

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FIMI
Facultad de
Ingeniería Mecánica
e Industrial

Departamento: Ingeniería Mecánica

TRABAJO DE DIPLOMA

**Aplicación de la extensometría eléctrica y la simulación
computacional en la realización del ensayo de tracción**

Autor: Gilberto Torres Burgos

Tutor: Dr. Luis Ivan Negrín Hernández

Santa Clara, junio de 2018
Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria “Chiqui Gómez Lubian” subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.

Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

Pensamiento

“Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.”

Albert Einstein.

Agradecimientos

A mis padres Jesús y María del Carmen, a mi hermana Claudia, por su constante dedicación, por brindarme su amor, apoyo, comprensión y educación en mi formación como profesional.

A mis tutores Dr. Luis I. Negrín Hernández por sus enseñanzas académicas y contribución en mi formación académica.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados quienes sin esperar nada a cambio compartieron sus conocimientos, alegrías y tristezas y a todas aquellas personas que durante estos años de estudio estuvieron apoyándome y lograron que este sueño se hiciera realidad.

Resumen

En el presente trabajo se estudia el ensayo de tracción desde diferentes perspectivas. Primeramente, se efectúa el ensayo de forma tradicional, realizándose la medición de las deformaciones con el uso de un extensómetro mecánico. Como resultado del proceso se calcula la elongación, la estricción y el módulo de Young. Después se simula el ensayo de tracción utilizando el Método de los Elementos Finitos (MEF), a partir de los resultados obtenidos se calcula el módulo de Young. Finalmente se monta una práctica de laboratorio para la asignatura Resistencia de Materiales en la que se utiliza la extensometría eléctrica para la medición de las deformaciones en el ensayo de tracción.

Abstract

In the present work, the tensile test is studied from different perspectives. Firstly, the test is carried out in a traditional way, measuring the deformations with the use of a mechanical extensometer. As a result of the process, the elongation at break, the reduction of area and the Young's modulus are calculated. After the tensile test is simulated using the Finite Element Method (FEM), the Young's modulus is calculated from the results obtained. Finally, a laboratory practice is set up for the Materials Resistance course in which electrical extensometry is used to measure the deformations in the tensile test.

Índice

Introducción.....	1
Capítulo 1: Marco teórico	3
1.1. Introducción	3
1.2. Ensayo de tracción	3
1.2.1. Procedimiento experimental.....	10
1.3 Extensometría	10
1.3.1 Galgas extensométrica	11
1.3.2 Tipos de galgas extensométrica	12
1.3.3 Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.....	13
1.3.4 Limitaciones de las galgas extensométricas	16
1.3.5 Ventajas de las galgas extensométricas	17
1.3.6 Desventajas de las galgas extensométricas	17
1.3.7 Campos de aplicación de las galgas extensométricas.....	17
1.4 Simulación del Ensayo de Tracción por Método de Elementos Finitos.....	18
1.4.1 Simulación	18
1.4.2 Método de Elementos Finitos.....	18
1.4.3. Aplicaciones.....	19
1.5 Conclusiones parciales	20
Capítulo 2. Desarrollo y simulación del ensayo de tracción.	21
2.1. Introducción	21
2.2. Ensayo de tracción real	21

2.2.1. Análisis químico	21
2.2.2. Recuperación del extensómetro	23
2.2.3. Realización del ensayo	25
2.3. Simulación del ensayo	29
2.3.1. Creación del modelo	30
2.3.2. Estudio de convergencia.....	30
2.3.3. Resultados de la simulación	32
2.4 Conclusiones parciales	35
Capítulo 3. Preparación de la práctica de laboratorio	36
3.1 Introducción	36
3.2 Preparación de la superficie	36
3.3 Adhesión de las galgas.....	39
3.3.1 Posicionamiento de la galga	39
3.3.2 Alineación de la galga	39
3.3.3 Preparación final	40
3.3.4 Aplicación del adhesivo.....	41
3.3.5 Adhesión	42
3.3.6 Aplicación de presión	42
3.3.7 Retirar la cinta.....	43
3.4 Procedimientos para soldar	44
3.4.1 Herramienta y técnica para soldar	44
3.5 Procedimiento para soldar	44
3.6 <i>Recubrimientos de protección</i>	46

3.6.1 Barniz de recubrimiento.....	46
3.7 Instalación de las galgas para el ensayo de laboratorio	46
3.7.1 Puente de Wheatstone.....	46
3.7.2 Condición de equilibrio del Puente.....	47
3.7.3 Circuitos elementales.....	48
3.8 Práctica de laboratorio	50
3.9 Conclusiones parciales	59
Conclusiones generales.....	60
Recomendaciones	61
Bibliografía	62
Anexos	64

Introducción

El ensayo de tracción es uno de los ensayos mecánicos más utilizados en la práctica. Esto se debe a que este procedimiento permite obtener propiedades elásticas y plásticas relevantes relacionadas con el comportamiento de los materiales y por la relativa simplicidad de su realización [1].

En la realización de este ensayo tiene una gran importancia la correcta medición de las deformaciones que ocurren en la probeta. Uno de los métodos más exactos de medición de deformaciones es la extensometría eléctrica [2]. Por ese motivo en el presente trabajo se pretende aplicar esta técnica en la medición de la deformación en un ensayo de tracción.

Los resultados se compararán con la medición mecánica y con los resultados de la simulación numérica de este ensayo.

Objetivos generales

- Preparación y puesta a punto de una práctica de laboratorio para la medición de la deformación lineal durante un ensayo de tracción utilizando extensometría eléctrica.

Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica que incluya los siguientes temas: ensayo de tracción, medición de deformaciones utilizando extensometría eléctrica y la simulación de ensayos mecánicos usando el Método de los Elementos Finitos (MEF).
- Realizar el ensayo de tracción a probetas de acero AISI 1015 y determinar las principales propiedades mecánicas a partir de mediciones mecánicas de las deformaciones.
- Simular el ensayo de tracción utilizando el MEF y determinar algunas propiedades mecánicas a partir de las simulaciones.

- Realizar el montaje de una práctica de laboratorio para la asignatura Resistencia de Materiales en la que se utilice la extensometría eléctrica para la medición de las deformaciones en el ensayo de tracción.

Capítulo 1: Marco teórico

1.1. Introducción

Muchos materiales cuando están en servicio están sujetos a fuerzas o cargas de determinada complejidad. En tales condiciones, conocer las características del material para diseñar el instrumento donde va a usarse de tal forma que los esfuerzos a los que vaya a estar sometido no sean excesivos y el material no se fracture. El comportamiento mecánico de un material es el reflejo de la relación entre su respuesta o deformación ante una fuerza o carga aplicada.

