

110



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

EXPERIMENTACION ASOCIADA A LA INSTRUMENTACION DE
UNA MAQUINA DE PRUEBAS DE IMPACTO.

298064

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
MANUEL ZAPATA GOMEZ

ASESOR: DR. ELIGIO ALBERTO OROZCO MENDOZA



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES**

ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

Experimentación asociada a la instrumentación de una máquina
de pruebas de impacto

que presenta el pasante: Manuel Zapata Gómez
con número de cuenta: 9218730-8 para obtener el título de :
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 16 de Agosto de 2001.

PRESIDENTE	<u>Ing. José Juan Contreras Espinosa</u>	
VOCAL	<u>Dr. Elicio Alberto Orozco Mendoza</u>	
SECRETARIO	<u>Ing. Javier Hernández Vega</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Ramón Osorio Galicia</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>M.A.I. Pedro Guzmán Tinajero</u>	



Instituto De Física UNAM

El trabajo de investigación asociado a la tesis de licenciatura cuyo título es **“EXPERIMENTACIÓN ASOCIADA A LA INSTRUMENTACIÓN DE UNA MÁQUINA DE PRUEBAS DE IMPACTO”**, fue realizado por el pasante **Manuel Zapata Gómez** en los laboratorios del Instituto De Física De La UNAM, bajo la dirección del Dr. **Eligio A. Orozco Mendoza**, y bajo la codirección del M en C. **Jaime Francisco García Robledo** técnico académico del IFUNAM.

AGRADECIMIENTOS

Me es grato agradecer a la Máxima Casa de Estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México donde a través de su Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, me permitió formarme como persona y realizar mis estudios profesionales alcanzando el título de Ingeniero Mecánico Electricista.

Al Instituto de Física, Departamento de Estado Sólido agradezco todas las facilidades que me dieron al permitir que hiciera mi trabajo en sus laboratorios e instalaciones.

Asimismo agradezco al Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza su valiosa asesoría y paciencia para la realización de mi trabajo de Tesis, al Dr. Lauro Bucio Galindo por su buena disposición y enseñanzas académicas, al M. en C. Jaime Francisco García Robledo por sus acertadas observaciones y asesorías.

Agradezco también al Sr. Ángel Osornio Basurto y a la Sra. Irma Orozco García por la ayuda técnica brindada en todo momento que lo requerí.

A mis queridos padres por su apoyo, y cariño incondicional que me han permitido llevar a feliz termino uno más de mis objetivos de estudio:

Doña María Luisa, por haberme enseñado el buen camino desde mi niñez, por haber sido tan paciente y en algunos momentos tan enérgica ya que sin eso no sería ahora lo que soy.

Don Arturo, que con tu ejemplo y entereza me haz marcado que con empeño y trabajo uno puede lograr sus objetivos, además de el ser tolerante y respetuoso con los demás. Trataré de pasar estos valores a mis hijos.

Señora Guadalupe gracias por darme la vida, por aquellos consejos que en su momento han sido de enorme ayuda... Gracias por ser mi amiga.

Creo quedar corto con estos párrafos ya que no existen palabras para describir el que tan orgulloso me siento de ser su hijo.

Gracias papás...

Agradezco a toda mi familia que aunque pequeña en número, ha sido muy grande el apoyo y su cariño, en especial a mi hermano Alberto y a mis hermanas Gisela y Nancy. Quiero dedicar muy en especial este trabajo a mi tío Arturo, en donde quiera que se encuentre.

A mi otra familia... mis amigos iqué son muchos... afortunadamente! **Gracias...**

INDICE.

I. PALABRAS CLAVE.	1
II. INTRODUCCIÓN.	3
III. ANTECEDENTES.	
3.1. Prueba de impacto Charpy.	6
3.2. Prueba de impacto Charpy instrumentado.	7
IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	
4.1. Instrumentación del péndulo marca SATEC modelo SI-1D3.	11
4.2. Descripción de los componentes.	14
4.2.1. Galga o strain gages.	14
4.2.1.1. Instalación de galgas.	19
4.2.2. Disparador o trigger.	24
4.2.3. Tarjeta osciloscopio.	25
4.2.4. Amplificador acondicionador de señales.	27
4.2.4.1. Excitación.	28
4.2.4.2. Puente de Wheatstone.	29
4.2.4.3. Filtrado.	32
4.2.4.4. Ganancia.	33
4.3. Calibración de la galga.	33
4.4. Procedimiento para una prueba de impacto instrumentada.	36

V. RESULTADOS Y DISCUSION.	
5.1. Prueba de impacto para latón.	39
5.2. Prueba de impacto para latón recocido.	41
5.3. Pruebas en acero 4140 templado.	43
5.4. Pruebas para acero 1018.	45
5.5. Prueba de impacto para probetas subdimensionadas.	47
5.6. Galgas en los soportes.	48
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	50
VII. BIBLIOGRAFIA.	52
VIII. ANEXO I.	54

I. Palabras claves.

Acero. Aleación de base hierro, maleable en algún intervalo de la temperatura a que fue inicialmente fundida; contiene manganeso, generalmente carbono y a menudo otros elementos de aleación.

Anisotrópico. Que presenta propiedades diferentes en direcciones diferentes.

Cristalinidad. Arreglo periódico de átomos.

Clivaje. Superficie de fractura característica de materiales frágiles, se relaciona por superficies de fracturas planas.

Deformación elástica. Deformación reversible sin desplazamientos atómicos (moleculares) permanentes.

Deformación plástica. Deformación permanente.

Dureza. Resistencia de un material a la penetración; por ejemplo, por rayadura o por acción de un penetrador.

Dúctil. Capaz de ser deformado plásticamente por laminado, estirado (como el alambre).

Elasticidad. Propiedad de un material en virtud de la cual tiende a recuperar su tamaño y forma originales después de la deformación.

Factor de la galga. Es la sensibilidad del strain gage que esta expresada por la relación del cambio de resistencia y el esfuerzo, y se representa por k .

Fractura. Es la separación en dos o más partes de un material provocado por algún esfuerzo. Esencialmente existen solo dos tipos de fractura en los materiales.

Fractura frágil. Falla por propagación de fisura y con ausencia de ductilidad significativa.

Fractura dúctil. Se produce por la rápida propagación de una grieta, con el mínimo de absorción de energía y deformación plástica.

Fractura dinámica. Es una metodología para el estudio de la nucleación y propagación de grietas, y constituye un importante desarrollo tecnológico para asegurar la integridad de estructuras

ingenieriles. La importancia de este desarrollo tecnológico radica en predecir el inicio de la propagación rápida de la grieta y de esa forma prevenir condiciones severas en grandes estructuras.

Fragilidad. Calidad de un material que da lugar a la propagación de fisuras sin deformación plástica apreciable.

Latón. Aleación que consiste principalmente de Cobre (superior al 50 %) y Zinc a la cual se le pueden agregar otros elementos.

Microestructura. Rasgos estructurales (como granos, subfronteras, etc.) visibles con ayuda de un microscopio adecuado. Estructura de metales revelada por examen de la superficie atacada químicamente de una muestra pulida a una amplificación que no exceda diez diámetros.

Micrografía. Reproducción gráfica de la superficie de una muestra preparada a una amplificación que no exceda de 10 diámetros.

Plasticidad. Capacidad de un metal para deformarse no elásticamente sin ruptura.

Propiedades mecánicas. Propiedades de un material que revelan un comportamiento elástico e inelástico cuando se aplica una fuerza, indicando de este modo su adaptabilidad para las aplicaciones mecánicas.

Recocido. Calentar y mantener a una temperatura adecuada para después enfriar a una rapidez adecuada, para reducir la dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajado en frío producir una microestructura deseada.

Revenido. Tratamiento térmico del acero templado para reducir su fragilidad.

Temple. Enfriado rápido de una aleación para mantener una estructura de alta temperatura.

Tenacidad. Capacidad de un metal para absorber energía y deformarse plásticamente antes de fracturarse. Generalmente es medida por la energía absorbida en un ensayo de cargas aplicadas con impacto sobre una barra muescada.

Tratamiento térmico. Calentar y enfriar un metal o aleación sólida en tal forma que se obtengan las condiciones o propiedades deseadas.

II. INTRODUCCIÓN.

Una prueba de impacto convencional nos indica la energía necesaria para que un material sea fracturado. La prueba se realiza de acuerdo a la norma ASTM E23₍₂₎ y la energía de fractura se calcula a través de la pérdida de energía de un péndulo al impactar una probeta, el valor de la energía en Joules es leído en un indicador de carátula. Una prueba instrumentada provee gráficas carga VS tiempo además de la energía absorbida calculada a partir del área bajo la curva obtenida. La señal de salida de la celda de carga durante el impacto es registrada en un osciloscopio y representa el historial de carga VS tiempo del entalle en la probeta.

La prueba Charpy instrumentada permite determinar lo siguiente:

1. La energía asociada con la iniciación y propagación de la fractura.
2. La temperatura de transición dúctil - frágil o temperatura de fragilización.
3. El campo de esfuerzos dinámico.
4. El esfuerzo intrínseco de la fractura por clivaje.
5. La tenacidad a la fractura dinámica.
6. El desplazamiento de apertura de grieta crítica.
7. La velocidad de grieta.
8. Una medida indirecta de la superficie o apariencia de la fractura.

El uso de la instrumentación en una máquina de impacto Charpy permite monitorear analógicamente una respuesta de carga contra tiempo. Mientras que en la probeta Charpy se presenta deformación y fractura. Entre las ventajas de la prueba Charpy instrumentada podemos mencionar la obtención de información adicional mientras se mantiene un bajo costo, y la posibilidad de usar probetas subdimensionadas (especímenes pequeños).

Los requerimientos de instrumentación de un péndulo, la forma de las curvas para un acero, así como las relaciones entre la prueba de impacto y ecuaciones de mecánica de fractura se encuentran en el *Metals Handbook Vol. 8* (4). Lo más común para esta operación es usar strain gages (galgas de deformación) en el martillo para sensar el comportamiento de carga contra tiempo del espécimen de prueba.

Los primeros indicios que se tienen de los strain gages datan de mediados de 1830 y fue dado por un efecto, del cual Charles Wheatstone hizo mención hasta 1843, en su primer publicación sobre el circuito puente de Wheatstone que él inventó. Este efecto es el cambio de resistencia en un conductor eléctrico debido a efectos de esfuerzos mecánicos. William Thomson (1824-1905) y Lord Kelvin en 1892 presentaron un trabajo sobre strain gages publicado en 1856.

El cambio de resistencia de un alambre bajo tensión es muy pequeña. Pero para sus mediciones Thomson usó galvanómetros altamente sensibles los cuales son muy útiles en aplicaciones técnicas o para uso en la industria. Pero además solo son apropiados para mediciones de procesos estáticos. Con la llegada del amplificador electrónico se pudieron estudiar procesos dinámicos de deformación.

En Alemania las primeras investigaciones que explican el efecto fueron emprendidas por el Instituto de Investigaciones para la Aviación. Diseñaron pistas con películas de carbón para mediciones de esfuerzos pero fueron de poco uso.

Durante 1938 en USA dos investigadores estuvieron trabajando simultáneamente pero por separado sobre la idea de usar el "Efecto de Thomson" para propósitos de medición. Esos estudios llevaron al desarrollo de los strain gages y subsecuentemente a aplicaciones diversas.

Uno de los dos investigadores, Edward E. Simmons, trabajó en California con un material entrelazado, el cual introdujo dentro de un cilindro de metal e hizo un dispositivo eléctrico para medir la fuerza de impulso ejercida sobre un espécimen por una máquina de pruebas de impacto.

Arthur Claude Ruge estuvo trabajando en la Facultad de Sismología para el Instituto de Tecnología de Massachussets y midió los esfuerzos debido a las vibraciones de un terremoto sobre un modelo

de un tanque de agua resistente a terremotos. Los equipos de medición disponibles en aquel tiempo no podían ser usados sobre su modelo. En uno de sus últimos intentos Ruge tomó una resistencia de alambre muy delgada, la introdujo en zig-zag sobre un pedazo de papel delgado y la unió a conectores de mayor diámetro, la pegó en una viga que al ser doblada comparo las mediciones con un dispositivo tradicional de medición de esfuerzos. Encontró buena correlación con una función lineal entre el esfuerzo y los valores desplegados sobre el rango de medición ya sea con valores positivos y negativos (tensión y compresión). Así fue que la “resistencia eléctrica strain gage de malla” fue inventada. Este tipo de strain gages son los mismos que normalmente se utilizan hoy⁽¹⁴⁾. En la figura 2.1 podemos observar algunos modelos de strain gages utilizados hoy en día, estos tienen diferentes dimensiones y diseño ya que son utilizados para diferentes tipos de análisis⁽¹⁴⁾.



Figura 2.1. Algunos modelos de strain gages que son utilizados hoy en día.

III. ANTECEDENTES.

3.1. Prueba de Impacto Charpy.

Los primeros registros que se tienen sobre pruebas de impacto aparecen en el año 1849, en el cual se formó una comisión británica para el uso del hierro en la industria ferroviaria, la cual empieza a usar una aproximación a la prueba de impacto. Aparentemente las fallas estructurales en campo condujeron a algunos investigadores a especular como afectan a los materiales las cargas de impacto y a diferenciarlas de las cargas estáticas tales como esfuerzos de tensión o compresión aplicados lentamente.

En 1857, Rodman produjo una máquina de caída libre (drop-weight) para caracterizar el acero de armamento, y en los subsiguientes 30 años, su máquina fue ampliamente usada para caracterizar vías de ferrocarril y productos terminados como tuberías y ejes.

LeChâtelier (1892) introduce el uso del entalle en las probetas, encontró que algunos aceros mostraban un comportamiento dúctil en una barra rectangular, mientras que mantenían con comportamiento frágil en probetas sin entalle.

En 1905 Charpy propuso el diseño de una máquina que es similar a los diseños actuales y publica las primeras referencias de las pruebas y método Charpy.

En 1923 un subcomité de la ASTM estableció un método de prueba estándar para pruebas del péndulo de impacto y en 1933 aparece publicado "Método tentativo para pruebas de impacto de materiales metálicos" con la designación ASTM E 23-33T (1).

