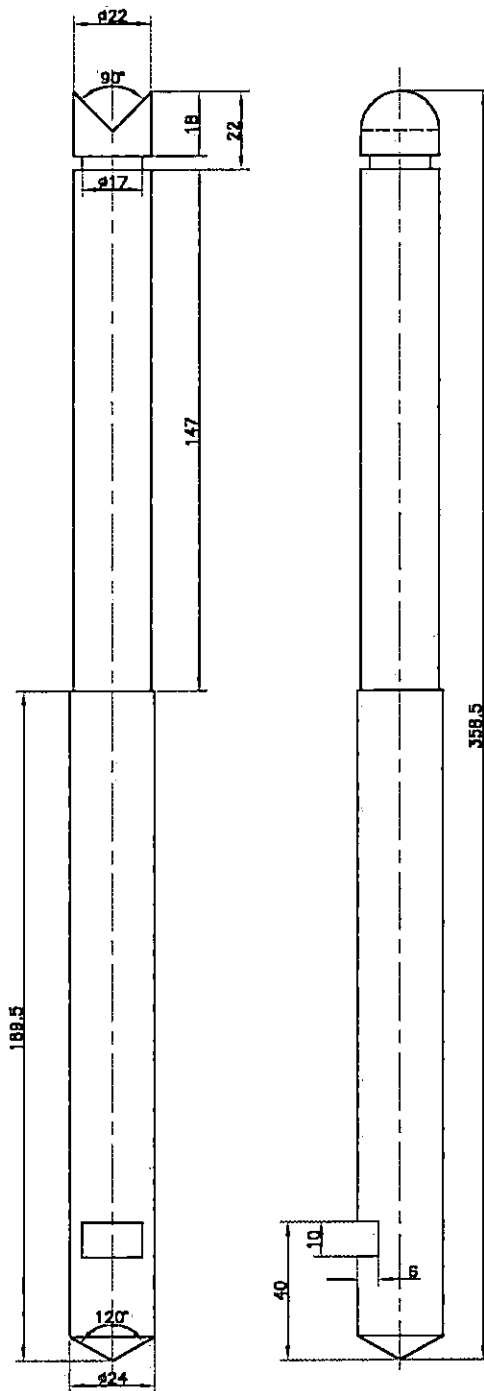




CUERO

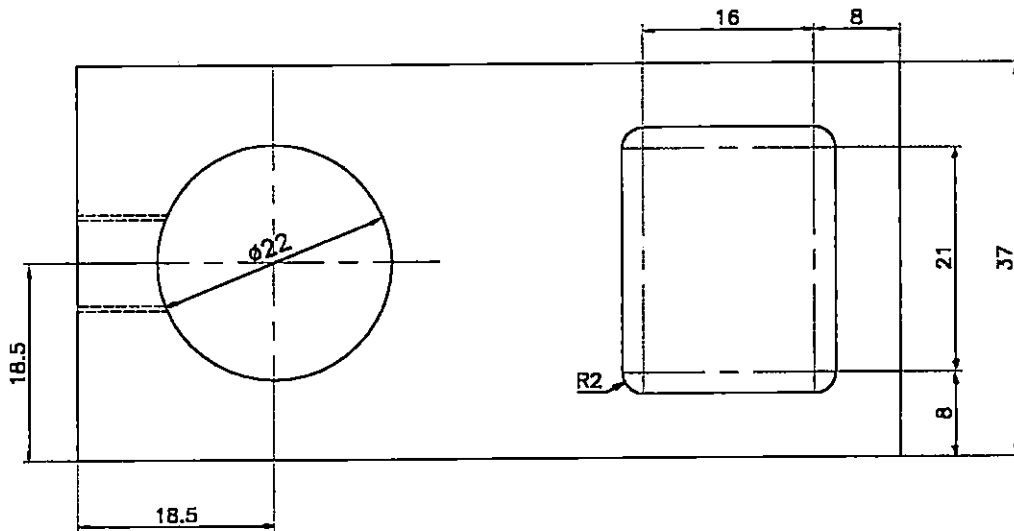
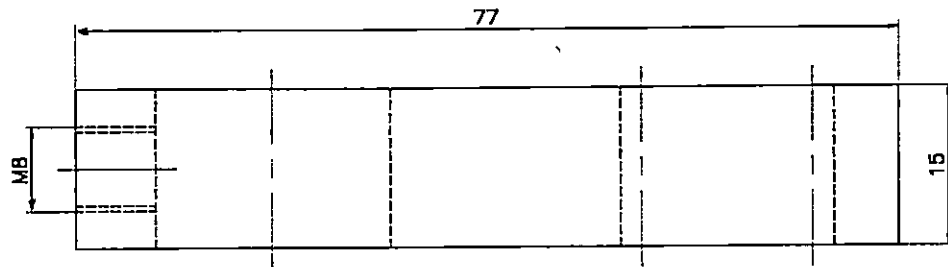
ISO-A  
COTAS: MM