El ensayo de tracción es el apropiado para uso general en el caso de la mayoría de los metales y aleaciones no ferrosos, fundidos, laminados o forjados; para los materiales de comportamiento frágil (mortero, concreto, ladrillo, cerámica, etc) cuya resistencia a la tensión es baja, en comparación con la resistencia a la compresión.

La extensometría es una técnica muy utilizada para el análisis experimental de tensiones. Su fundamento básico es la variación de la resistencia producida en un hilo de conductor cuando se alarga o contrae, y se emplea también en otras aplicaciones como por ejemplo la construcción de transductores [2].

El análisis por Elementos Finitos (MEF) es una técnica potente para simular y mejorar el comportamiento de un producto bajo diferentes condiciones de carga [3]. Cuando es posible vincular los métodos experimentales con la simulación computacional se obtienen resultados mucho más confiables y cercanos a la realidad, lo que coincide con los objetivos del presente trabajo, aplicado en este caso al ensayo de tracción.

1.2. Ensayo de tracción

El mejoramiento en el diseño de maquinarias y estructuras llevó al desarrollo de varias técnicas experimentales para determinar los esfuerzos a los que estos están sometidos.

Estos métodos experimentales son utilizados para revisar las predicciones teóricas, y para evaluar esfuerzos en situaciones en donde resultan muy complicadas las aproximaciones matemáticas.[1]

El 'ensayo de tracción o ensayo a la tensión de un material consiste en someter a una probeta normalizada a un esfuerzo axial de tracción creciente hasta que se produce la rotura de la probeta. Este ensayo mide la resistencia de un material a una fuerza estática o aplicada lentamente. Las velocidades de deformación en un ensayo de tensión suelen ser muy pequeñas ($\epsilon = 10^{-4}$ a 10^{-2} s^{-1}). Se realiza en dinamómetros o máquinas de tracción con velocidad regulable y un registro gráfico. Los diagramas así obtenidos, se denominan diagramas de tensión-deformación.

El objetivo del ensayo de tracción es determinar aspectos importantes de la resistencia y alargamiento de materiales, que pueden servir para el control de calidad, las especificaciones de los materiales y el cálculo de piezas sometidas a esfuerzos [4].

El ensayo se realiza en una Máquina Universal y la operación consiste en someter una probeta a una carga monoaxial gradualmente creciente (es decir, estática) hasta que ocurra la falla. Un esquema de la máquina de ensayo de tracción se muestra en la Figura (1.1).

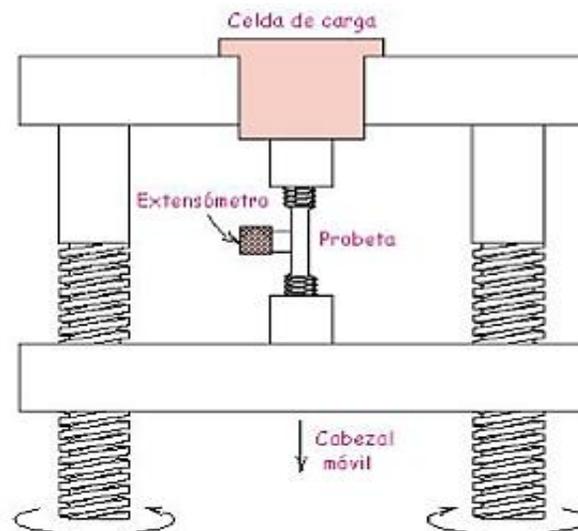


Figura 1.1. Máquina de tracción

Las probetas de ensayo para materiales metálicos se obtienen, generalmente por mecanizado de una muestra del producto objeto de ensayo, o de una muestra moldeada. En el caso de tratarse de productos que tengan una sección constante (perfiles, barras, etc.) o de barras obtenidas por moldeo, se pueden utilizar como probetas las muestras sin mecanizar. La sección de la probeta puede ser circular, cuadrada o rectangular Figura (1.2).

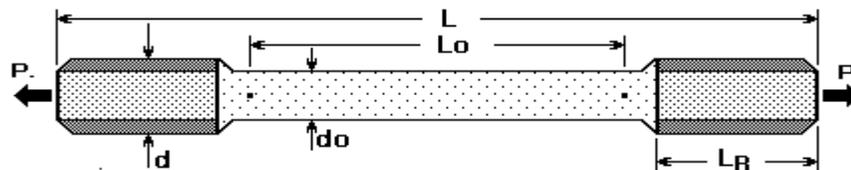


Figura 1.2. Probeta para ensayo de tracción

Desde el punto de vista de la física estática se define a la fuerza, como aquella acción que, ejercida sobre un cuerpo, produce sobre él una deformación que será más grande como mayor sea la fuerza causante; la misma que aplicada sobre un mismo objeto producirá efectos distintos en función de la dirección sobre la que actúa. Así, las deformaciones pueden serlo por tracción y compresión (fuerza paralela al eje longitudinal), flexión (fuerza perpendicular al eje longitudinal), torsión (par de fuerzas) o cizalladura (fuerzas tangenciales). Esto es debido a que la fuerza de una magnitud vectorial y, por tanto, es preciso asociar al valor de su intensidad la información relativa a su dirección y sentido de actuación.

En un ensayo de tracción pueden determinarse diversas características de los materiales elásticos:

- Módulo de elasticidad o Módulo de Young $E = \sigma / \varepsilon$. Es la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria. Si el esfuerzo es una tensión o una compresión, el modulo se denomina módulo de Young y tiene el mismo valor para una tensión que para una compresión.
- Coeficiente de Poisson $\mu = -\varepsilon_{transversal} / \varepsilon_{longitudinal}$ cuantifica la razón entre el alargamiento longitudinal y el acortamiento de las longitudes transversales a la

dirección de la fuerza. Es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a las de estiramiento.

- Límite de proporcionalidad: valor de la tensión por debajo de la cual el alargamiento es proporcional a la carga aplicada.
- Límite de fluencia o límite elástico aparente: valor de la tensión que soporta la probeta en el momento de producirse el fenómeno de la cedencia o fluencia. Este fenómeno tiene lugar en la zona de transición entre las deformaciones elásticas y plásticas y se caracteriza por un rápido incremento de la deformación sin aumento apreciable de la carga aplicada.
- Límite elástico (límite elástico convencional o práctico): valor de la tensión a la que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.) en función del extensómetro empleado. Es la máxima tensión aplicable sin que se produzcan deformaciones permanentes en el material.
- Carga de rotura o resistencia a tracción: carga máxima resistida por la probeta dividida por la sección inicial de la probeta.
- Alargamiento de rotura: incremento de longitud que ha sufrido la probeta. Se mide entre dos puntos cuya posición está normalizada y se expresa en tanto por ciento.
- Estricción: es la reducción de la sección que se produce en la zona de la rotura.