En la actualidad la prueba de impacto Charpy es usada para determinar la energía de fractura principalmente en aceros a una temperatura de servicio, esta no da números que puedan ser sustituidos en una ecuación de fractura y tampoco proporciona información sobre predicciones del comportamiento del material. La prueba Charpy es un excelente medio para determinar diferencias relativas en la tenacidad a la fractura (energía de impacto) entre dos materiales diferentes o

materiales con microestructura diferente, aunque esto es útil esta limitado a materiales que tienen una razonable cantidad de tenacidad y en algunos casos se determina el comportamiento dúctil – frágil como una función de la temperatura. La prueba se realiza siguiendo la norma ASTM E23⁽²⁾. Como se puede ver la prueba es muy antigua NIST a mantenido un programa de calibración de péndulos a nivel mundial. En México con la ley de normalización y metrología publicada en el diario oficial en 1992 y la creación de los reglamentos del SNC en 1993 hicieron posible acreditar a un laboratorio para calibración de péndulos que actualmente viene realizando esta labor en los péndulos en el país⁽³⁾.

3.2. Prueba de impacto Charpy instrumentada.

Los primeros registros sobre la instrumentación de un péndulo fueron obtenidos mediante mediciones ópticas, realizaron mediciones en el cambio de la velocidad del péndulo (F. Korber y A. Storp en 1926 y 1928 R. Yamada). Watanabe (1929) usó cristales piezoeléctricos en el yunque para realizar mediciones de carga. Aproximadamente treinta años mas tarde Tanaka y Umekawa (1958) usaron cristales piezoeléctricos en el péndulo y una fotocelda para medir el desplazamiento. En el mismo año Ono utilizó “galgas”(strain gages) como celda de carga en el yunque y concluyo que el estudio de la energía de iniciación y propagación de la grieta no se separan durante una prueba Charpy. B. Augland (1962) analizó la energía absorbida durante la prueba y las relaciono con las mediciones convencionales del péndulo todo esto con galgas en el yunque.

Cottrell en el mismo año uso medidores piezoeléctricos en el péndulo inicio la cuantificación de tenacidad dinámica, usando la formula de doblés en tres puntos pero los resultados de prueba están principalmente arriba de la cedencia con apreciable deformación plástica. Tanaka y Nunomura usaron medidores semiconductores en el péndulo para registrar la carga, ellos registraron el esfuerzo de fractura por la teoría de dobles simple y un factor de constricción plástica. Este valor fue comparado con el esfuerzo de cedencia superior encontrado de las pruebas de tensión dinámica y usado para la temperatura de transición de fractura frágil, de manera similar Hendricson y

colaboradores obtuvo resultados parecidos sin sus cálculos elaborados de plasticidad. Grumbach (1967) usando galgas en el péndulo compara favorablemente mediciones de energía y notó una relación uno a uno entre la caída de la carga y el porcentaje de apariencia de cristalinidad. Una estudio reciente en aceros de bajo carbono compara factores de constricción y esfuerzo de clivaje crítico con valores predichos sobre un rango de temperatura y estudios del efecto de algunas variables metalúrgicas en el esfuerzo de clivaje₍₅₎.

La figura 3.1, ilustra esquemáticamente el comportamiento a la fractura como una función de la temperatura de un acero. Como se muestra la instrumentación permite observar varios estados en el proceso de fractura, que van desde una fractura frágil hasta una fractura dúctil, los cuales pueden identificarse claramente₍₄₎.

El valor de energía, W_m se obtiene del área bajo la curva de carga contra tiempo a una carga máxima P_m . Este valor de impulso es convertido a energía usando la segunda ley de Newton en el cual acontece que la velocidad del péndulo decrece durante el proceso de deformación y fractura, la disminución de esta velocidad es proporcional a la carga instantánea en la probeta a un tiempo particular "t". La energía instantánea absorbida E_i se simplifica a:

$$\Delta E = E_a (1 - (E_a / 4E_o))$$

Donde :

E_o es la energía cinética disponible en el péndulo

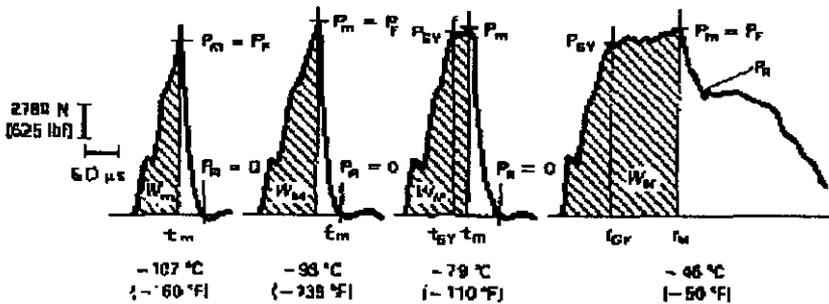
V_o es la velocidad de impacto inicial.

m es la masa efectiva del péndulo.

$$E_a = V_o \int P dt.$$

La habilidad para separar la energía absorbida total dentro de componentes requiere de información de la ganancia por instrumentación. Los diagramas de carga contra tiempo pueden ser contruidos

para ilustrar varios estados del proceso de fractura indicando el modo de transición del comportamiento de fractura frágil a dúctil.



PM = Carga máxima.

PGY = Cedencia general por carga.

PF = Carga de fractura rápida (generalmente Clivaje).

PA = Carga de frenado después de la propagación de la fractura rápida.

TM = Tiempo para la carga máxima.

TGY = Tiempo para la cedencia general.

WM = Energía absorbida a la carga máxima.

Figura 3.1. Forma de las diferentes curvas de impacto instrumentado y su variación con la temperatura de las muestras.

En México, un grupo de investigadores empieza a trabajar en 1995 en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) en la instrumentación de un péndulo, empleando galgas de deformación⁽¹⁵⁾. En 1999 en el Instituto de Física de la UNAM se continúa el trabajo para instrumentar un péndulo, colocando sensores de diferente tipo. Con análisis de algunos de los resultados obtenidos se presenta este trabajo. Aquí se describe el proceso de instrumentación del

péndulo, se evalúa su funcionamiento y se presentan algunos resultados obtenidos en aleaciones metálicas. Algunos de ellos fueron presentados en el XXII Congreso Internacional de Metalurgia y Materiales (Anexo I).

IV. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

4.1. Instrumentación del péndulo marca SATEC modelo SI-1D3.

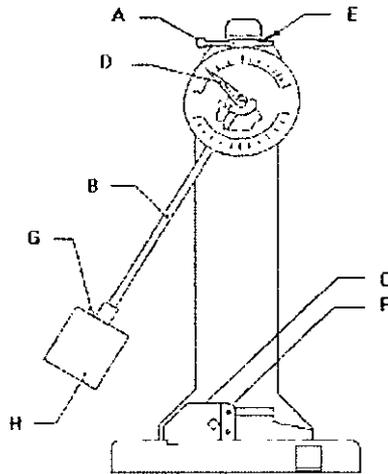


Figura 4.1.1. Diagrama de máquina pruebas de impacto SATEC modelo SI-1D3.

- A. Control de operación.
- B. Tubo del péndulo.
- C. Montaje del yunque.
- D. Aguja indicadora.
- E. Seguro del péndulo.
- F. Soporte de probetas Charpy.
- G. Tornillos retenedores del golpeador.
- H. Martillo.

La instrumentación consta de un sencillo y versátil sistema que se describe a continuación: un martillo instrumentado con tres galgas de 350 Ohms, un amplificador de señales, un disparador o trigger, una tarjeta de adquisición de la señal (Visual Scope).

Con esto se ha construido un prototipo instrumentado, lo cual permite hacer la evaluación de su funcionamiento con muestras de material conocido.

La señal es generada por una galga. La galga empleada es marca VISUAL MEASUREMENT utilizada para convertir los esfuerzos mecánicos debido al impacto en una señal eléctrica y balanceada por medio de un puente de Wheatstone. La galga esta pegada en la parte inferior del golpeador (ver la figura 4.1.2.). Además se colocaron otras dos galgas adicionales en los soportes de las probetas (ver figura 4.1.2), la aplicación de estas las veremos más adelante (ver punto 5.6).

La señal generada se registra en una tarjeta osciloscopio marca Keithley, utilizada para obtener una señal de salida digital. Antes del proceso de adquisición, nuestra señal es procesada por un sistema acondicionador amplificador de señales donde pasa por varias etapas (puente de excitación, ganancia, filtrado) que adelante veremos con mas detalle.

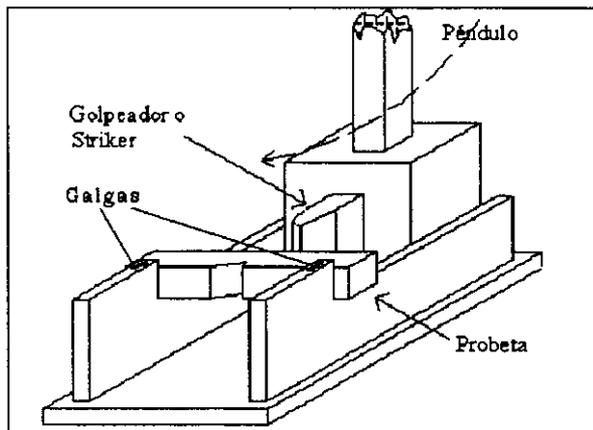


Figura 4.1.2.

La figura 4.1.3. nos muestra las fases durante el rompimiento de la probeta en una prueba de impacto, la figura 4.1.4. muestra como la señal registrada por la galga es desplegada en forma de

una gráfica. Los puntos marcados como 1, 2, 3, 4, y 5 se refieren a los diferentes eventos durante el rompimiento de la probeta, descritos en la durante la figura 4.1.3.

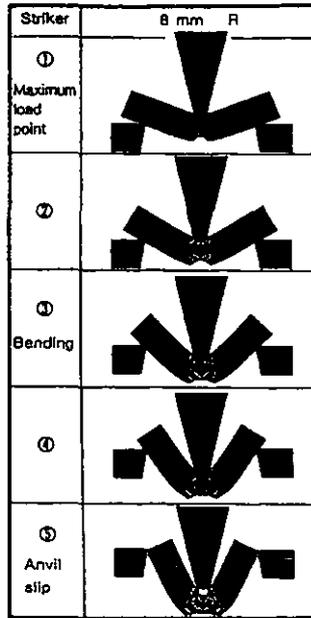


Figura 4.1.3.

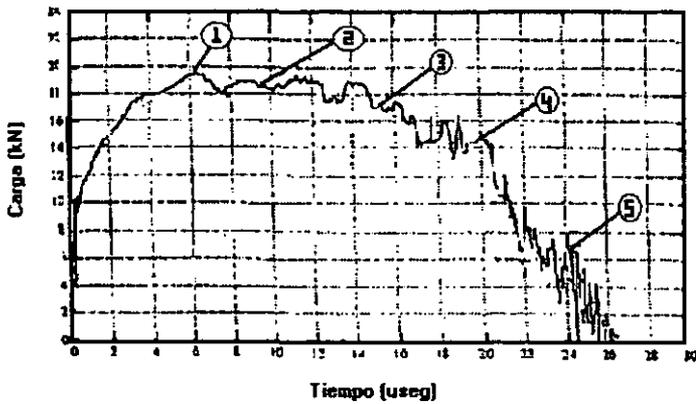


Figura 4.1.4.

4.2. Descripción de los sensores, componentes electrónicos y sistema de adquisición de datos.

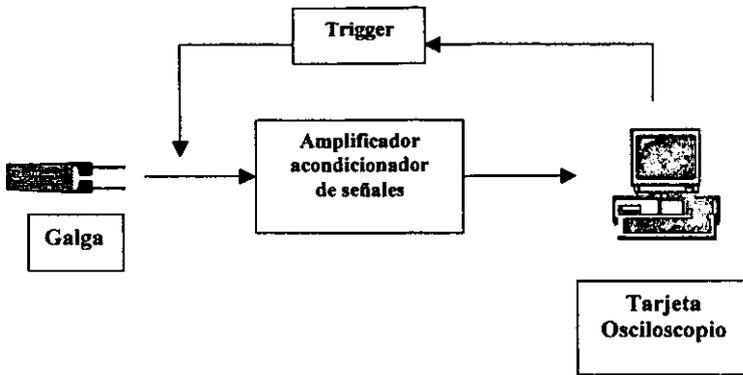


Figura 4.2. Esquema del sistema de impacto instrumentado.

4.2.1. Galga o strain gages.

El strain-gage o “galga” es un dispositivo utilizado para convertir esfuerzos mecánicos en una señal eléctrica a través de una resistencia. El principio de trabajo del strain gage esta basado sobre la relación del cociente entre la deformación y la resistencia de conductores eléctricos, los cuales fueron descubiertos por Wheatstone y Thomson (vea introducción).

En general los conductores eléctricos cambian su resistencia con un esfuerzo mecánico provocado por una fuerza de compresión o tensión. El cambio de la resistencia es debido a la deformación del conductor y al cambio en la resistividad “Q” del material conductor como resultado de cambios microestructurales. Estos procesos esta descrito por la siguiente relación:

$$\frac{dR}{R_0} = \underbrace{\varepsilon(1 + 2\nu)}_{\text{Porción Geométrica}} + \underbrace{\frac{dQ}{Q}}_{\text{Porción Microestructural}}$$

donde:

R= resistencia eléctrica

ε =deformación

ν = razón de Poisson.

Q= resistividad.

De dicha ecuación se entiende que el cambio de resistencia de la galga tiene dos términos, el primer termino esta asociado a la parte geométrica y el segundo a la parte microestructural. Dentro de la parte geométrica encontramos a ε (deformación), donde se define como el cociente de un cambio de longitud entre una longitud de referencia:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

El factor de sensibilidad de deformación de la galga esta expresado por el cociente del cambio relativo entre la resistencia y la deformación y se representa por el símbolo κ donde:

$$\kappa = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta l / l_0} = \frac{\Delta R / R_0}{\varepsilon}$$

El factor κ es un parámetro de proporcionalidad para completar la deformación de la galga el cual esta influenciado por la configuración de la rejilla de medición y la condición de transferencia de la deformación dentro de la rejilla de medición, esta κ usualmente es pequeña. El factor de

deformación κ es determinado por el fabricante usando una prueba de muestreo del lote de producción de acuerdo a reglas estadísticas₍₁₄₎.