11	1	FIJADOR BARRA - MASA DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 9



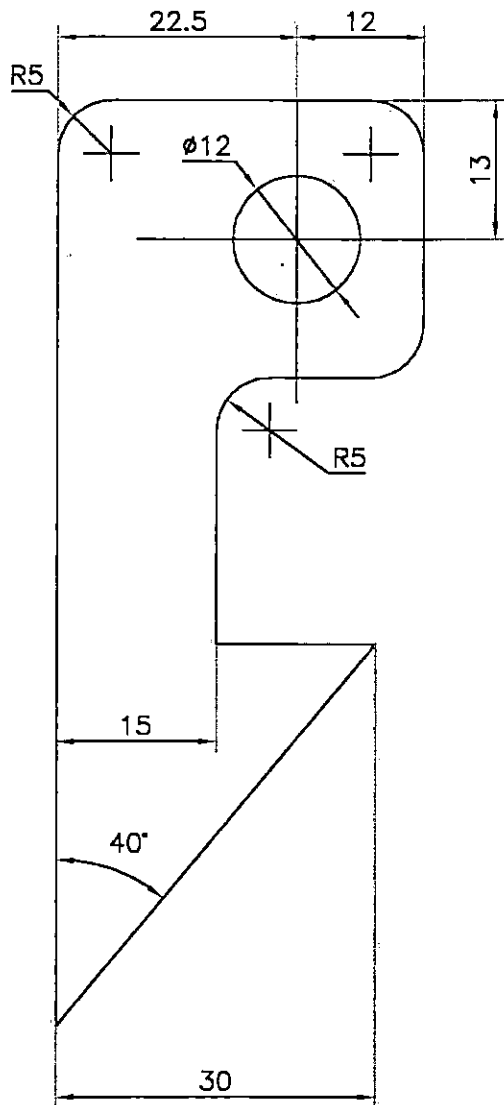
ISO - A  
COTAS:MM

13	1	BARRA DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:2	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 10



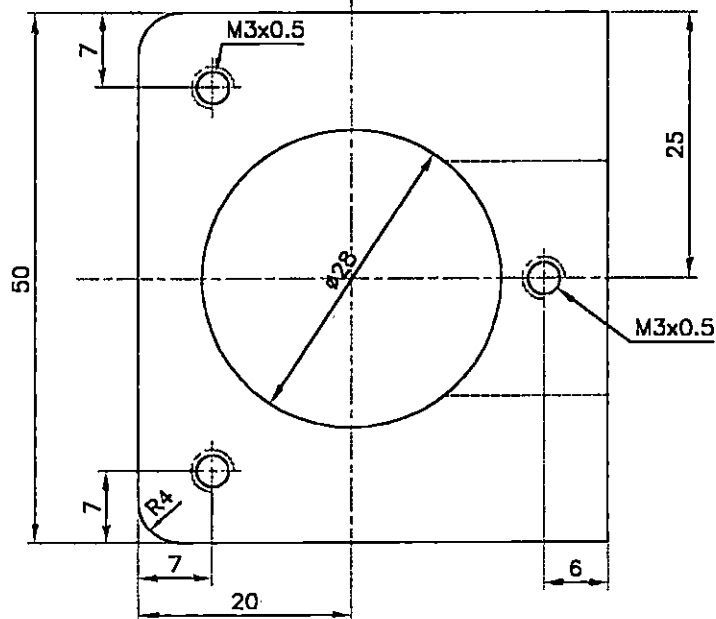
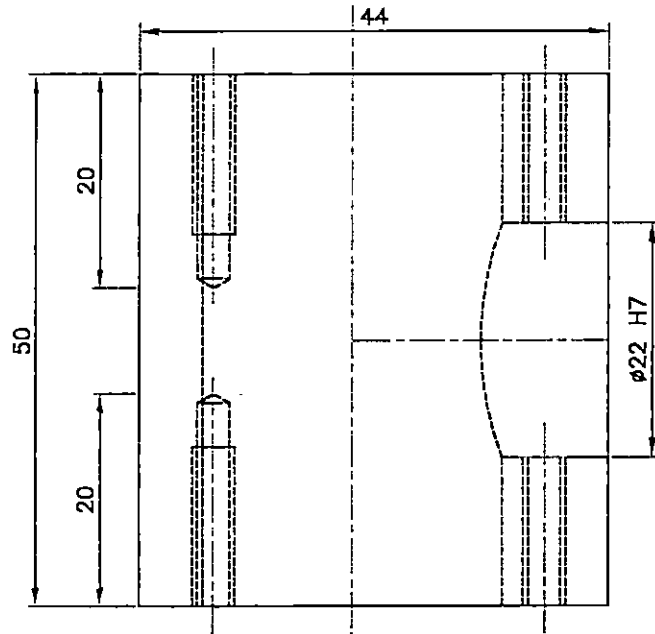
ISO-A  
COTAS: MM