Normalmente, el límite de proporcionalidad no suele determinarse ya que carece de interés para los cálculos. Tampoco se calcula el Módulo de Young, ya que éste es característico del material; así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad, aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes.

A partir de las dimensiones iniciales de la probeta, se transforman la fuerza en tensión y el alargamiento en deformación, que nos permite caracterizar las propiedades mecánicas que se derivan de este ensayo.

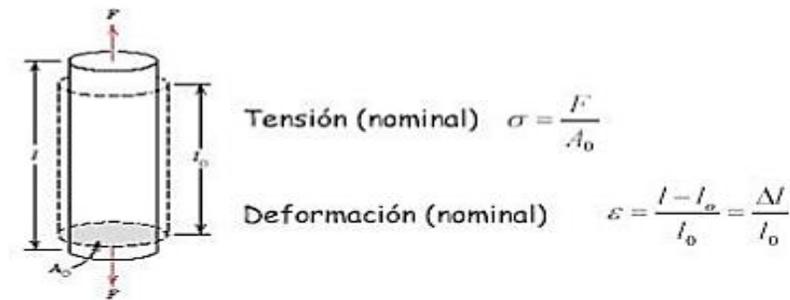


Figura 1.3. Análisis de tensión y deformación nominal

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas Figura (1.4):

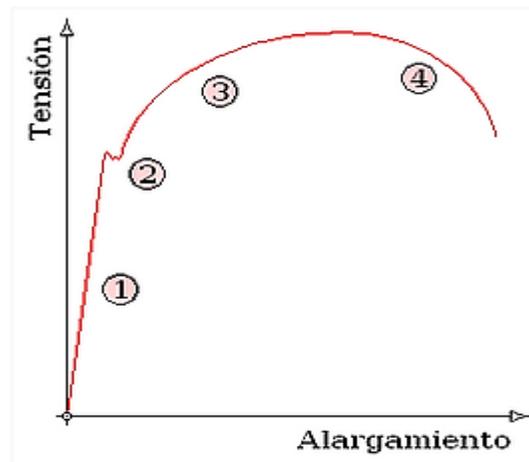


Figura 1.4. Relación entre esfuerzo y deformaciones

Zona 1: Deformaciones elásticas: Las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad, aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se

alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

Zona 2: Fluencia o cedencia. Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta, pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Lüders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.

Zona 3: Deformaciones plásticas: si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son más acusadas que en la zona elástica. Definimos como plasticidad a aquella propiedad que permite al material soportar una deformación permanente sin fracturarse. Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada trata de deformarse en el sentido de aplicación de la fuerza. En el caso del ensayo de tracción, la fuerza se aplica en dirección del eje de ella y por eso se denomina axial, la probeta se alargará en dirección de su longitud y se encogerá en el sentido o plano perpendicular.

Zona 4: Estricción. Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán

acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente hasta el comienzo de la estricción) entre la sección inicial: cuando se produce la estricción la sección disminuye (y por tanto también la fuerza necesaria), disminución de sección que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

Otras características que pueden determinarse mediante el ensayo de tracción son la resiliencia y la tenacidad.

La resiliencia nos da la medida de la capacidad de un material de absorber energía elástica antes de la deformación plástica.

La tenacidad de un material es un término mecánico que se utiliza en varios contextos; en sentido amplio, es una medida de la capacidad de un material de absorber energía antes de la fractura. La geometría de la probeta, así como la manera con que se aplica la carga son importantes en la determinación de la tenacidad.

En los ensayos de tracción lo que se evalúa realmente es la resistencia del material, es decir, las tensiones que es capaz de soportar antes de comenzar a sufrir deformaciones plásticas permanentes o de romperse [5].

Este ensayo proporciona por tanto los datos más básicos sobre el material: relación entre tensión y deformación, qué tensión provoca que deje de comportarse elásticamente, qué tensión provoca rotura, etc. Estos datos son la base para cualquier otro estudio de las propiedades del material.[6]

Este ensayo no se realiza solamente a materiales metálicos, sino a otros muchos como plásticos, materiales compuestos, huesos, etc. [7].

1.2.1. Procedimiento experimental

Para la realización de este ensayo existen diferentes normas, tanto internacionalmente como en nuestro país [8, 9]. Estas explican tanto el procedimiento del ensayo como norman las probetas en cuanto a forma y dimensiones.

El ensayo consiste en deformar una probeta por estiramiento uniaxial y registrar dicha deformación frente a la tensión aplicada. Se realiza en dinamómetros o máquinas de tracción con velocidad regulable y un registro gráfico. Los diagramas así obtenidos se denominan diagramas de tensión-deformación.

Las probetas tienen que medirse por lo menos en cinco puntos dentro de la longitud marcada y la diferencia de la medida no puede ser mayor de 0.1 mm.

La probeta se coloca dentro de las mordazas tensoras, de manera que se adapten bien y tengan efecto de cuña con accionamiento neumático, hidráulico o manual. La fuerza inicial no debe ser demasiado alta, porque de lo contrario podría falsear el resultado del ensayo. Así mismo se debe cuidar que no se produzca deslizamiento de la probeta. La máquina de ensayos está diseñada para alargar la probeta a una velocidad constante y para medir continua y simultáneamente la carga instantánea aplicada (con una celda de carga) y el alargamiento resultante (utilizando un extensómetro). El ensayo dura varios minutos y es destructivo, o sea, la probeta del ensayo es deformada permanentemente y a menudo rota [10].

1.3. Extensometría

En 1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor se presenta una variación en su resistencia eléctrica. Este principio permite realizar mediciones de fuerzas muy tenues que provoquen pequeñas deformaciones en el conductor. En la actualidad a este principio se le conoce como extensometría.

La extensometría se utiliza para conocer estados tensionales en un punto de elementos de geometría compleja que puede considerarse a priori como los más desfavorables. También se utiliza para la validación de modelos de cálculo en ensayos de laboratorio y

en pruebas reales de carga sobre estructuras construidas así como para la medición de tensiones residuales [11].