Algunos valores promedios de factores de deformación se muestran en la tabla 4.2.1.

Material de la rejilla de medición (Nombre comercial)	Valores de Composición	Valor aproximado del factor de la galga (κ).
Constantan	57 Cu, 43 Ni	2.05
Karma	73 Ni, 20 Cr, res. Fe +Al	2.1
Nicromel V	80 Ni, 20 Cr	2.2
Platino Tungsteno	92 Pt, 8 W	4.0

Tabla 4.2.1. Algunos valores de "k" para diferentes materiales y su composición.

Por otra parte para las galgas de deformación con una con malla de medición de Constantan tienen características no lineales debido a que se encuentran en la región de grandes deformaciones, superiores a 150, 000 μ m/m. La función obtenida es parabólica y puede ser aproximada bastante bien con una polinomial de la forma $\epsilon^* = \epsilon + \epsilon^2$.

Las mediciones de esfuerzo usando strain gages suponen que el esfuerzo sobre el objeto bajo investigación es transferido sin pérdidas al strain gage. Esto requiere de una fuerte unión entre el strain gage y el objeto. En la mayoría de los casos las superficies abiertas de los objetos de medición son accesibles para medir, aunque pueden ser en cavidades internas tanto como fuera del objeto.

La galga o strain gage consta de varias partes, esto lo podemos observar en la figura 4.2.1. Además se puede observar las diferentes dimensiones de una galga son importantes, puesto que no todos las galgas son usadas para los mismos análisis.

El largo de la galga es una importante consideración para la selección de un strain gage y usualmente el primer parámetro que se debe definir. Las dimensiones señaladas para el largo de la galga y el ancho de la malla se refieren a la zona efectiva de medición. El tamaño de la matriz representa las dimensiones aproximadas del material de soporte.

El tipo de galga utilizada para la instrumentación de la máquina de pruebas de impacto fue como el modelo de la de la figura 4.2.1. Se seleccionó este modelo basándose en los resultados de la experiencia adquirida en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares⁽¹⁵⁾.

Este modelo es de la marca Measurements Group, Inc. (MM), estas son para propósitos generales, pero comúnmente son usados en análisis de esfuerzos. Este strain gage consta de dos elementos ya que vienen dos galgas colocadas a 90 ° cada una, sus secciones tienen una conexión eléctrica común y tienen una resistencia de 350 Ω El material de la malla de medición es Constantan (57 Cu, 43 Ni). Este strain gage tiene un grueso de 0.03 mm, un ancho de 3.81 mm, un largo de 12.7 mm, y por último el tamaño total de la matriz es de 15 mm x 5.3 mm.

Las mediciones de esfuerzo usando strain gages suponen que el esfuerzo sobre el objeto bajo investigación es transferido sin pérdidas al strain gage. Esto requiere de una fuerte unión entre el strain gage y el objeto. En la mayoría de los casos las superficies abiertas de los objetos de medición son accesibles para medir, aunque pueden ser en cavidades internas tanto como fuera del objeto.

La galga o strain gage consta de varias partes, esto lo podemos observar en la figura 4.2.1. Además se puede observar las diferentes dimensiones de una galga puesto que no todas las galgas son usadas para los mismos análisis.

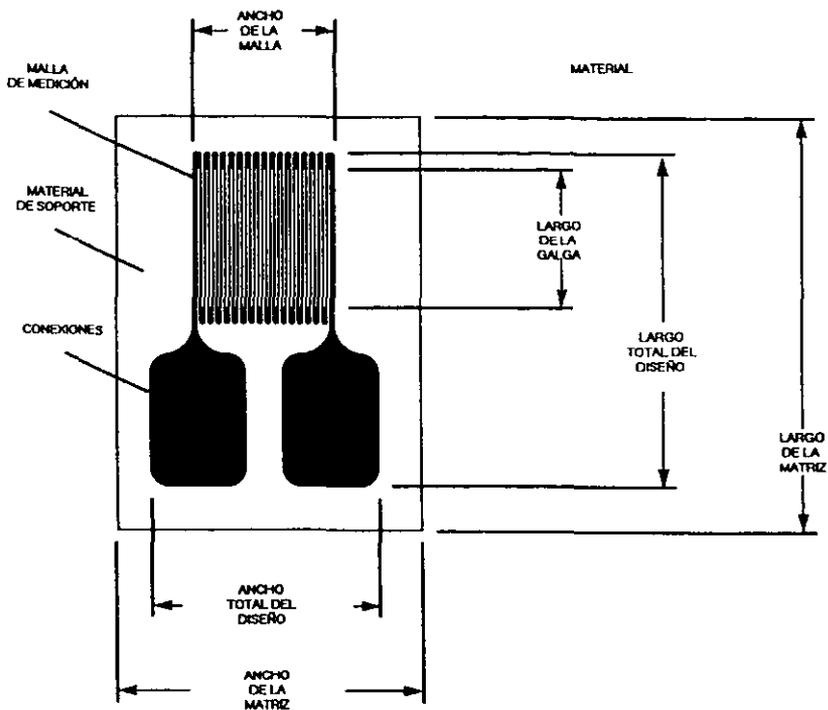


Figura 4.2.1.1.

El largo de la galga es una importante consideración para la selección de un strain gage y usualmente el primer parámetro que se debe definir. Las dimensiones señaladas para el largo de la galga y el ancho de la malla se refieren a la zona efectiva de medición. El tamaño de la matriz representa las dimensiones aproximadas del material de soporte.

El tipo de galga utilizada para la instrumentación de la máquina de pruebas de impacto fue como el modelo de la de la figura 4.2.1. Se seleccionó este modelo basándose en los resultados de la experiencia adquirida en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares⁽¹⁵⁾.

Este modelo es de la marca Measurements Group, Inc. (MM), estas son para propósitos generales, pero comúnmente son usados en análisis de esfuerzos. Este strain gage consta de dos elementos ya que vienen dos galgas colocadas a 90 ° cada una, sus secciones tienen una conexión eléctrica común

y tienen una resistencia de 350Ω . El material de la malla de medición es Constantan (57 Cu, 43 Ni). Este strain gage tiene un grueso de 0.03 mm, un ancho de 3.81 mm, un largo de 12.7 mm, y por último el tamaño total de la matriz es de 15 mm x 5.3 mm.

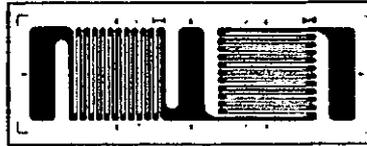


Figura 4.2.1.2. Galga modelo EA-06-125TG-350.

Los strain gages están colocados uno en la parte inferior del golpeador (ver figura 4.2.1.3) y los otros dos en los soportes de las probetas (ver figura 4.1.2).

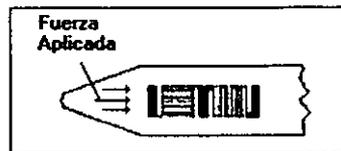


Figura 4.2.1.3. Ilustración de la parte inferior del golpeador donde está pegada una de las galgas.

Por último la parte de los strain gage que utilizamos para medir la fuerza aplicada es la que tiene la malla horizontal (vea la figura 4.2.1.3), por otro lado, la galga con la malla en forma vertical se utilizó para verificar su alineación⁽¹⁵⁾.

4.2.1.1. Instalación de las galgas.

Para la instalación se utilizó el kit de aplicación para strain gages GAK-2-200 de la marca Micro Measurements (MM). Este incluye todos los suplementos y herramientas especiales para la instalación de galgas el cual consta de:

- Una cinta adhesiva M-Bond 200.

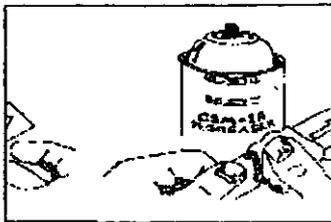
- Un desengrasante en spray CSM-1.
- Una botella de acondicionador A MCA-1.
- Una botella de neutralizador 5A MN5A.
- Un rollo de lija 220 SCP-1 (30m).
- Un rollo de lija 320 SCP-2 (30m).
- Un rollo de lija 400 SCP-3 (30m).
- Un paquete de cotonetes GSP-1.
- Un paquete de tela de algodón GSP-1.
- Un rollo de soldadura 361A-20R-25 (7.6m).
- Una botella de solvente (30ml).
- Una caja de terminales CPF-AST.
- Cable 326-DFV (30m).
- Una botella de recubrimiento (30ml).
- 20 cm² de hule grueso.

Además se utilizó el kit de adhesivos para strain gages M-BOND 610 de marca Micro Measurements (MM). Este consta de dos componentes el solvente y el epóxico fenólico, crea un adhesivo para aplicaciones de alta calidad incluyendo para transductores de alta precisión. El paquete contiene:

- 4 botellas de 11g (agente de curación).
- 4 botellas de 14g (resina).
- 4 brochas.
- 4 embudos mezcladores.

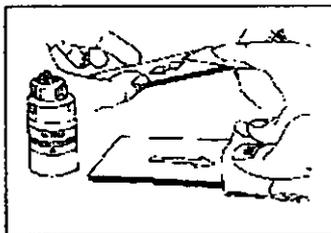
Los pasos básicos para el pegado de las galgas:

Figura 4.2.1.1.



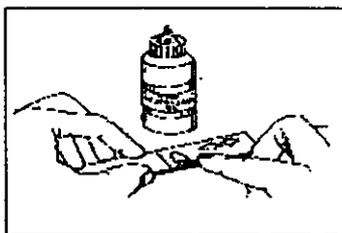
1. Desengrasar completamente el área donde se va a colocar el strain gage con algún tipo de solvente (ver figura 4.2.1.1).

Figura 4.2.1.2.



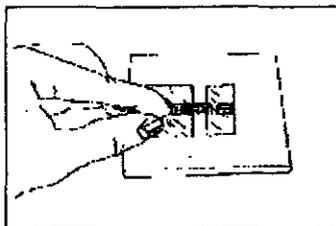
2. El área de trabajo se limpia con la lija del 220 ó 320 según el estado de oxidación, y para terminar se lija la superficie con la de 320 ó 400 según haya sido el caso. La limpieza con la lija se debe de hacer en la misma dirección de donde ira colocado el strain gage. Una vez terminada la limpieza se aplica el acondicionador con una tela de algodón (ver figura 4.2.1.2).

Figura 4.2.1.3.



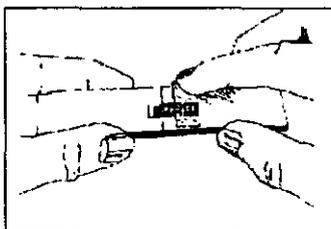
- Ahora se aplica el neutralizador 5ª en la superficie de trabajo y después se talla la superficie con un cotonete, una vez hecho esto se espera hasta que seque (vea figura 4.2.1.3).

Figura 4.2.1.4.



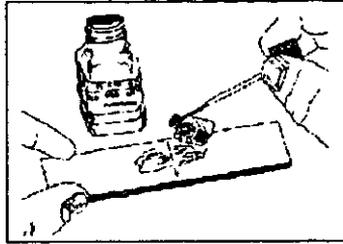
- Se remueve la galga de su envoltura, debe tener cuidado que la parte inferior de la galga no se exponga a aceite o sudor de las manos por eso se pide que sea tratada con mucho cuidado. Se coloca la galga y las terminales en cinta adhesiva como se observa en la figura 4.2.1.4.

Figura 4.2.1.5.



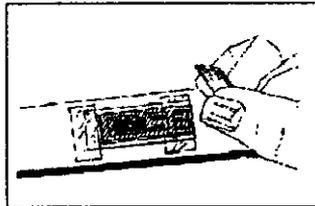
- En la superficie donde se va a pegar la galga se pone una marca, para que al momento de pegar se tenga la seguridad que la galga al fijarla va estar bien alineada y de acuerdo a la posición que se tenga en mente (ver figura 4.2.1.5).

Figura 4.2.1.6.



6. Con mucho cuidado, después de hacer la mezcla para el pegamento de acuerdo al manual de adhesivos para strain gages M-BOND 610₍₁₆₎ se procede a aplicar el pegamento al strain gage, las terminales y la superficie donde se instalarán con las brochitas que contiene el kit para adhesivos antes mencionado (vea la figura 4.2.1.6). Una vez que se ha hecho esto se procede a pegar la galga en la superficie a instalar ayudándose la cinta adhesiva del paso 4.

Figura 4.2.1.7.



7. Una vez pegado el strain gage y sus terminales se coloca un pedazo de hule grueso de modo que los cubra completamente y se coloca encima para después ejercer presión sobre él (ya sea con unas pinzas si es que el lugar de instalación se presta o en otro caso se coloca algo pesado) para que haya una mejor adhesión del strain gage con la superficie (ver figura 4.2.1.7). Una vez hecho esto se deja pasar 24 horas para después quitar lo que estaba ejerciendo presión.

8. Después de ejecutar el paso 7 se procede a aplicar una capa de glicerina muy fina en la parte del strain gage solamente y se deja secar por 24 horas para después comenzar a soldar las terminales a las conexiones necesarias.

4.2.2. Disparador o trigger.

Existe un disparador (trigger) para obtener la señal dentro de nuestra ventana de exploración, el disparador consta de un circuito serie de una resistencia y una fotorresistencia que están excitadas con una fuente de voltaje de DC.

La fotorresistencia es un componente cuya magnitud ohmica depende de la luz, o sea que presenta una menor oposición al paso de la corriente eléctrica al incidir una mayor luminosidad sobre la sustancia resistiva₍₁₃₎.

Tenemos un láser, que al hacer incidir su haz en la fotorresistencia hace variar su resistencia y por lo tanto nuestro voltaje en la resistencia que esta conectada en serie, este voltaje es censado con la salida del trigger donde a cierto nivel de voltaje nuestro disparador es accionado y al mismo tiempo la salida de nuestra tarjeta Visual-Scope. Un diagrama del circuito disparador se observa en la figura 4.2.2.