14	1	ELEMENTO POSICIONADOR	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS -- JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ -- ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1.5:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 11



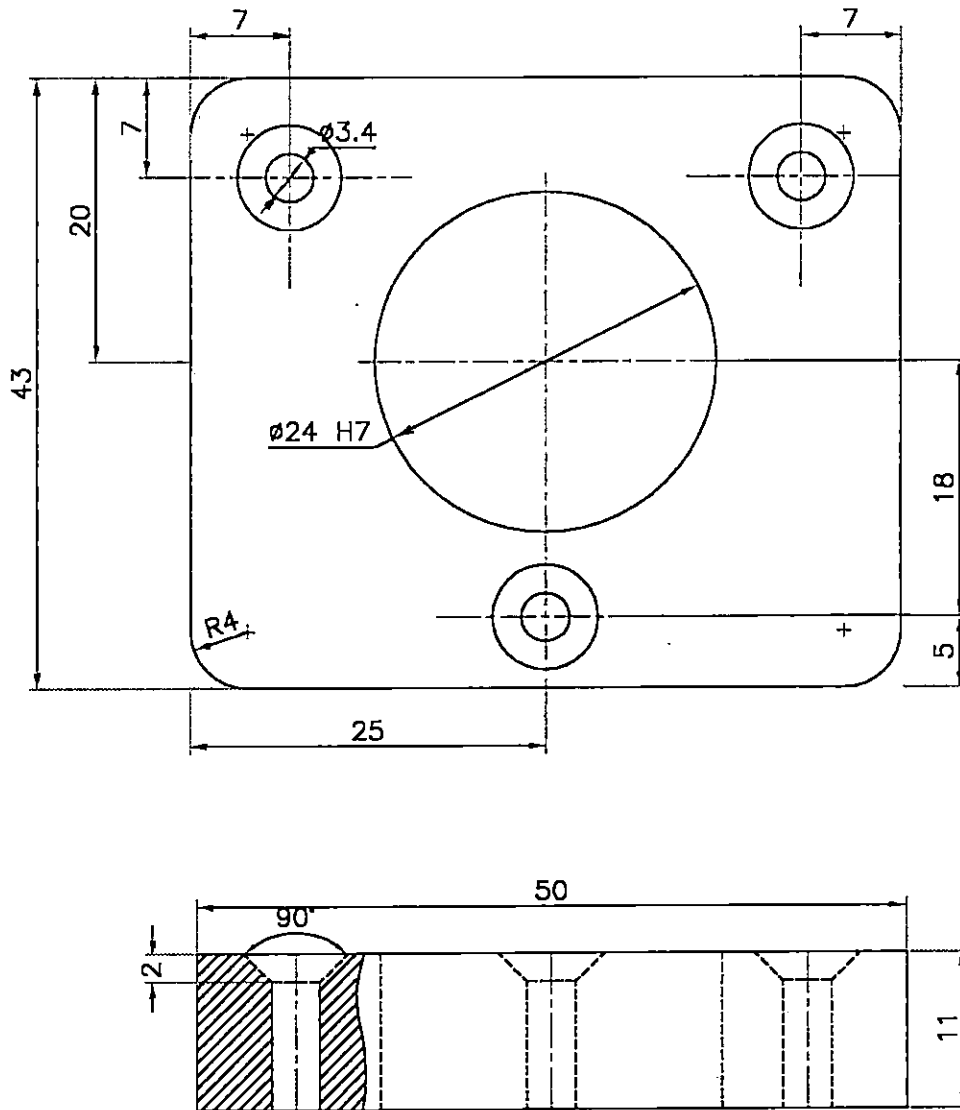
ISO - A  
COTAS:MM