La extensometría es una técnica experimental para la medición de esfuerzos y deformaciones basándose en el cambio de la resistencia eléctrica de un material al ser sometido a tensiones. Su fundamento básico es la variación de la resistencia producida por un hilo de conductor cuando se alarga o se contrae, utilizando para ello un sensor llamado galga extensométrica. Es extremadamente útil en la medida de esfuerzos vibracionales y detección de resonancias a alta frecuencia (la respuesta en frecuencia de una banda/galga extensométrica es de unos 100kHz) donde los algoritmos de simulación por elementos finitos no ofrecen resultados fiables, estos suelen empezar a mostrar imprecisiones con sistemas complejos que vibren a más de 50 Hz [2].

1.3.1. Galgas extensométrica

Una galga extensométrica o extensómetro es un sensor, para medir la deformación, presión, carga, torque, posición, entre otras cosas, que está basado en el efecto piezorresistivo, el cual es la propiedad que tienen ciertos materiales de cambiar el valor nominal de su resistencia cuando se le somete a ciertos esfuerzos y se deforman en dirección de los ejes mecánicos. Un esfuerzo que deforma la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica, esta variación puede ser por el cambio de longitud, el cambio originado en la sección o el cambio generado en la resistividad. La galga extensométrica hace una lectura directa de deformaciones longitudinales en cierto punto del material que se está analizando. La unidad que lo representa es ϵ , esta unidad es adimensional y expresa el cambio de la longitud sobre la longitud inicial.

La galga extensométrica es básicamente una resistencia eléctrica de una alta sensibilidad a la deformación, del cual recibe su nombre porque al deformarse longitudinalmente (estiradas) cambia su resistencia [12].

Las galgas tienen ciertas características, unas físicas y otras en cuanto a su funcionamiento. Entre las físicas se encuentra su tamaño, peso y materiales con los que fue fabricada; es pequeña y dura, lo que facilita la velocidad con que genera las

respuestas; éstas son muy importantes, puesto que el resultado correcto depende de estos aspectos. Existen también características que dependen de la fabricación de la galga, por ejemplo, la temperatura del funcionamiento y el factor de la galga, éste indica la sensibilidad que tiene el sensor. También la resistencia de la galga, el coeficiente de temperatura, la prueba de fatiga y el coeficiente de expansión lineal; son características necesarias para conocer bajo qué circunstancias la galga arroja los resultados adecuados[13].

1.3.2. Tipos de galgas extensométrica

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son alambres muy pequeños de aleaciones metálicas, como por ejemplo constantán (Níquel 60%-Cobre 40%), nicrom, Chromel (Níquel-Cromo), aleaciones (Hierro-Cromo-Aluminio), elementos semiconductores como el silicio y el germanio o grabado en laminillas metálicas delgadas. Es por ello que las galgas se clasifican en dos tipos: las metálicas y las semiconductoras.

Galgas metálica

Las galgas metálicas se constituyen por una base muy delgada y fina, a la cual se le adhiere un hilo muy fino metálico, puede ser bobinado o plegable, al final los 2 terminales en los que acaba el hilo se unen a los transductores. Estas galgas tienen como ventaja un bajo coeficiente de temperatura, ya que se compensa la disminución de la movilidad de los electrones al aumentar la temperatura con el aumento de su concentración. En las galgas metálicas la corriente máxima es de unos 25 mA si el soporte es buen conductor de calor, y 5 mA en el caso contrario; de todas formas, en las galgas metálicas hay una gran limitación en la corriente. Las principales características de las galgas metálicas en condiciones habituales establecen que su tamaño tiene una variación entre 0.4mm y 150mm, tienen una resistencia variable entre 120 Ω y 5000 Ω y su tolerancia a la resistencia está en el rango de 0.1% y 0.2%. La resistencia eléctrica de la galga metálica está dada por la relación entre la resistividad y la longitud respecto al área transversal [14].

Estas pueden ser de:

- Hilo metálico: Están adheridas a una base con medidas constantes, estas presentan errores cuando existen estados tensionales y son las más sencillas. Están compuestas por una película de protección, un soporte, un hilo de medida y los terminales de conexión.
- Película metálica: Esta clase de galgas tiene una característica de fabricación similar a los circuitos impresos que tienen bases flexibles. Se desarrollan por la creación de placas utilizando fotografías, llamado el método de fotograbado.
- Metal depositado: Son aplicadas directamente sobre la superficie mediante dos métodos la evaporización o el bombardeo químico.

Galgas semiconductoras: En las galgas semiconductoras hay un elemento semiconductor en vez del hilo metálico, su gran diferencia respecto a las demás galgas, es su tamaño, ya que su tamaño es más reducido. La potencia máxima disipable en galgas semiconductoras es de unos 250 mW. Las galgas semiconductoras son capaces de soportar una alta resistencia su fatiga de vida es más larga y tiene menor histéresis, que es la capacidad de que el material conserve sus propiedades bajo diferentes estímulos. Existen ciertos aspectos característicos bajo condiciones normales de las galgas semiconductoras, su tamaño varía entre los 1 mm y 5 mm, su resistencia está aproximadamente entre un rango de 1000 Ω a 5000 Ω y su tolerancia a la resistencia está entre 1% y 2% [14].

1.3.3. Principio de funcionamiento de las galgas extensométricas.

Su principio de funcionamiento se basa en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, según el cual, su resistividad varía en función de la deformación a la que están sometidos, el material de que está hecho y el diseño adoptado. Si se considera un hilo metálico de longitud l , sección transversal A y resistividad ρ , su resistencia eléctrica R es:

$$R = \rho \left(\frac{l}{A} \right) \quad (1.1)$$

Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R cambia, por tanto, el cambio de R se puede expresar como:

$$\Delta R = \frac{A(\rho\Delta l + l\Delta\rho) - \rho l\Delta A}{A^2} \quad (1.2)$$

El cambio de longitud que resulta de aplicar una fuerza F a una pieza unidimensional (siempre y cuando no se supere su límite elástico, zona 1 Figura (1.4)), está dado por la ley de Hooke.

$$\sigma = \frac{F}{A} = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l} \quad (1.3)$$

Donde E es el módulo de elasticidad del material, denominado módulo de Young, σ es el esfuerzo uniaxial y ε es la deformación unitaria.

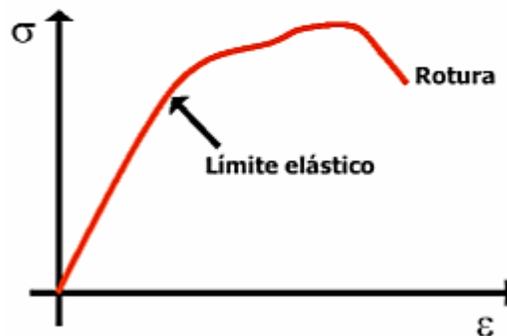


Figura 1.5. Relación entre esfuerzos y deformaciones.