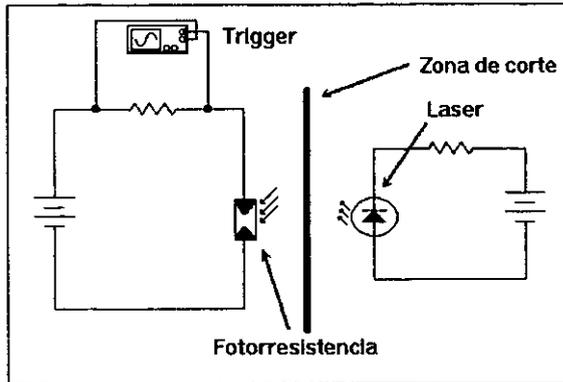


Figura 4.2.2. Circuito del disparador

4.2.3. Tarjeta Osciloscopio.

También llamada Visual-Scope es un instrumento de aplicación virtual fácil de usar programado para Microsoft Windows 3.1 o versiones superiores. Combinado con un hardware llamado Pcip-Scope, Visual-Scope transforma nuestra PC a una completo osciloscopio con almacenamiento digital y características dedicadas a osciloscopios. Los controles que despliega Visual-Scope y las operaciones que fielmente emula de los osciloscopios toma mucha ventaja de sus experiencias con otros instrumentos anteriores y minimiza el tiempo requerido de aprendizaje para que nosotros y nuestro equipo utilicemos instrumentos de un osciloscopio basados sobre una PC.

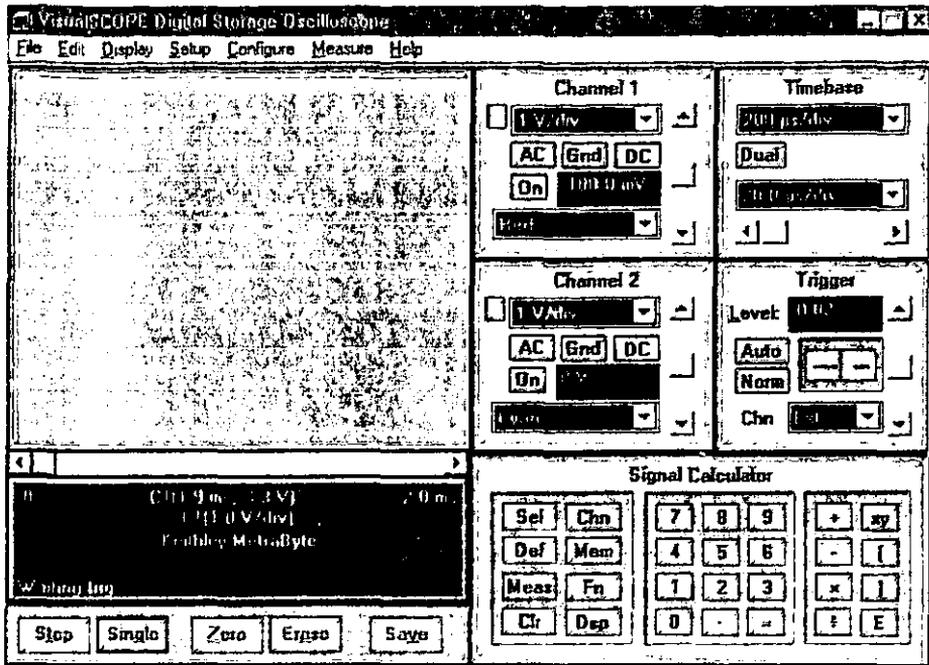


Figura 4.2.3.1. Ventana de Visual-Scope.

Visual-Scope soporta dos canales de entrada analógicos, cuatro canales para desplegar señal y un display alfanumérico. Puedes variar medidas de tiempo, amplitud y frecuencia sobre las señales, utilizando cursor en manual o automático con el calculador de señal puedes salvar señales en memorias, calcular funciones sobre las señales de entrada, o habilitar medidas automáticas sobre datos obtenidos. Visual-Scope tiene 14 mediciones automáticas a escoger. Puedes adquirir datos de formas de onda en disco, copiarlo a Windows Clipboard, o transferirlos a otras aplicaciones utilizando Dynamic Data Exchange (DDE). Una ventana de Visual Scope la podemos observar en la figura 4.2.3.1.

Características del Osciloscopio:

- 2 Canales de entrada analógicos.
- 1 Canal de disparo externo.

- 10 Mhz de banda ancha.
- 20 Mhz de velocidad de muestreo.
- 2 ns de tiempo de muestreo para formas de onda repetitivas.
- 8-bits de resolución vertical.
- 2048 muestras en el modo de canal sencillo.
- 1048 muestras en el modo de canal doble.

4.2.4. Amplificador acondicionador de señales.

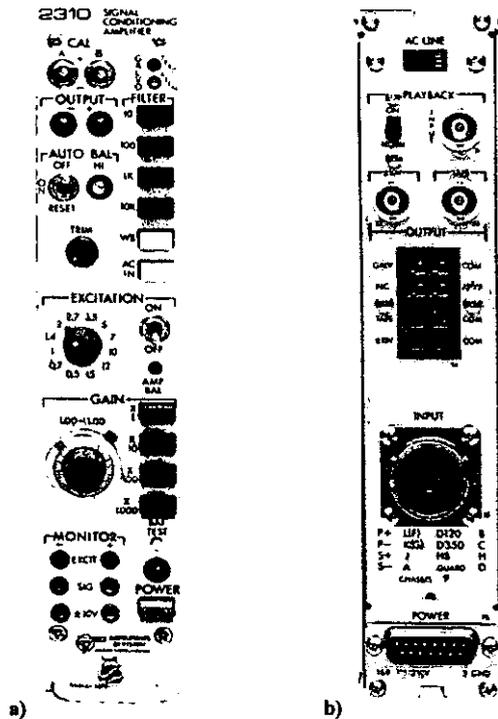


Figura 4.2.4. Las ilustraciones a) y b) nos muestran el panel frontal y trasero del acondicionador amplificador de señales marca VISHAY, modelo 2310.

Incluye un sistema versátil multicanales para acondicionar y amplificar señales de nivel bajo de galgas, para desplegar o grabar sobre equipo externo. Cada acondicionador consta internamente de varias fases de acondicionamiento, una mejor visión de estas fases la podemos observar en la figura 4.2.4.1. Cuando se utiliza varios amplificadores, cada amplificador acondicionador de señales 2310 es alimentado por separado y son eléctricamente aislados de todos los otros (pueden ser alimentados con líneas aparte), normalmente son insertados dentro de racks.

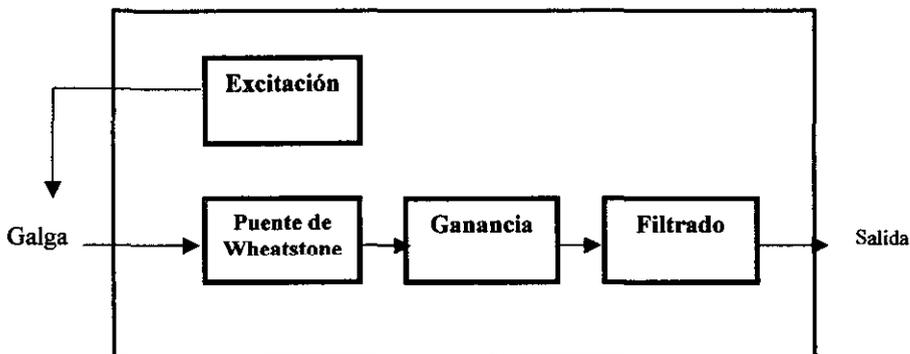


Figura 4.2.4.1. Diagrama de bloques del acondicionador amplificador de señales.

4.2.4.1. Excitación.

Para seleccionar la excitación del puente existe un switch de selección donde uno puede elegir el nivel de excitación deseado. En análisis de esfuerzo siempre es recomendable una alta excitación ya que la galga puede tolerar esta excitación bajo las condiciones de prueba (galgas de 350Ω o mayores). Pero usualmente para transductores comerciales los fabricantes especifican la excitación que debe de tener el puente. Para nuestros fines de estudio se tomó la excitación de 5 volts.

4.2.4.2. Puente de Wheatstone.

Cada modelo amplificador 2310 incorpora precisión, alta estabilidad en las resistencias del puente completo (Puente de Wheatstone) y cuatro perillas de calibración de resistencias.

El Puente de Wheatstone puede ser usado en varias formas para medir resistencias eléctricas:

- Para la determinación de valores absolutos de resistencia por comparación con una resistencia conocida.
- Para la determinación de cambios relativos en una resistencia.

Existen varias configuraciones del puente donde las que podemos mencionar el $\frac{1}{2}$ puente, $\frac{1}{4}$ de puente y puente completo, pero para nuestro estudio utilizamos el $\frac{1}{4}$ de puente. A continuación haremos un análisis de este, ya que nos ayudara a comprender mejor el funcionamiento de nuestro sistema.

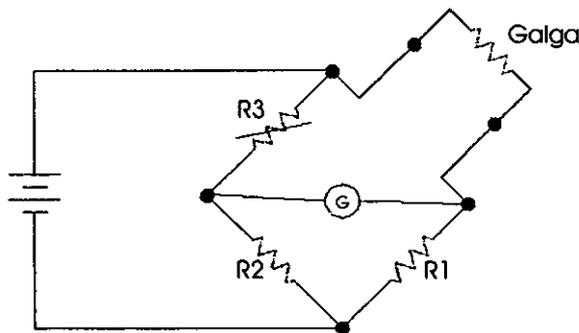


Figura 4.2.4.2. Circuito del puente de Wheatstone (configuración $\frac{1}{4}$ de puente).

El circuito comprende dos resistores fijos (R_1 y R_2), un resistor variable (R_3), una resistencia desconocida (la galga), una fuente de tensión y un galvanómetro. El dispositivo en la rama central

es el galvanómetro y es esencialmente un instrumento cuyo mecanismo se desvía a consecuencia de la corriente que pasa sobre él. Este tipo de instrumento esta proyectado de modo que su posición de corriente nula esta en el centro y una corriente en cualquier sentido producirá una desviación en el mismo sentido⁽¹²⁾. La galga es conectada como se muestra en el circuito y entonces se ajusta R_3 hasta que no hay corriente en el galvanómetro (moviendo el botón de Trim). En este punto se dice que el puente esta balanceado. Bajo esta condición balanceada $I_G = 0$, y de aquí la ley de corrientes de Kirchoff aplicada a los nodos centrales del puente da:

$$I_1 = I_3$$

$$I_2 = I_x$$

Además como $I_G = 0$, no hay caída de voltaje a través del galvanómetro y, por tanto, la ley de voltajes de Kirchoff requiere que:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2$$

$$I_3 R_3 = I_G R_G$$

Dividiendo una entre la otra y considerando el hecho de que $I_1 = I_3$ e $I_2 = I_G$, se obtiene la relación

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_G}$$

Por lo que:

$$R_G = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) R_3$$

Esto posibilita observar los cambios de resistencia en los strain-gages, los cuales son usualmente alrededor del orden de 10^{-4} a $10^{-2} \Omega$ para ser medidos con gran exactitud.

Existe un inconveniente en esta configuración ya que la salida del puente de Wheatstone no es lineal cuando se usa solamente un brazo activo a continuación se da una breve explicación del por qué la no-linealidad.

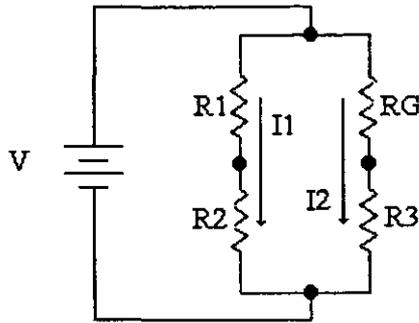


Figura 4.2.4.3. Circuito Puente de Wheatstone.

De la figura 4.2.4.3, si suponemos que R_1 , R_2 y R_3 tienen el mismo valor y R_G es variable (debido a la deformación de la galga). Nos podemos percatar que el circuito puente se puede analizar en dos mallas independientes, una donde circula I_1 y la otra donde circula I_2 . Si podemos observar, la malla donde circula I_1 la podemos tomar como una constante debido a que en la malla no existe algún cambio de resistencia ni de corriente y por lo tanto ni de caída de potencial a comparación de la otra malla donde esta R_G .

Por lo tanto si analizamos el paso de corriente en la malla de observación (en donde esta R_G) obtenemos la corriente en esa malla (I_2):

$$I_2 = \frac{v}{R_G + R_3} \dots\dots\dots(1)$$

Ahora obtenemos el voltaje en R_G y obtenemos la siguiente expresión:

$$V_G = I_2 R_G \dots \dots \dots (2)$$

Si sustituimos (1) en (2) obtenemos.

$$V_G = \frac{v}{R_G + R_3} (R_G) \dots \dots \dots (3)$$

Si dividimos (3) entre R_3 obtenemos:

$$V_G = \left(\frac{\frac{R_G}{R_3}}{\frac{R_G}{R_3} + 1} \right) v$$

Si hacemos un cambio de variable:

$$V_G = \left(\frac{x}{x+1} \right) v$$

Ahora si aplicamos series de Taylor obtenemos esta expresión:

$$V_G = vx - vx^2 + vx^3 - vx^4 + vx^5$$

En conclusión, podemos decir que si desarrollamos la expresión por series de Taylor podemos obtener una ecuación polinomial como la del ajuste obtenido por Microcal Origin (ver sección 4.3).

4.2.4.3. Filtrado.

El acondicionador viene provisto con filtros activos de dos polos con características Butherworth teniendo altas frecuencias de corte a las siguientes frecuencias: 10, 100, 1000, 10 000 Hz. Tiene las siguientes posibles modificaciones:

- a) Cambiar a una o más frecuencias de selección.
- b) Incrementar a 4 o 6 polos.

Una de las razones por las cuales se utilizan los filtros con características Butherworth es que su caída de corte es mucho más cerrada (F_{∞} en las curvas).