15	1	ELEMENTO DE DISPARO	ACERO AISI 1020
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1.5:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 12



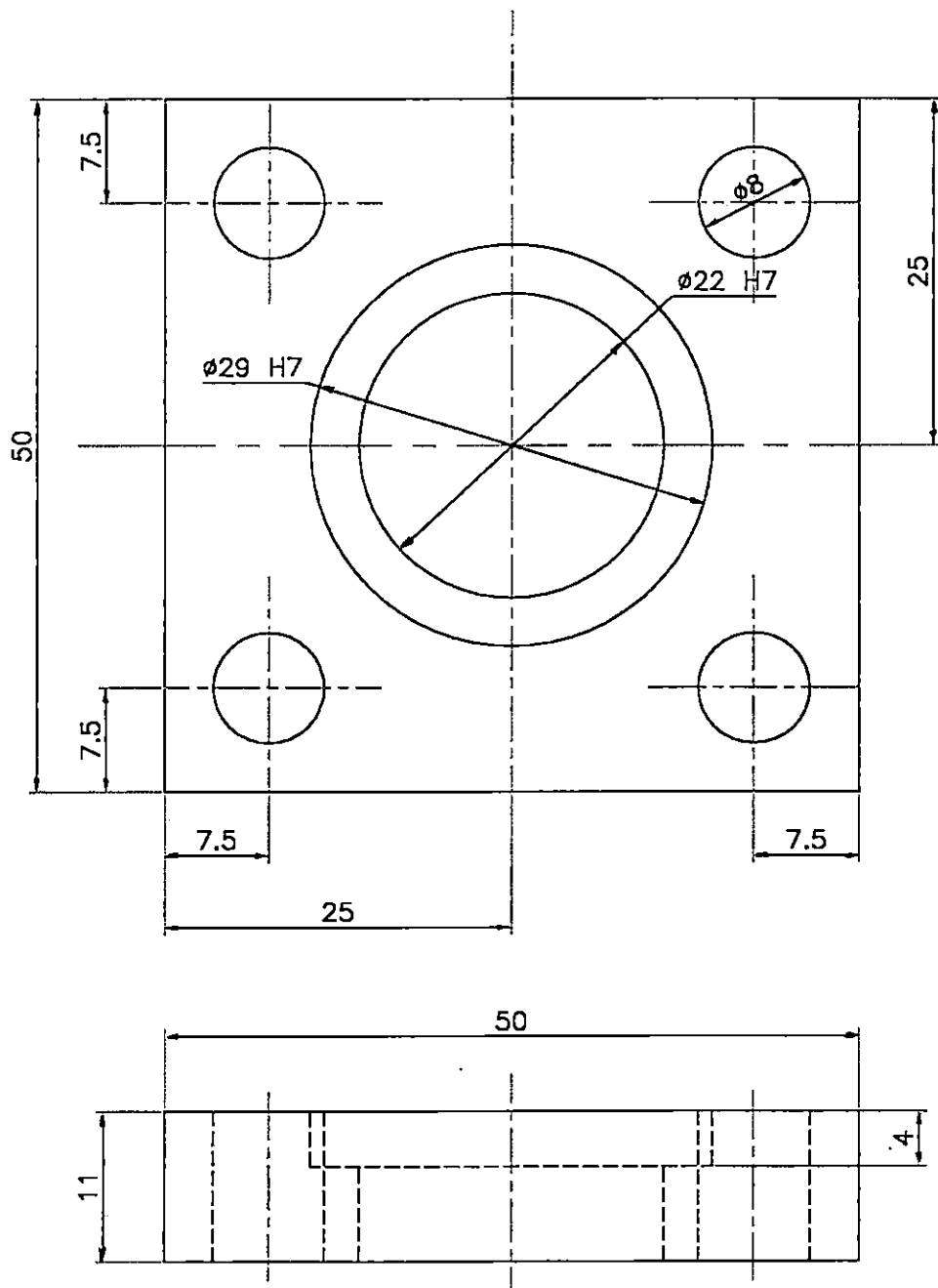
ISO - A  
COTAS: MM

18	1	ACOPLE EJE-BARRA DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1.5:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 13