Cuando el hilo se estira en dirección axial, el área de la sección transversal disminuye, ya que la masa total debe conservarse. La razón de la deformación lateral a la

deformación axial también es una propiedad del material, esta propiedad se llama razón de Poisson y se define como:

$$\mu = -\frac{\Delta D / D}{\Delta l / l} \quad (1.4)$$

Donde D es el diámetro del hilo y μ es denominado coeficiente de Poisson. Su valor está entre 0 y 0.5, en términos de la razón de Poisson tendremos:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} [1 + 2\mu] + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1.5)$$

Los cambios en la resistencia se originan por la modificación de la geometría en la longitud o el área y el cambio en la resistividad. La dependencia de la resistividad en deformación mecánica se expresa en términos del coeficiente de piezoresistencia (π_1) definido por la siguiente expresión:

$$\pi_1 = \frac{1}{E} \frac{\Delta \rho / \rho}{\Delta l / l} \quad (1.6)$$

Por lo tanto, el cambio en la resistencia es:

$$\frac{\Delta R / R}{\Delta l / l} = 1 + 2\mu + \pi_1 E \quad (1.7)$$

Si un alambre recto se estira elásticamente, la longitud aumentará y la sección transversal se reducirá por el efecto de Poisson. Entonces se observa que ambos efectos son aditivos y causan que la resistencia aumente, permaneciendo la resistividad constante. Por lo tanto, sirve para expresar el cambio de resistencia de un conductor en relación con el cambio de longitud que lo causa, el término “sensibilidad de elongación” que se puede expresar como:

$$S_A = \frac{\Delta R / R}{\varepsilon} \quad (1.8)$$

La sensibilidad de elongación de un conductor metálico depende en gran parte de las características de la aleación en particular: trabajo en frío, nivel de impurezas en la aleación y el rango de deformaciones sobre el cual se mide [2] .

Dado que la relación de Poisson es aproximadamente 0,3 para la mayoría de las aleaciones usadas como conductores para galgas, la sensibilidad de elongación será de 1,6 cuando sólo se considera el aspecto de cambios dimensionales del conductor. Esto significa que un incremento elástico de 0,1% de longitud producirá un incremento de 0,16% de resistencia. La definición de Sensibilidad de elongación en una galga extensométrica se denomina factor de galga (S_g), y es proporcionado por el fabricante [2].

1.3.4. Limitaciones de las galgas extensométricas

- El esfuerzo aplicado no debe llevar a la galga fuera del margen elástico o también llamado esfuerzo de fluencia.
- La deformación de la galga.
- El incremento en la galga debe ser en la misma dirección al del soporte para evitar tensiones opuestas en lo que alineación de la galga se refiere, ya que mide en una sola dirección.
- La galga solo proporciona los datos para las direcciones a las que la galga ha sido diseñada. Si se quiere medir en direcciones perpendiculares se puede poner otra galga igual a 90° de la inicial, por lo tanto, una sola galga puede medir solamente una dirección.

1.3.5. Ventajas de las galgas extensométricas

- Pequeño tamaño
- Pueden ser alimentadas con corriente continua o corriente alterna.
- Tienen una excelente respuesta en frecuencia.
- Son simples y adecuadas en medidas estáticas y dinámicas.
- Compensación de temperatura relativamente fácil, al instalar dos galgas idénticas en brazos adyacentes elimina los efectos de temperatura en la galga medidora ya que, al tener dos galgas, si se mide la diferencia de resistencia entre ambas, se descarta el efecto de la temperatura.
- No son influidas por los campos magnéticos.

1.3.6. Desventajas de las galgas extensométricas

- La señal de salida es débil.
- Pequeño movimiento de la galga.
- Son afectadas por muchos factores de variación en condiciones ambientales.
- La galga es ultra sensible a las vibraciones.
- Con el tiempo la galga puede perder adhesión al espécimen de prueba.
- Para umbrales pequeños la técnica de construcción es cara.
- Se ven afectadas por el cambio de temperatura.
- Son afectadas por la presencia de ruido térmico que establece un mínimo para la variación de resistencia detectable.
- Son poco estables.

1.3.7. Campos de aplicación de las galgas extensométricas

El campo de acción de las galgas extensométricas es muy extenso, aunque su mayor aplicación la encontramos en las industrias del diseño mecánico y estructural, en donde se es necesario el control riguroso de la deformación sufrida (como por ejemplo aviones, vagones de tren, puentes, automóviles, entre otros).

También son muy utilizadas como sensores para monitoreo, celdas de carga y en sistemas de control, donde constituyen la parte activa de un transductor [14].

1.4. Simulación del Ensayo de Tracción por Método de Elementos

Finitos

1.4.1. Simulación

La simulación es el conjunto de relaciones lógicas, matemáticas y probabilísticas que integran el comportamiento de un sistema bajo estudio cuando se presenta un evento determinado[9]. No es una técnica de optimización, sino que puede usarse para describir o predecir cómo operará un sistema con ciertas opciones dadas de los datos de entrada controlables y valores generados al azar de dichos valores de entrada controlables, que quizá conduzcan a sistemas deseables [15].

1.4.2. Método de Elementos Finitos

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos que resulta de gran importancia por su utilidad práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite al ingeniero estructuralista resolver infinidad de problemas. Sin embargo, es un método que no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad, posibilita obtener una solución aproximada que, con el juicio ingenieril que se le supone al calculista, puede ser más que suficiente para la resolución de un problema práctico.

Su idea básica no puede ser más sencilla: dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y coaccionado por unas ligaduras, el método consiste en subdividir el sólido en pequeñas partes (elementos) interconectadas entre sí a través de los nudos de los elementos, de manera que suponemos que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales); posteriormente, se podrá determinar la

matriz de rigidez de cada elemento, las cuales una vez ensambladas (siguiendo los pasos del análisis matricial de estructuras), permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. De esa manera, una vez conocidos dichos desplazamientos, podríamos determinar, de una forma aproximada como ya se dijo antes, las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

1.4.3. Aplicaciones

El MEF tiene gran aplicación en la práctica para la determinación de tensiones y deformaciones en estructuras y piezas durante su funcionamiento [3]. En los últimos tiempos se han reportado la aplicación de este método para el estudio de diferentes materiales durante la realización del ensayo de tracción [16, 17, 18].