4.2.4.4. Ganancia.

Los controles de ganancia están en una perilla donde uno puede ajustarla de entre 1.000 y 11.000, estos valores son multiplicados cuando uno aprieta los botones de X1, X10, etc.

El usuario debe estar consiente que el sistema de ganancia es el producto del puente de excitación y la ganancia de amplificación. Esto es que siempre es recomendable operar el puente de excitación a un nivel alto y una ganancia de amplificación mínima de tal manera que minimizara la amplificación de pequeños ruidos que están siempre presentes.

4.3. Calibración de la galga.

Se calibró la deformación de la galga, colocando la celda de carga en una máquina de tensión - compresión marca Shimatzu. Se aplicó carga en incrementos de 0.1kN hasta 2.5kN y otra de 2.5 kN a 20kN obteniendo una señal de salida en un voltímetro (Keithley, 196 System de 8 dígitos) donde obtuvimos dos series de datos que al graficarlos nos dio por resultado una curva como la que se muestra en la figura 4.3.1. Como mejor a aproximación a la señal se propone un ajuste con una ecuación polinomial de grado 5 (gráfica 4.3.2). La figura 4.3.3 nos muestra el error en el ajuste del polinomio.

La función obtenida en el ajuste no es lineal debido a que se usó la configuración de un cuarto de puente (ver 4.2.4.2).

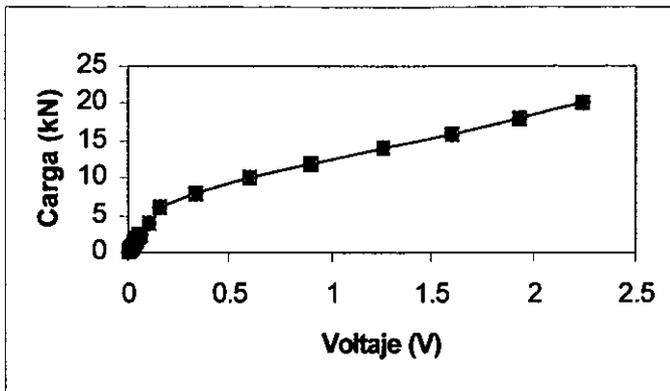
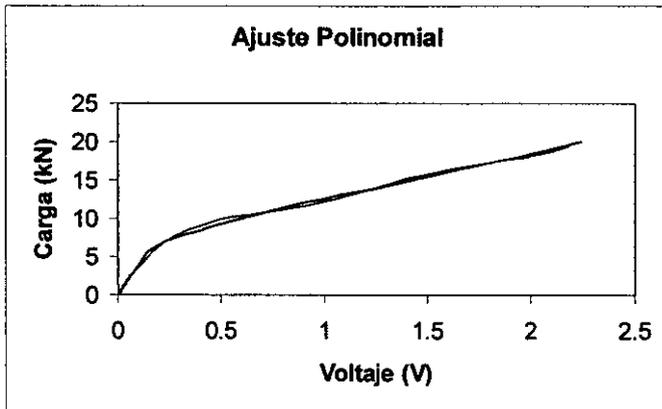


Figura 4.3.1.gráfica obtenida de calibración de la galga.

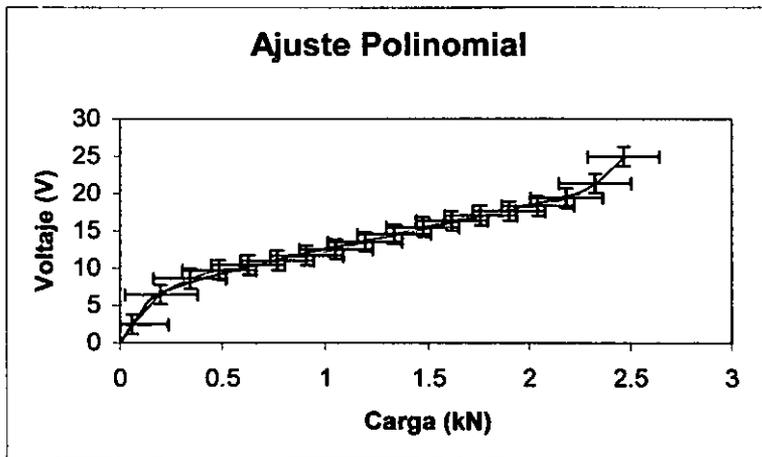


Gráfica 4.3.2. Ajuste polinomial de calibración de la galga.

Regresión polinomial.

$$Y = A + B_1 \cdot X + B_2 \cdot X^2 + B_3 \cdot X^3 + B_4 \cdot X^4 + B_5 \cdot X^5$$

Constantes	Valor
A	-0.15791
B1	51.11636
B2	-112.44648
B3	128.82398
B4	-65.22731
B5	11.02334



Gráfica 4.3.2. Error en el ajuste polinomial.

4.4. Procedimiento para una prueba de impacto instrumentada.



Figura 4.4. Foto de la máquina de pruebas de impacto instrumentada.

1. Se alimenta la PC y se busca el programa Visual-Scope. En Visual Scope debe de mantener el Trigger en el canal externo y a un nivel de 0.03 a 0.06 en el rango de caída de voltaje, mientras que la señal de salida del acondicionador de señales debe de estar en el canal 1 (Ch1) en el rango de mv/div y en la base de tiempo (Time Base) en μs ó ms/div según sea el caso para materiales frágiles o dúctiles.
2. El acondicionador amplificador de señales se enciende y se deja reposar un poco más de 5 minutos para lograr la estabilidad de la fuente de alimentación.

3. Una vez que pasaron los 5 minutos se procede a excitar el acondicionador girando la perilla hasta 5 volts y moviendo el botón de encendido a ON.
4. Después que se ha excitado se procede a darle una ganancia haciendo girar la perilla a 1 y presionando el botón de X1000.
5. Ahora viene el filtrado presionando el botón de 10K.
6. Una vez que se hacen los tres pasos anteriores el botón que esta en AUTO BAL se va a mover hasta RESET de un solo movimiento y se va a dejar ahí por un espacio de 3 a 4 segundos y se suelta. Si cualquiera de los leds rojos de la parte de arriba se encienden con el botón de TRIM se hará girar a la izquierda o a la derecha hasta lograr que los leds queden apagados (esto indicara que nuestro puente de excitación esta balanceado). Uno podra darse cuenta que el puente esta balanceado debido que en le display de Visual Scope la señal de c.d. estará en el nivel de cero aproximadamente.
7. Se enciende el láser y la fuente de alimentación del circuito de la fotorresistencia.
8. Se coloca el brazo del péndulo listo para hacer el disparo y se coloca el seguro para evitar accidentes.
9. Para cualquier disparo antes se debe de accionar el botón de NORM en la ventana de Trigger (Visual Scope) y para cada prueba se debe de borrar la pantalla con el botón de ERASE y accionar después el botón de SINGLE para obtener una sola señal de disparo.
10. Antes de hacer cualquier tipo de prueba se hace un disparo con la máquina de pruebas de impacto para obtener una señal del Trigger. Si no se obtiene la señal del Trigger a la primera se debe de probar una y otra vez haciendo variar el nivel del Trigger de 0.03 a 0.06 hasta que obtengamos la señal de Trigger.
11. Una vez que se obtiene la señal del Trigger la probeta se coloca en la máquina de pruebas de impacto para ejecutar la prueba.

12. Cuando se obtiene la señal deseada se graban los datos obtenidos (siempre 2048 si se utiliza un canal o 1024 si se utilizan dos) y se pasan a EXCEL, donde se convierten a voltaje y después a carga (kN).
13. Se crea una base de tiempo para cada valor.
14. Una vez que se tiene los valores de tiempo y los valores de voltaje se grafican, y así sucesivamente los valores de tiempo contra carga.
15. Por último la gráfica de tiempo contra carga se integra para obtener el área bajo la curva. Una vez que se obtiene el valor del área bajo la curva se multiplica por 3.4 m/s ó 5.2 m/s dependiendo de que posición del péndulo se halla hecho la prueba (nivel bajo ó alto), ya que estos valores son las velocidades de impacto inicial del péndulo (ver sección 3.2).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La instrumentación del péndulo permitió obtener curvas del proceso de fractura para diferentes materiales en este trabajo reportamos: las curvas de impacto de latón comercial, latón recosido, acero para herramientas (ANSI 4140) templado en aceite, acero estructural (ANSI 1018) y en acero inoxidable (ANSI 316) con probetas subdimensionadas implantadas con hidrogeno.

La prueba para materiales metálicos emplea un tamaño de probeta estándar, especificado en la norma ASTM E 33. (ver Figura 5.1).

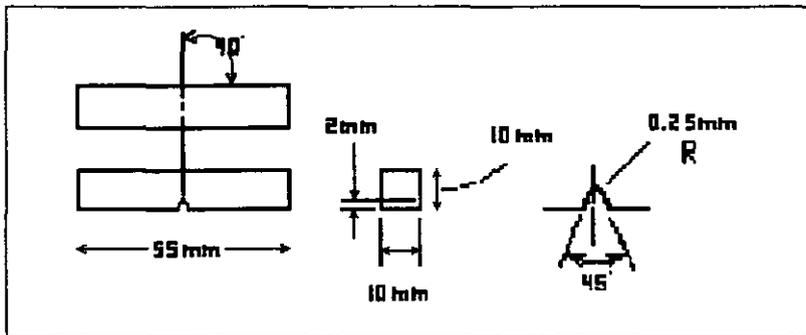


Figura 5.1. Dimensiones de las probetas para las pruebas de impacto.

5.1. Prueba de impacto para latón.

En la gráfica 5.1.1. se puede apreciar en la parte de la izquierda la curva de voltaje contra tiempo y en la parte de la derecha podemos apreciar arriba la micrografía del material y abajo una zona del material ampliada 10 veces del mismo, en las fractografías se puede apreciar que el material era frágil, de ahí que la forma de la gráfica concuerde con las gráficas de la figura 1 (capítulo III). En la figura 5.1.2 se observa la curva de carga contra tiempo obtenidas en la prueba de impacto y la integración de la misma para obtener la energía absorbida en la prueba. También se señalan algunos de los estados del proceso de fractura.

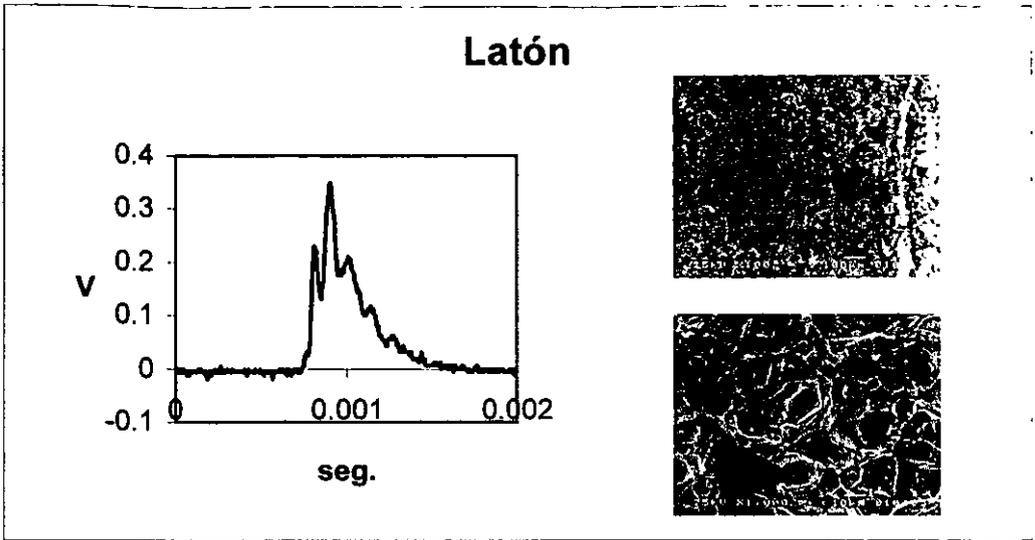


Figura 5.1.1.

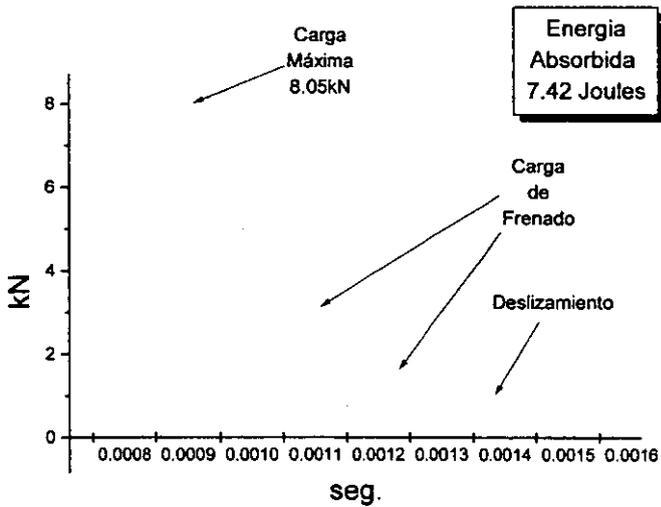


Figura 5.1.2. Curva de impacto carga contra tiempo para latón.

En el caso de las probetas de latón comercial obtenidas de una barra extruida, presentan un comportamiento a la fractura frágil. Como se observa en la curva, la cual presenta un máximo de carga en 8.05 k N, y una energía de fractura de 7.4 J. El análisis fractográfico muestra un material frágil, ya que en la microfractografía se logran observar el clivaje de los granos, lo cual es esperado debido al tratamiento que sufrió el material al ser conformado (proceso de extrusión), el cual induce en el material alta cantidad de defectos, como son dislocaciones y una orientación preferencial de los microconstituyentes del material creando un material con características anisotrópicas. En las fractografías se puede observar rasgos de clivaje característicos de este tipo de fractura y la ampliación de una fractura de apariencia cristalina. El principal factor a ser analizado es el tiempo de fractura, en este caso es de 0.847 milisegundos lo cual indica una propagación rápida de la grieta.