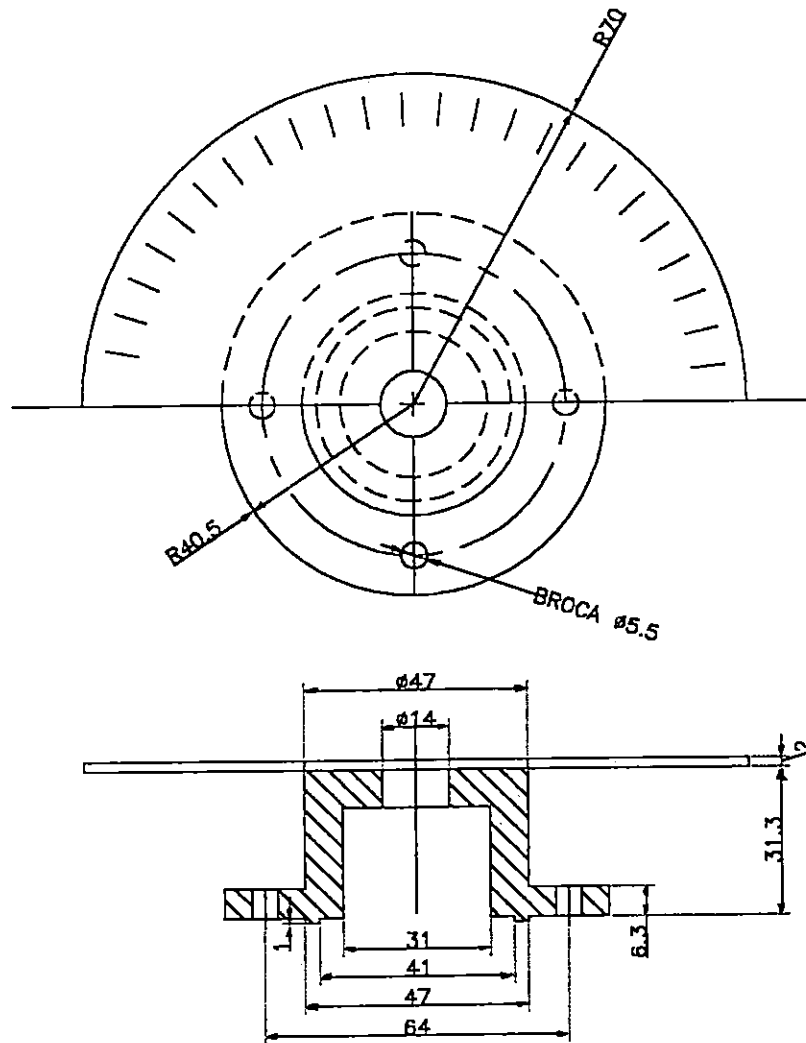
ISO - A  
COTAS: MM

17	2	ACOPLE EJE / BARRA DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		IGAITI	
ESCALA: 2:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 14