1.5. Conclusiones parciales

- El ensayo de tracción tiene una gran importancia práctica, pues con el mismo se pueden conocer propiedades fundamentales de los materiales como: Módulo de Young, tensión de fluencia, tensión última, estricción, elongación y coeficiente de Poisson.
- El método de la extensometría eléctrica es muy utilizado en la ingeniería mecánica para la medición de tensiones y deformaciones. El mismo puede ser utilizado en la realización del ensayo de tracción, lo que traería consigo un aumento de la exactitud de las mediciones y por tanto una mejor calidad de los resultados obtenidos.
- El ensayo de tracción puede ser simulado utilizando los softwares que utilicen el Método de los Elementos Finitos y que están disponibles en nuestros laboratorios. El modelo utilizado puede calibrarse a partir de los resultados experimentales, lo que permitirá utilizar el MEF en la simulación de otras piezas sometidas a diferentes sistemas de carga.

Capítulo 2. Desarrollo y simulación del ensayo de tracción.

2.1. Introducción

En este capítulo se realizará un ensayo de tracción en la máquina universal de ensayos ZD 40, de fabricación alemana, que se encuentra en el Laboratorio de Resistencia de Materiales. Este ensayo se realizará utilizando el extensómetro mecánico usado tradicionalmente para este fin. Primeramente, se realiza el estudio del material de la probeta a partir del análisis químico y se fabrica la misma siguiendo las orientaciones de la norma cubana [9]. Posteriormente se realizará la simulación del ensayo utilizando un software profesional que utiliza el MEF (SolidWorks) y se obtendrán los resultados de tensiones y deformaciones unitarias en la probeta.

Finalmente se realizará la comparación de ambos resultados.

2.2. Ensayo de tracción real

2.2.1. Análisis químico

La probeta se realiza a partir de una barra laminada de acero de la que no se conoce el material exactamente. Por tal motivo se realiza el análisis químico por espectrometría óptica. Este análisis fue realizado en la máquina Spektrometrie Opto-Electronik, marca Belec de fabricación alemana Figura (2.1) que se encuentra en Planta Mecánica de Santa Clara.



Figura 2.1. Máquina utilizada en el análisis químico.

Capítulo 2. Desarrollo y simulación del ensayo de tracción.

Se analizaron dos muestras, los resultados se encuentran en el ANEXO 1. En la Tabla (2.1) se muestran los valores promedios de la composición de los componentes fundamentales.

Tabla 2.1. Valores promedio de algunos componentes químicos del acero

C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cu %	Cr %	Mo %
0,174	0,0096	0,423	0,0228	0,0401	0,135	0,164	0,0089

V %	Ti %	Sb %	Ni %	Al %	Co %	Bi %	Fe %
0,0019	<0,001	0,0046	0,089	0,0124	0,0087	0,0054	98,9

Al consultar las bases de datos [19] esta composición química se corresponde con un acero AISI-SAE 1015. Las propiedades mecánicas fundamentales de este acero se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Propiedades mecánicas fundamentales del acero AIS-SAE 1015 [20]

No	Proceso	σ_u (MPa)	σ_y (MPa)	Elongación (%)	Estricción (%)	E (MPa)
1015	HR	340	190	28	50	2×10^5
	CD	390	320	18	40	2×10^5

La probeta se construyó según las indicaciones de la norma cubana [9] y sus dimensiones aparecen en el Anexo 2.

2.2.2. Recuperación del extensómetro

Producto del uso, el extensómetro mecánico que se encuentra en el Laboratorio de Resistencia de Materiales se encontraba dañado. Específicamente las guías laterales construidas de aluminio, como se muestra en la Figura (2.2). Se consultó los precios de estos dispositivos en el mercado internacional previendo su posible adquisición. En esta búsqueda se pudo constatar que este tipo de instrumento no se fabrica comúnmente por las empresas especializadas y la única que se pudo contactar fue una empresa india, la FINE SPAVY ASSOCIATES, envió una prefactura que se muestra en el Anexo 3. El precio es de 550 USD sin contar el costo de transportación. Como se puede apreciar, es imposible de adquirir por nuestro país en las condiciones actuales, aunque sea un dispositivo de estos. Por tal motivo se decidió tratar de recuperar este importante instrumento, sin el cual es imposible hacer el ensayo de tracción.



Figura 2.2. Estado de las guías originales del extensómetro.

Primeramente, se realizó un plano con las dimensiones de dichas guías que aparece en el Anexo 4. Como se aprecia, las dimensiones de estas piezas son pequeñas, por lo que el semiproducto para su fabricación es relativamente fácil de encontrar. Se trabajó a partir de dos varillas de aluminio que se encontraban en desuso. El maquinado se realizó en el

taller de la facultad, utilizándose una fresadora marca MAZ de fabricación checa. En la Figura (2.3) se pueden apreciar las piezas después de terminadas.



Figura 2.3. Guías después de fabricadas.

Después de fabricadas las guías se montaron en la base de los comparadores de carátula y se probaron montando el dispositivo en la probeta como se aprecia en la Figura (2.4).



Figura 2.4. Montaje del extensómetro mecánico en la probeta utilizada.

2.2.3. Realización del ensayo

2.2.3.1. Datos iniciales y cálculos teóricos

Dentro de los datos iniciales se tienen:

lo - longitud de cálculo de la probeta.

do- Diámetro inicial de la probeta

Ao- Área inicial de la probeta (Sección transversal)

E - Módulo de elasticidad teórico del material de la probeta.

Cuadros de anotaciones, procesamiento de datos y resultados

Material	do (cm)	lo (cm)	Ao (cm ²)	E (MPa)
Acero	2	10	3,14	2x10 ⁵

Cuadro No.1

No, Lect ,	Carga P (KN)	Tensión σ (MPa)	<i>Desplazamiento</i>			Deform, Unitaria $\varepsilon, 10^{-4}$
			$\delta_A, 10^{-3}$ (cm)	$\delta_B, 10^{-3}$ (cm)	$\delta, 10^{-3}$ (cm)	
1	10	31,8	0,8	1,0	0,9	0,9
2	20	63,7	2,2	3,0	2,6	2,6
3	30	95,5	4,0	5,0	4,5	4,5
4	40	127,3	5,8	6,5	6,15	6,15
5	50	159,2	8,0	9,0	8,5	8,5
6	60	191	Ocurre la fluencia			

Para cada valor de P se calculan los valores de σ según:

$$\sigma = \frac{P}{A_0} \quad (2.1)$$

Para cada valor δ_A y δ_B se calculará δ según:

$$\delta = \frac{\delta_A + \delta_B}{2} \quad (2.2)$$

Para cada valor de δ se calculará ε según:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} \quad (2.3)$$

Cuadro No.2

No, Lect,	Incrementos	
	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon, 10^{-4}$
1	31,9	1,7
2	31,8	1,9
3	31,8	1,65
4	32	2,35
	$\Sigma\Delta\sigma = 127,5$	$\Sigma\Delta\varepsilon = 7,6$
	$\Delta\sigma_{prom} = 31,875$	$\Delta\varepsilon_{prom} = 1,9$

Para cada par de valores sucesivos de σ se halla su incremento. De igual forma se procede con ε .