5.2. Prueba de impacto para latón recocido.

Como en el apartado anterior la gráfica 5.2.1. nos muestra el gráfico obtenido de voltaje contra tiempo para una prueba con latón recocido, mientras que al lado derecho de esta tenemos las fractografías del material las cuales nos dan pruebas del tratamiento obtenido para obtener un material dúctil, de ahí la forma del gráfico. Por otro lado la gráfica 5.2.2. nos muestra la gráfica de tiempo contra carga y de integración. Ahora se pueden observar otros estados del proceso de fractura, para este caso de un material dúctil. El tratamiento de recocido se realizó en un horno marca Carbolite a 800° C y 8 horas, dejando enfriar dentro del horno.

Latón recocido

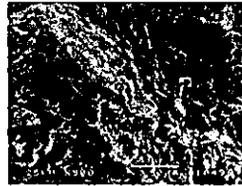
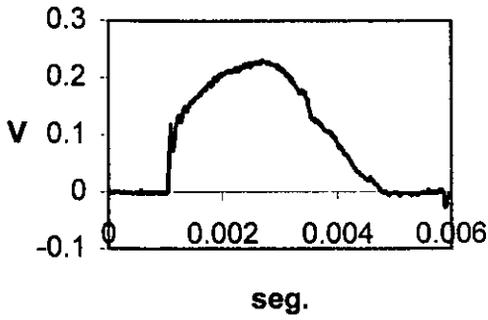
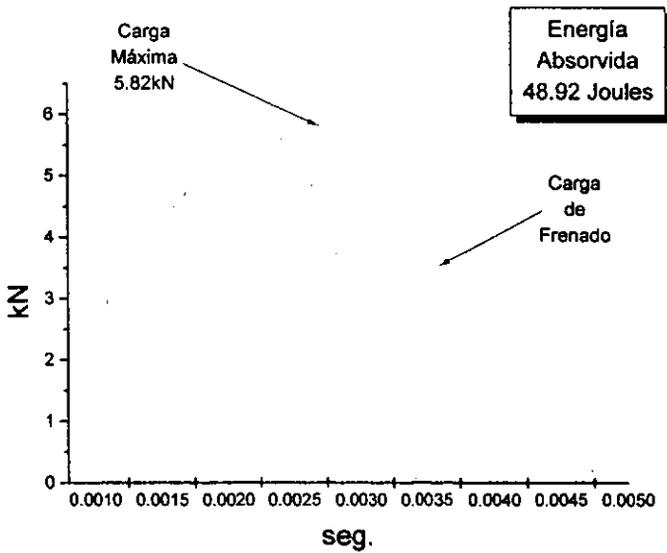


Figura 5.2.1.



Gráfica 5.2.2. Curva de impacto tiempo contra carga para latón recocido.

El tratamiento térmico provoca un cambio en la forma de la curva, los eventos de fractura se ven afectados, estos duran mas tiempo (alrededor de 32.86 milisegundos) a comparación del latón sin ningún tratamiento, aunque el nivel de carga máxima alcanzada 5.82, los rasgos de fractura muestran la formación de cavitación producto de la deformación plástica y en la ampliación se ve una apariencia granular que son los rasgos de fractura dúctil. La curva 5.2.2 presenta una energía absorbida calculada por integración de 48.9 J en la cual también se presenta frenado de grieta característico de deformación plástica, que provoca una fractura dúctil.

5.3. Pruebas en acero 4140 templado.

Este es un acero baja aleación, usado para la fabricación de herramientas. Debido a su alta dureza alcanzada a través de un temple. La figura 5.3.1 muestra la gráfica obtenida durante la prueba de impacto, a la izquierda se puede apreciar las fractografías de la muestra las cuales muestran una fragilidad en el material que hace coincidir con la forma de la gráfica obtenida (en forma de aguja). La figura 5.3.2. muestra la gráfica de tiempo contra carga del acero templado y de integración. Se observa en esta gráfica que se señala una parte muy característica de un material muy frágil (Carga de fractura rápida).

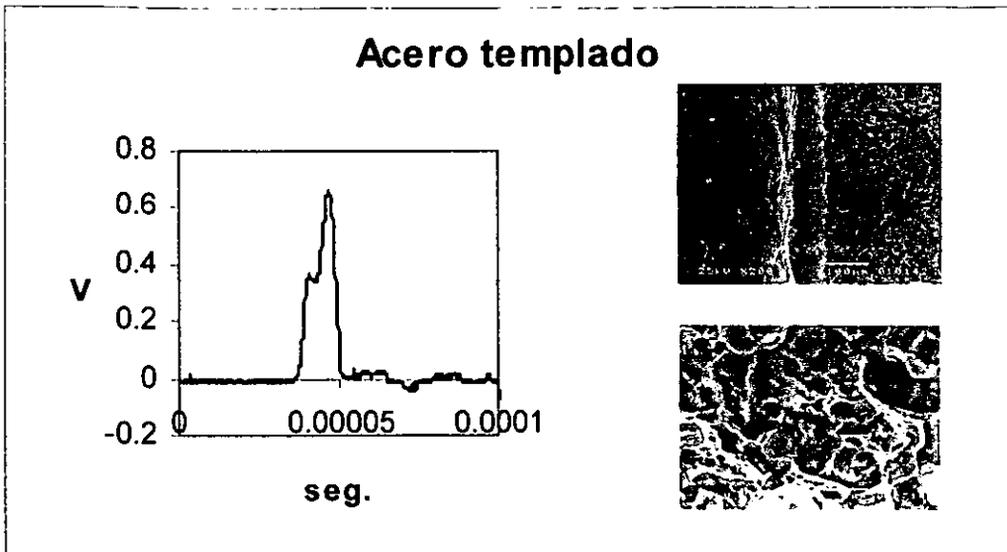


Figura 5.3.1.

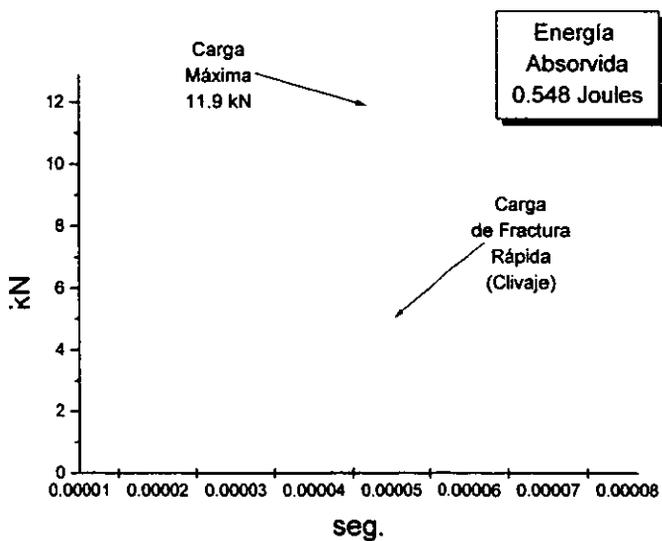


Figura 5.3.2. Curva de impacto tiempo contra carga para acero templado.

El acero templado como producto del alto endurecimiento provocado por este tratamiento térmico, genera una estructura altamente distorsionada llamada martensita, con gran cantidad de defectos que provoca una fractura frágil, la carga máxima se encuentra en 11.9 kN y el tiempo de fractura en 15.04 microsegundos lo que hace a este material extremadamente frágil, como lo muestra la macrofratografía y la microfractografía.

5.4. Pruebas para acero 1018.

Este es un tipo de acero bajo carbono, usado principalmente como componente estructural tales como tuberías de conducción de hidrocarburos. En la gráfica de la figura 5.4.1 se puede observar la gráfica obtenida durante la prueba de impacto y a la derecha las fractografías donde se observa que el material tiende a ser de un comportamiento mixto porque la superficie de fractura no es del todo frágil, de ahí la forma de la curva. En la figura 5.4.2 se puede observar la gráfica de tiempo contra carga y la integración de la misma, además de algunas etiquetas señalando procesos de la fractura.

Acero 1018

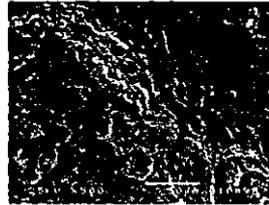
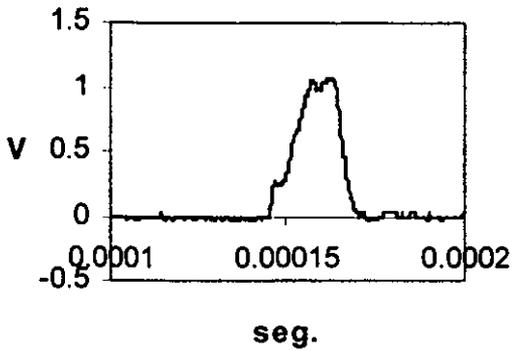
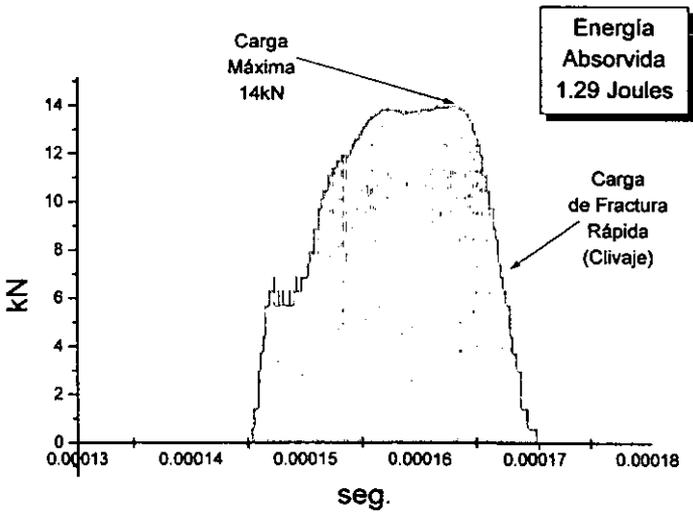


Figura 5.4.1.



Gráfica 5.5.2 Curva de impacto tiempo contra carga para acero ANSI 1018.

El acero 1018 presenta cierta ductilidad, la carga máxima es de 14 kN y el evento de fractura dura 24.8 microsegundos, en comparación con el latón este material posee mejores propiedades estructurales, ya que resiste una mayor carga

5.5. Prueba de impacto para probetas subdimensionadas.

También es posible obtener curvas en probetas subdimensionadas (Figura 5.5.1). En las curvas siguientes se observa como cambia la forma de la curva entre un material irradiado por iones de hidrógeno y otro no irradiado, en este caso la línea más gruesa es la del material irradiado y la más delgada del material no irradiado. El péndulo instrumentado es de gran ayuda para este tipo de probetas ya que con la carátula del péndulo normal es difícil leer los valores de energía.

Las probetas utilizadas para la prueba de impacto subdimensionadas fueron de forma rectangular, de 60 mm de longitud y de 3.15 mm de sección transversal cuadrada. Estas probetas presentaron un entalle en forma de "V" con un ángulo de 50° a una profundidad de 1 mm y un radio de raíz de 1 mm como se esquematiza en la Figura 5.5.

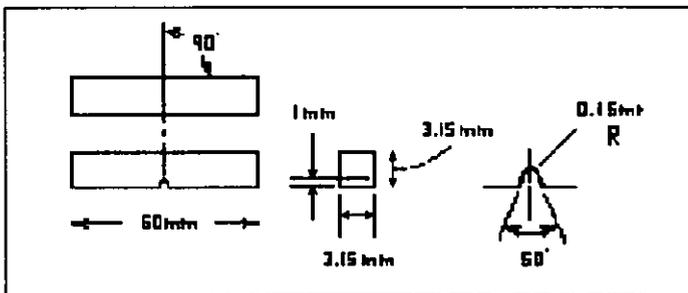


Figura 5.5. Esquema de las probetas subdimensionadas.

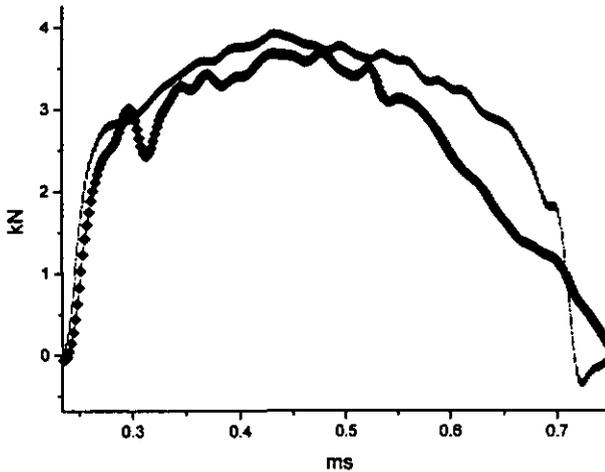


Figura 5.5.1. Curvas de impacto carga contra tiempo para probetas subdimensionadas.

5.6. Galgas en los soportes.

Como se mostró en la figura 4.1.2, se colocaron dos galgas adicionales en los soportes del péndulo. Como se recordara el sistema de apoyo de las probetas esta en tres puntos, es decir, una prueba de impacto corresponde a una prueba de flexión en tres puntos de “alta velocidad” (m/seg). Al poner sensores en los soportes se obtienen señales adicionales durante las pruebas de impacto. Para el latón y el latón recocido se obtuvieron las gráficas de las figuras 5.6.1 y 5.6.2 (líneas azules-lado izquierdo y líneas rojas-lado derecho). Las gráficas antes mencionadas solo corresponden a los valores de voltaje contra tiempo.

Esta señal es importante para conocer la perfecta alineación de la probeta, esto es que se encuentre centrada y no se introduzcan errores al evaluar la energía absorbida por la probeta durante la prueba de impacto. En estos casos se ve una pequeña desalineación de la probeta.

Las diferencias en el voltaje tienen que ver con la excitación en la galga, así como su ubicación y orientación adecuada en el soporte.