ISO - A  
COTAS:MM

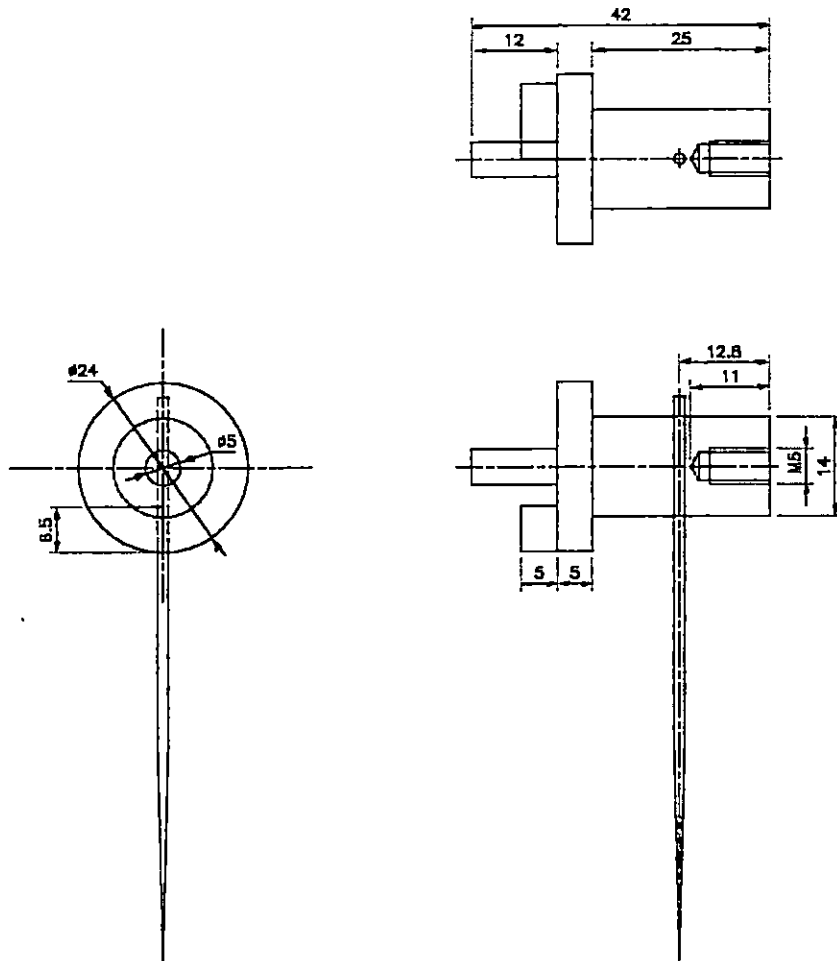
18	1	ACOPLE EJE BARRA DEL PENDULO	ACERO AISI 1045
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 2:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 15



ISO- A  
COTAS: MM

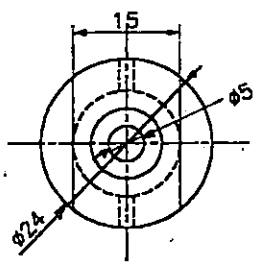
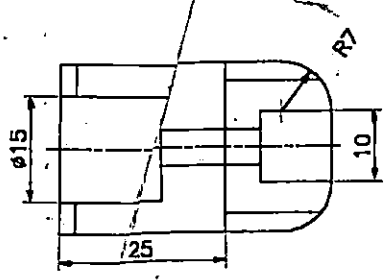
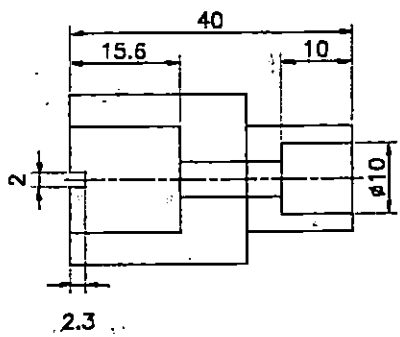
18	1	MEDIDOR DE ENERGIA	ACERO AISI 1020
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS -- JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ -- ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA: 1:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 16





ISO - A  
 COTAS: MM

20	1	DISPOSITIVO DE MEDICION	ACERO AISI 1020
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS -- JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ -- ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		I C A I T I	
ESCALA: 1:1	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 17



ISO - A  
COTAS: MM

21	1	ADOPLE DEL DISPOSITIVO DE MEDICION	ACERO AISI 1020
N°	N° PIEZAS	DENOMINACION	MATERIALES
	FECHA	NOMBRE	FIRMA
DIBUJADO		MANUEL CAMPOS - JAIME VEGA	
COMPROBADO		ING. SATURNINO GAMEZ - ING. RIGOBERTO VELASQUEZ	
NORMA		ICAITI	
ESCALA:	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA MAQUINA TIPO PENDULO PARA REALIZAR PRUEBAS A LA FLEXION POR IMPACTO EN MATERIALES METALICOS		PLANO N°: 18
1:1			