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad , \quad \Delta\varepsilon = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \quad (2.4)$$

Se calculan las $\Sigma\Delta\sigma$ y $\Sigma\Delta\varepsilon$. Con estos valores se halla $\Delta\sigma_{prom}$ y $\Delta\varepsilon_{prom}$ respectivamente.

Se calcula E según:

$$E_p = \frac{\Delta\sigma_{prom}}{\Delta\varepsilon_{prom}} \quad (2.5)$$

$$E_p = \frac{31.875}{1.9 * 10^{-4}}$$

$$E_p = 1.7 * 10^5 \text{ MPa}$$

Se calcula el % de error en el cálculo experimental de E para lo cual se toma el valor teórico de ET dado en los datos iniciales:

$$\%error = \frac{E_p - E_T}{E_p} \cdot 100 \quad (2.6)$$

$$\%error = \frac{1.7 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5}{1.7 \cdot 10^5} \cdot 100 \%$$

$$\% error = -17.64 \%$$

2.2.3.2. Determinación de la elongación y la estricción

Después de que ocurrido la fluencia se retiró el extensómetro y se continuó aplicando carga hasta que ocurrió la rotura de la misma. La probeta partió al aplicarse una carga aproximada de 100 kN, lo que provoca una tensión de 318.5 MPa.

La probeta después de romper presenta grandes deformaciones plásticas como se aprecia den la Figura (2.5).

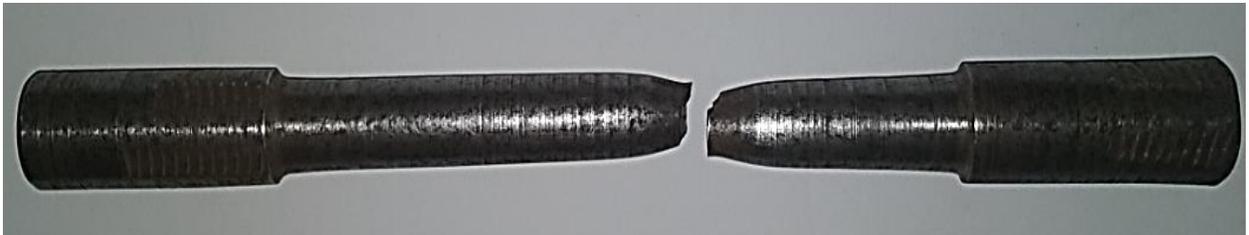


Figura 2.5. Probeta después de la rotura.

a) *Elongación del material:*

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} * 100 \quad (2.7)$$

$$\delta = \frac{13 - 10}{10} * 100$$

$$\delta = 30 \%$$

donde:

l_0 - es la longitud inicial de la probeta: 10 cm

l - es la longitud de la probeta después de rota: 13 cm

δ - es el alargamiento permanente relativo en el momento de la rotura, es decir, ductilidad.

b) *Estricción*: Reducción relativa en la sección transversal.

$$\phi = \frac{A_0 - A}{A_0} \cdot 100 \quad (2.8)$$

$$\phi = \frac{3.14 - 2}{3.14} * 100$$

$$\phi = 53.27 \%$$

donde:

A- área mínima de la sección de la probeta de ensayo en el lugar de rotura.

A_0 - área de la sección de la probeta antes del ensayo

ϕ - caracteriza la plasticidad del material porque expresa la reducción máxima del área en las condiciones dadas durante la rotura de la probeta.

$$A_0 = \frac{\pi d^2}{4}$$

$$A_0 = 0.785 * 2^2 \quad (2.9)$$

$$A_0 = 3.14 \text{ cm}^2$$

$$A = 0.785 * 1.6^2$$

$$A = 2 \text{ cm}^2$$

2.2.3.3. Análisis de los resultados

Después de realizado el ensayo se pasa a analizar los resultados obtenidos.

a) Elongación y Estricción

La elongación y la estricción que se obtiene en el ensayo son del 30 % y 53.27 % respectivamente, se compara con lo expuesto en la Tabla (2.2) y se determina el porcentaje de error:

Elongación:

- Elong. práctica: 30 %
- Elong. teórica: 28 %

$$\% \text{ error} = \frac{30 - 28}{30} \cdot 100 = 6.66 \%$$

Estricción:

- Estricc. práctica: 53.27 %
- Estricc. teórica: 50 %

$$\% \text{ error} = \frac{53.27 - 50}{53.27} \cdot 100 = 6.13 \%$$

Como se aprecia en ambos resultados el porcentaje de error está dentro del rango permisible, y por tanto se puede considerar el resultado satisfactorio.

b) Módulo de elasticidad (E)

El módulo de elasticidad no es más que la pendiente de la curva en la zona elástica del gráfico de σ Vs ϵ , que en este caso se obtiene a partir de los resultados prácticos obtenidos en el epígrafe 2.2.3.1. Como se puede apreciar el porcentaje de error que se obtiene al comparar este resultado con el teórico que aparece en la Tabla (2.2) es de 17.64 %, lo que está por encima de los valores de errores permitidos para estos ensayos. Al estudiar las causas se aprecia que los valores de tensiones de fluencia y máximas se encuentran en valores cercanos a las que se esperan para este tipo de material, por tal motivo se considera que el error está producido por el dispositivo de medición.

2.3. Simulación del ensayo

En este acápite se realiza la simulación del ensayo de tracción, se determina fundamentalmente el módulo de elasticidad a partir de las tensiones y la deformación unitaria. Para la simulación se utiliza el software SOLIDWORKS, en el mismo se realiza el modelo geométrico y se utiliza el Método de los Elementos Finitos (MEF) para el cálculo de las tensiones y deformaciones a partir de la aplicación de cargas de tracción.