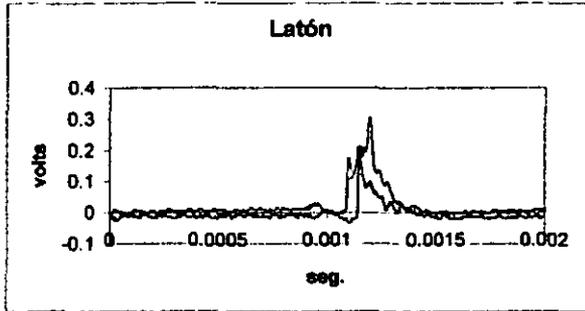


Figura 5.6.1. Gráfica de voltaje contra tiempo de latón

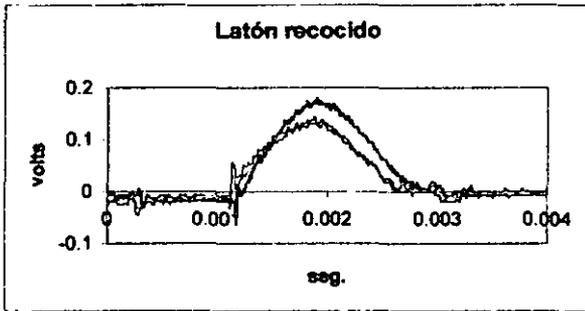


Figura 5.6.2. Gráfica de voltaje contra tiempo de latón recocido.

Hemos incluido estos resultados como ejemplo, para mostrar el tipo de información que se puede obtener de un péndulo instrumentado con sensores en diferentes sitios.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1. Se hizo la instrumentación de un péndulo Satec modelo SI-ID3 para obtener registros de carga contra tiempo durante pruebas de impacto Charpy.
2. Se obtuvieron curvas de diferentes materiales metálicos; latón frágil, latón recocido, acero 4140 (templado) y acero 1018. En todos los casos, se pudo determinar el nivel de fragilidad de las probetas por la forma de las curvas y por los valores de la energía absorbida.
3. La configuración empleada para la instrumentación fue la de un cuarto de puente, a pesar de que este tipo de configuración intrínsecamente es no lineal en la señal de salida, es posible hacer un análisis adecuado de la curva carga contra tiempo haciendo la calibración correspondiente.
4. Las condiciones en el filtrado de la señal (10 kHz) no modifican la forma de la curva, ya que se pueden observar cada estado de los eventos de fractura en todas las pruebas.
5. Se puede instrumentar el péndulo colocando dispositivos para medir la velocidad de propagación de grieta al impactar una probeta, en este caso se puede utilizar sensores que involucre láseres o fotoceldas (ópticos) o aplicando la técnica de caída de potencial.
6. También se podría medir procesos de calentamiento de las probetas colocando sensores de temperatura de respuesta rápida.
7. Se sugiere poner una tarjeta con más canales para observar otras señales como la de la velocidad de propagación de la grieta asociada al tiempo de frenado por el impacto del martillo en la probeta.
8. Se recomienda un osciloscopio usar una tarjeta de mayor resolución y velocidad de lectura para los valores de microsegundos ya que en este rango de tiempo no se puede trabajar muy bien con el trigger.

9. Para este tipo de prototipo la tarjeta fue suficiente pero se recomienda trabajar con una tarjeta donde los datos obtenidos de las gráficas tengan compatibilidad directa con softwares como Microcal Origin.
10. Además el número de muestras leídas por las tarjetas debe de ser mayor a las 1024 mostradas en la pantalla ya que así se puede obtener con más detalle algunos procesos en la fractura y se podrá observar con más facilidad señales que sean ajenas a una prueba.
11. Se recomienda diseñar un dispositivo que cargue el martillo a diferentes alturas, lo coloque y dispere a diferentes alturas lo que nos lleve a hacer pruebas a diferentes velocidades iniciales.

VII. BIBLIOGRAFIA.

1. Pendulum impact testing: A century of progress, STP 1380, pp. 3-16.
T.A. Siewert and M. P. Manahan, C.N.McCowan
2. Norma ASTM E23. Método para pruebas de impacto en probetas con entalle en materiales metálicos.
3. De la Metrología Vol. 4 No. 3 1997, pp. 2-15.
4. ASTM, Metals Handbook Vol. 8 pp. Mechanical Testing. Tenth Edition, 1990
ASM International.
5. Measurement of fracture toughness by instrumented impact test. ASTM special technical publication 466. C.E. Turner, 1970, pp. 93-114
6. An evaluation of the Charpy impact test. ASTM special technical publication 466.
7. O. Harsem and H. Application of the instrumented Charpy impact test. ASTM special technical publication 466.
R. A. Hartbower
8. Application of the instrumented Charpy impact test. ASTM special technical publication 466.R.
A. Hartbower.
9. Specimen loading determined by displacement measurement in instrumented Charpy Impact test. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 65, No 4 (2000).
Lorriot, T.
10. Pendulum Impact Machines. ASTM Publication Code Number (PCN). Thomas A. Siewert and
A. Karl Schmieder.
11. Catalogo A-110-8 para instalación de galgas (strain gages) y accesorios.
12. Electrónica para científicos e ingenieros, pp. 542-558.
R. Ralph Benedict.

13. Compendio de electrónica analógica, pp. 50, Ediciones Universidad y Cultura.
14. An Introduction to Measurements using Strain Gages, pp. 1-6, 145-152
Kart Hoffmann.
15. E. Orozco y A.Vela. Reporte ININ. (1995) No publicado.
16. Fundamentos de ciencias de materiales, pp. 476-483, McGraw Hill.
A.G. Guy.
17. Introducción a la metalurgia física, pp. 660-686, McGraw Hill.
Sydney H. Avner.

Anexo 1

III CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES

8-12
DE SEPTIEMBRE



MEMORIA



Metalurgia y Materiales

DGIT cosnct SSP

**XXII CONGRESO INTERNACIONAL
DE METALURGIA Y MATERIALES**

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE SALTILLO
8, 9 Y 10 DE NOVIEMBRE DEL 2000
SALTILLO, COAHUILA, MEXICO.**

MEMORIA

EDICION

M. MARTINEZ G., D.VAZQUEZ O., L. ESQUIVEL L., S. LEZA M.

XXII CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES
Noviembre 8, 9 y 10 del 2000

COMITÉ EVALUADOR

Francisco Cepeda Tijerina	ITS
Jaime Vite Torres	ININ
Alejandro Manzano Ramírez	CINVESTAV-QRO.
Eduardo Valdés Covarrubias	ITS
Rafaél Colas Ortíz	FIME UANL
Alberto Martínez Villafañe	CIMAV
Oscar Mendoza González	ITS
Guillermo Mendoza	CINVESTAV-SALTILLO
Martha Patricia Guerrero Mata	FIME-UANL
Oscar Mendoza González	ITS
Héctor Mancha Molinar	CINVESTAV-SALTILLO
Enrique Martínez Martínez	IMICORR
Jose Luis Serrano Toledo	ITS
Alberto Martínez Villafañe	CIMAV
Guillermo Mendoza Suárez	CINVESTAV-SALTILLO
Efraín Almanza Casas	ITS
Jose Ivan Escalante	CINVESTAV-SALTILLO
Zbigniew Szczygiel	ITS

Eduardo Valdés Covarrubias
Coordinador Académico

CONTENIDO

Conferencias Huésped

ESTUDIO DE PROCESOS DE FORMADO MEDIANTE EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE DEFORMACIÓN

Rafael Colás

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica FIME-UANL

ELECTROCHEMICAL, THERMAL AND PLASMA PREPARATION OF OXIDE COATINGS-THEORY AND PRACTICE

David L. Cooke

Lamar University

Gill Chair of Chemistry and Chemical Engineering

ESTRUCTURA DE RECUBRIMIENTOS DELGADOS DE SiO_2 PREPARADOS POR SOL-GEL

Jesús González

CINVESTAV Unidad Querétaro

1. **ESTUDIO DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN UN ACERO UNSG41400 USANDO UN PENDULO INSTRUMENTADO** 2
J. F. García¹, V. J. Cortés², V. Alvarez¹, M. Zapata¹, E. A. Orozco¹
¹ Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
Instituto de Física
² Universidad Autónoma Metropolitana, UAM-Azcapotzalco

2. **EXTRUSION DE MEZCLAS DE POLVOS DE MATRIZ Al-Mg-Si-Cu "6061" Y PARTICULAS DE NITRURO EN LA MANUFACTURA DE Al-MMCs** 10
J. L. Ortiz¹, V. Amigó², M. D. Salvador², C. R. Pérez³
¹ Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM) campus Querétaro
Departamento de Ingeniería Mecánica e Industrial
² Universidad Politécnica de Valencia (UPV), España
Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales
³ Universidad Nacional de General San Martín (UNISAM)-
Instituto de Tecnología Jorge A. Sabato-
Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Buenos Aires Argentina

XXII CONGRESO INTERNACIONAL DE METALURGIA Y MATERIALES

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE SALTILLO
8, 9 Y 10 DE NOVIEMBRE DEL 2000
SALTILLO, COAHUILA, MEXICO.**

ESTUDIO DE LA TENACIDAD A LA FRACTURA EN UN ACERO UNSG41400 USANDO UN PENDULO INSTRUMENTADO

**J. F. García¹,
V. J. Cortés²,
V. Alvarez¹,
M. Zapata,
E. A. Orozco¹**

¹ Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
Instituto de Física

² Universidad Autónoma Metropolitana, UAM-Azcapotzalco

Estudio de la Tenacidad a la Fractura en un Acero UNS G41400 usando un Péndulo Instrumentado

*M en C. Jaime Fco. García R. +M en I. Víctor J. Cortés S.*Vicente Álvarez M.* Manuel Zapata G.
*Dr. Eligió A. Orozco M

*Instituto de Física – UNAM. Circuito de la Investigación Científica S/N C.U. A.P. 20-364. C.P. 01000.
México D.F. Tel. (5) 6225012. Fax. (5) 6225011.
+UAM-Azcapozalco. Avenida San Pablo # 180 Colonia Reynosa Tamaulpas, México, D.F.CP 02200.
Tel. (5) 53189475, Fax (5) 53189087, vjcs@correo.azc.uam.mx

Resumen.

Para la realización de esta investigación se generaron diferentes tipos de microestructura en un acero UNS G41400 con un tratamiento térmico de temple y temperaturas de revenido de 100, 400 y 650 °C, con lo cual se obtienen diferentes grados de tenacidad. Para medir la tenacidad a la fractura se utilizó la prueba de impacto Charpy y estos resultados se compararon con los obtenidos a través de un péndulo instrumentado, que permite registrar diagramas de carga contra tiempo. Se obtuvieron tres tipos de diagramas: alta, intermedia y baja tenacidad, para las diferentes formas de martensita obtenida por las temperaturas de revenido. Un análisis posterior de las curvas obtenidas puede proporcionar información de cómo se inicia y propaga una grieta dentro del material estudiado.

Abstract.

In order to do by investigation three microstructures were generated in an UNS G41400 steel quenching and ageing at temperatures of 100, 400 and 650° C. With that it was obtained differents grade of fracture toughness. The fracture toughness was obtained by Charpy tests in an instrumented impact tester, which allows to record load – time diagrams. Three types of diagrams were obtained: high, intermediate and low toughnesses due mainly to the form of the martensite obtained by the thermal treatments. The post-treatment of the cuves give us additional information about how the crack was initiation and was propagation into the material.

Introducción.

La prueba de impacto Charpy es muy utilizada para la verificación estructural de aceros y se aplica ampliamente al estudio de procesos de fractura, por ejemplo; esta prueba permite la evaluación de materiales que tienen tendencia a la fragilización con el efecto de la temperatura; debido a la facilidad para aplicarse a temperaturas elevadas o a temperaturas subcero. También se utiliza para asegurar las características de transición de fractura dúctil a frágil de metales, particularmente en aceros estructurales.[1]

La prueba Charpy instrumentada proporciona un diagrama carga vs tiempo que se obtiene a través de un osciloscopio. La energía absorbida para la fractura se calcula a partir de la integración directa de este diagrama.[2] Las pruebas de impacto instrumentadas se utilizan ampliamente para determinar la tenacidad a la fractura dinámica de materiales ingenieriles. Entre los diferentes equipos para la prueba están: la barra de presión, la caída de peso y la prueba Charpy instrumentada; ésta última es muy atractiva puesto que es uno de los procedimientos de ensayo más comúnmente utilizado. La carga de impacto se mide usualmente con galgas de deformación localizadas sobre el péndulo o sobre el yunque. La señal generada que se registra es una compleja combinación entre el comportamiento del material, efectos de inercia y la propagación de las ondas generadas durante el impacto. A la más alta rapidez de carga o un comportamiento más frágil del material, es más difícil la interpretación de la medición de la carga vs tiempo[3,4].

La fractura dinámica es una metodología para el estudio de la nucleación y propagación de grietas, y constituye un importante desarrollo tecnológico para asegurar la integridad de estructuras ingenieriles. Este desarrollo tecnológico es de los más importantes para predecir la iniciación del crecimiento rápido de la grieta y de esa manera evitar condiciones severas en grandes estructuras. Ejemplos donde se presenta el evento de fractura dinámica son: sistemas de conducción de gas y petróleo, tuberías en plantas nucleares, recipientes a presión, fracturas en piezas aeronáuticas, tanques de almacenamiento criogénico, plataformas marinas, cargas provocadas por el tráfico urbano, ráfagas de viento, de agua, olas, sismos, partes automotrices, y procesos de manufactura, entre otros[5,6].

En este trabajo se hará una evaluación de un péndulo instrumentado, a través del registro y procesamiento de las señales generadas durante la prueba de impacto Charpy, utilizando el acero UNS G41400 en condición de temple y revenido.

Experimentación.

Material examinado

Se estudió el acero grado maquinaria UNS G41400, el cual es muy utilizado en la manufactura de componentes, tales como partes automotrices, recipientes a presión y partes estructurales para aviones. La composición del acero se presenta en la Tabla I

Tabla I Composición química el acero

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Mo	%P	%S
0.40	0.87	0.27	0.95	0.20	0.035	0.04

De una placa de 30 x 30 cm se maquinaron probetas Charpy con entalle en V, de acuerdo a la norma ASTM E23, con el entalle en dirección perpendicular al trabajado de la placa. Las probetas fueron sometidas a un tratamiento térmico de austenización a 850 °C durante 30 minutos, y posteriormente templadas en aceite. Una vez templadas, las probetas se introdujeron inmediatamente en el horno de revenido para evitar agrietamiento. Los tratamientos de revenido se realizaron a 100, 400 y 650 °C durante 1 hora. Posteriormente se les midió la dureza en la escala Rockwell C.

Pruebas de impacto.

Las pruebas de impacto se realizaron en un péndulo instrumentado con capacidad máxima de 162.7 J, siguiendo el procedimiento descrito en [7].

Resultados.

En las Fig. 1 a 3, se presentan las microestructuras obtenidas para los diferentes tratamientos de revenido, estas estructuras fueron reveladas con nital y un tiempo de ataque de 20 s, en donde se observa que a medida que se incrementa la temperatura de revenido, la estructura acicular se vuelve más fina.

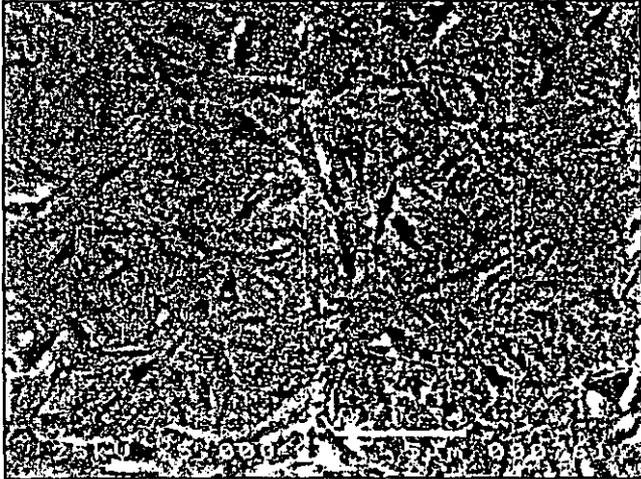


Fig. 1 Microestructura de baja tenacidad revenido 100 °C.

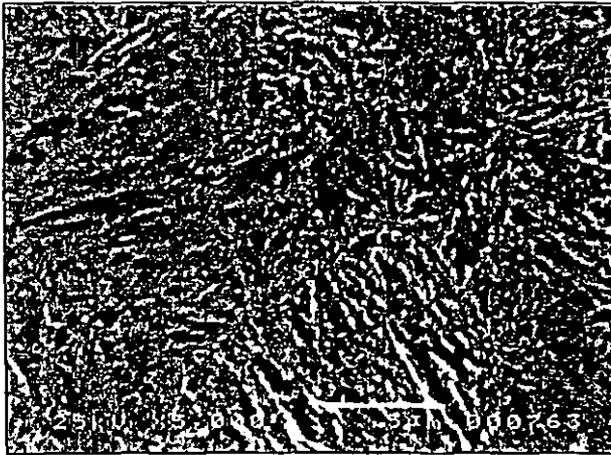


Fig. 2 Microestructura de tenacidad intermedia revenido 400 °C

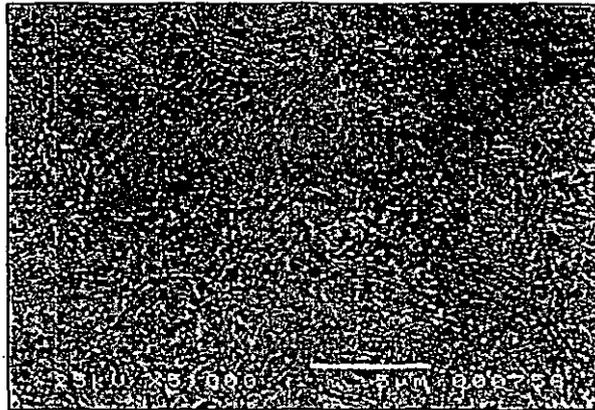


Fig. 3 Microestructura de alta tenacidad revenido 600 °C

En la Tabla III se presentan los valores de las energías de fractura medida directamente del péndulo y a través de la integración de las curvas del péndulo instrumentado, así como las durezas medidas.

Tabla III Energía de fractura y dureza

Temperatura de revenido, °C	Energía, J	Energía, J (Integración)	Dureza RC
100	6.2	9.59	58
400	28.8	30	51
650	123	120	32

Los diagramas obtenidos con la instrumentación, se presentan en las Figs 4 y 5.

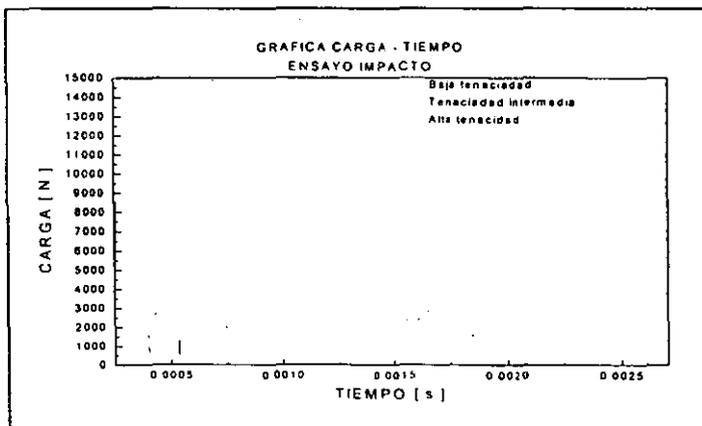


Fig. 4 Gráfica de carga vs tiempo para las tres condiciones de tenacidad

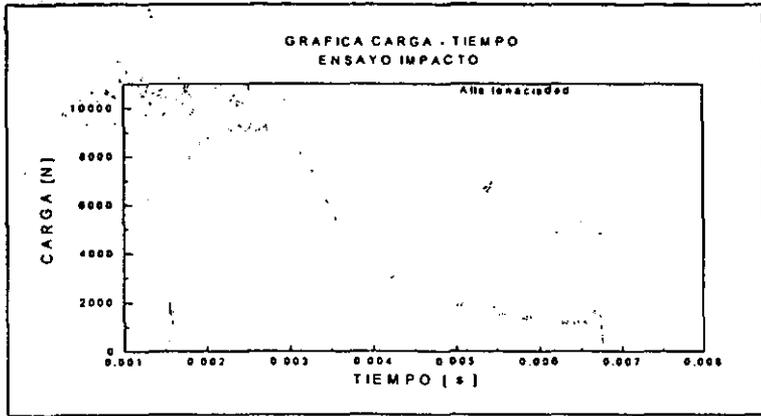


Fig. 5 Gráfica de carga vs tiempo para la condición de alta tenacidad

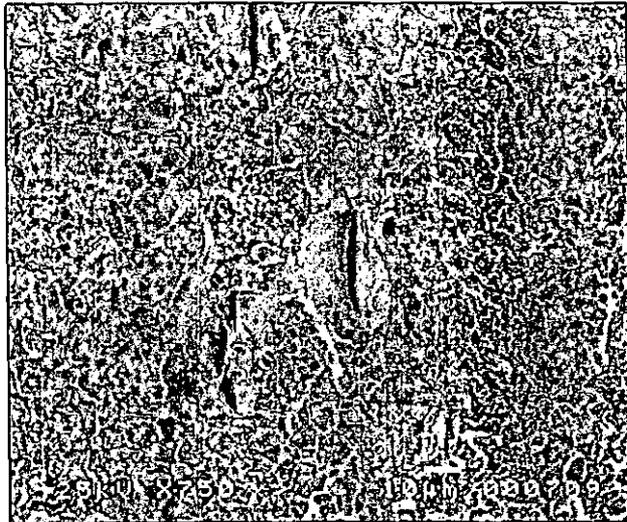


Fig. 6. Fractografía de la probeta de baja tenacidad.

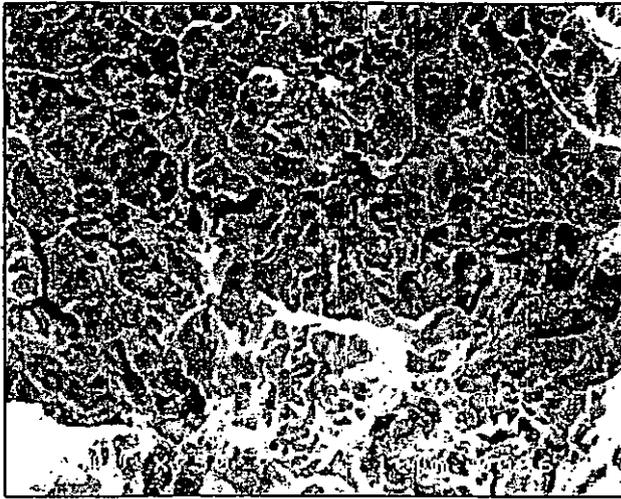


Fig. 7. Fractografía de la probeta de tenacidad intermedia.

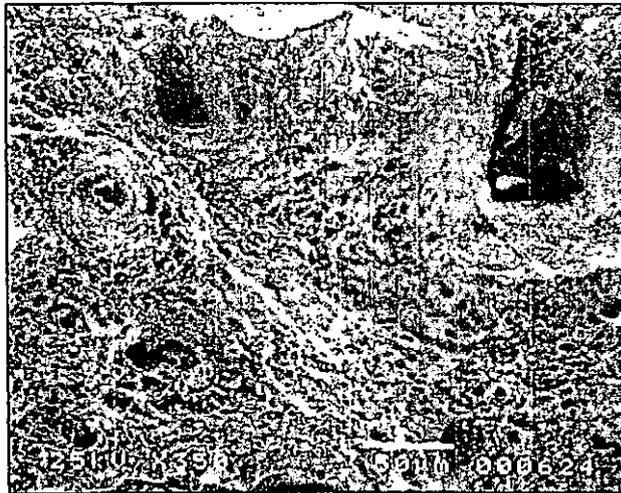


Fig. 8. Fractografía de la probeta de alta tenacidad.

Discussion.

Las microestructuras obtenidas por los diferentes tratamientos de revenido se presentan en las Figs. 1 a 3. La Fig. 1 corresponde a una microestructura de martensita revenida acicular, que es producto de la

descomposición de la martensita a bajas temperaturas de transformación (hasta 200°C). Ésta martensita revenida se caracteriza por ser frágil y también muy susceptible a desarrollar grietas, lo que conduce a que un acero con esta microestructura tenga poca aplicación. La microestructura desarrollada a la temperatura de revenido de 400 °C se muestra en la Fig. 2; en donde también se aprecia una martensita revenida acicular con agujas finas que tiende a formar una martensita másica, la cual se caracteriza por tener un cierto grado de ductilidad. En la Fig. 3 se presenta la microestructura obtenida a la temperatura de revenido de 650 °C. Se observa una martensita de tipo másico, la cual se caracteriza por presentar precipitados esferoidizados de carburo de hierro [8,9], así, a medida que se incrementa la temperatura de revenido del acero, la estructura acicular de la martensita se descompone en una microestructura esferoidizada mucho más fina.

La figura 4, en donde aparecen las gráficas del péndulo instrumentado, puede verse que para las microestructuras aciculares (curvas 1 y 2), la forma de las curvas de impacto son similares, ambas presentan un pico inicial que en general se asocia al primer impacto del péndulo con la muestra, seguido de un rápido crecimiento en la carga, para dar lugar a una caída abrupta, lo que refleja el crecimiento frágil de la grieta nucleada, en la primera etapa de la curva. De la forma de las curvas, es factible deducir el proceso de nucleación de la grieta, a pesar de la fragilidad de las muestras, en estas curvas el ascenso va acompañado de algo de plasticidad ligeramente observable, tal vez inducida en los puntos de apoyo de la probeta. La fragilidad de estas muestras se observa en las fractografías (fig. 7 y 8).

Para la muestra revenida a 650°C, la curva carga contra tiempo, se extiende por varios milisegundos (Fig. 5), esta muestra cuatro regiones bien definidas para el proceso de nucleación y crecimiento: 1) Una etapa inicial asociada a la nucleación de la grieta, la cual muestra el impacto inicial que se ve en los casos anteriores; 2) Una zona de deformación plástica, en la que podría continuar el proceso de nucleación hasta llegar al tamaño crítico; 3) Una zona de crecimiento rápido de la grieta, seguida de la última etapa; 4) Caracterizada por el frenado de la grieta. La Fig. 8 muestra la superficie de fractura de la probeta ensayada, la cual corresponde claramente a una muestra dúctil.

Conclusiones.

El empleo de un péndulo instrumentado para el estudio del proceso de fractura de materiales, permite en principio obtener información adicional acerca del proceso de nucleación y crecimiento de una grieta generada durante una prueba de impacto.

Esto es de particular interés, sobre todo para el estudio de materiales compuestos, en los que se tiene mezclas de fases dúctiles y frágiles, en los que es deseable optimizar el acoplamiento de dichas fases para aplicaciones estructurales.

Referencias.

- 1.-O. Harsem and H. Wintermark, An evaluation of the Charpy impact test. ASTM special technical publication 466.
- 2.-R. A. Hartbower, Application of the instrumented Charpy impact test. ASTM special technical publication 466.
- 3.- Lorriot, T., Specimen loading determined by displacement measurement in instrumented Charpy impact test, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 65, No. 4 (2000), pp. 703-713
- 4.- Sahraoui, S. & Lataillade, J.L., Analysis of load oscillations in instrumented impact testing, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 60, No. 4 (1998), pp. 437-446
- 5.- Zhuang, Z. & Guo, Y., Analysis of dynamic fracture mechanisms in gas pipelines, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 64, No. 3 (1999), pp. 271-289.
- 6.- Xi, W., A mathematical treatment for impact test, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 52, No. 2 (1995), pp. 199-204
- 7.- Orozco E. y Vela A. "Experiencia para la instrumentación de un péndulo para pruebas de impacto". Informe IFUNAM-ININ 1995 (no publicado).
- 8.- R. E Reed-Hill and Abbaschian, *Physical Metallurgy Principles*, Pwa-Kent Pub. Co., (1992), pp 651-677.
- 9.-R. W. K. Honeycombe. *Steels, Microstructure and Properties*, Edward Arnol Pub., (1981), pp140-165.