2.3.1. Creación del modelo

El modelo se realiza a partir de las dimensiones recomendadas por la norma cubana [9] para probetas cilíndricas. Como se aprecia en la Figura (2.6) se considera empotrada una de las dos cabezas de sujeción y en la otra cabeza se coloca la fuerza distribuida en los nodos. El software siempre propone un tamaño de malla, pero es necesario realizar el estudio de convergencia para descartar la influencia del tamaño de los elementos en los resultados.



Figura 2.6. Modelo de la probeta

2.3.2. Estudio de convergencia

Al realizar un modelo para el análisis por el MEF es muy importante el tamaño y el tipo de los elementos utilizados y la influencia que estos aspectos tienen en los resultados. Para evitar que ello interfiera en la calidad de los resultados y se trabaje con un error aceptable ($\pm 10\%$) en la bibliografía se reconocen tres métodos [21] que son:

Método H: consiste en la reducción del error actuando directamente sobre el tamaño del elemento y manteniendo constante la función de forma.

Método P: Consiste en ir aumentando progresivamente el grado de los polinomios de interpolación (funciones de forma) manteniendo fijo el tamaño de los elementos.

Método HP: Consiste en el uso secuencial de ambas técnicas. En primer lugar, se optimiza el mallado a la geometría, y posteriormente se modifica el grado del polinomio hasta alcanzar el error deseado.

En este trabajo se utilizará el llamado Método H. Para esta elección se parte de la simplicidad del modelo y de la recomendación que plantea que al disminuir el tamaño de los elementos el error tiende asintóticamente a cero [22].

Para la determinación del error en ciertos métodos numéricos usan un *esquema iterativo* para calcular resultados, como es el caso del MEF. En tales esquemas, se hace una aproximación en base a la aproximación anterior. Este proceso se repite varias veces, o de forma iterativa, para calcular sucesivamente más y mejores aproximaciones. En tales casos, el error a menudo se calcula como la diferencia entre la aproximación previa y la actual [23]. Por lo tanto, el error relativo porcentual está dado por:

$$\varepsilon_a = \frac{\text{aproximación actual} - \text{aproximación previa}}{\text{aproximación actual}} 100\% \quad (2.10)$$

Para este estudio se toma el mallado estándar que propone el software, que tiene las siguientes propiedades:

- Tipo de malla: malla sólida
- Calidad de malla: Elementos cuadráticos de alto orden

Posteriormente se cambia el tamaño de los elementos y se determina el valor de la tensión equivalente en la zona de trabajo de la probeta, tomándose este resultado como magnitud de referencia para valorar la influencia del tamaño del elemento en el error de los resultados.

El software propone por defecto un tamaño de elemento de 4.62 mm, para el estudio se comenzó tomando un valor menor, después se toma el valor propuesto y posteriormente se tomará uno mayor. Se aplicó una fuerza de 20 000 N que se mantendrá constante al cambiar el tamaño de los elementos y se tomará como referencia el valor de la tensión en la zona de trabajo de la probeta. Los resultados se muestran en la Tabla (2.3).

Tabla 2.3. Tamaño de los elementos y tensiones equivalentes

Corrida	Tamaño del elemento (mm)	Tensión equivalente (MPa)
1	2,31	62,08
2	4,62	63,68
3	7,74	63,71

Se determina el porcentaje de error según la expresión (2.10):

a) Error entre las corridas 1 y 2

$$\%error_{1-2} = \frac{63.68 - 62.08}{63.68} \cdot 100 = 2.51\%$$

b) Error entre las corridas 2 y 3

$$\%error_{2-3} = \frac{63.71 - 63.68}{63.71} \cdot 100 = 0.04\%$$

c) Error entre las corridas 1 y 3

$$\%error_{1-3} = \frac{63.71 - 62.08}{63.71} \cdot 100 = 2.55\%$$

Como se aprecia en los resultados de los porcentajes de errores, el tamaño de los elementos no tiene una influencia significativa en los valores de los resultados.

2.3.3. Resultados de la simulación

Como resultado del estudio de convergencia se trabajará con el mallado propuesto por el software que se muestra en la Tabla (2.4).

Tabla 2.4. Detalles de la malla propuesta por el software

Nombre de estudio	Análisis estático 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivar
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivar
Puntos jacobianos	4 puntos
Tamaño de elementos	4.62393 mm
Tolerancia	0.231196 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	11934
Número total de elementos	7377
Cociente de aspecto máximo	3.9493
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	99.6
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:02
Nombre de computadora	

La simulación se realizó en forma similar al ensayo real realizado, es decir se aplica una carga que va aumentando de 10 en 10 kN y se realiza la lectura de las tensiones en la zona de trabajo de la probeta al mismo tiempo que se lee el valor de la deformación unitaria. Los resultados se muestran en la Tabla (2.5).

Tabla 2.5. Tensiones y deformaciones unitarias en la simulación

No. Lect	Carga P (KN)	Tensión σ (MPa)	Deform, Unitaria $\epsilon, 10^{-4}$
1	10	31,84	1,669
2	20	62,37	3,038
3	30	95,52	4,708
4	40	127,4	6,377
5	50	159,2	8,047

Tabla 2.6. Incrementos de las tensiones y deformaciones unitarias

No. Lect,	Incrementos	
	$\Delta\sigma$ (MPa)	$\Delta\varepsilon, 10^{-4}$
1	30,53	1,369
2	33,15	1,67
3	31,88	1,669
4	31,8	1,67
	$\Sigma\Delta\sigma = 127,36$	$\Sigma\Delta\varepsilon = 6,378$
	$\Delta\sigma_{prom} = 31,84$	$\Delta\varepsilon_{prom} = 1,5945$

Se calcula E según ecuación (2.5):

$$E_p = \frac{\Delta\sigma_{prom}}{\Delta\varepsilon_{prom}}$$

$$E_p = \frac{31.84}{1.5945 \cdot 10^{-4}}$$

$$E_p = 1.99 \cdot 10^5 \text{ MPa}$$

Se calcula el % de error en el cálculo experimental de E para lo cual se toma el valor teórico de ET dado en los datos iniciales:

$$\%error = \frac{E_p - E_T}{E_p} \cdot 100$$

$$\%error = \frac{1.99 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^5}{1.99 \cdot 10^5} \cdot 100 \%$$

$$\% error = -0,5 \%$$

Como se puede apreciar el porcentaje de error al determinar el módulo de elasticidad en la simulación es mínimo.

2.4. Conclusiones parciales

- Al realizar el análisis químico del material se pudo constatar que se corresponde con un acero AISI-SAE 1015 laminado en caliente.
- Después de realizar el ensayo de tracción se determina la elongación, la estricción y el módulo de elasticidad experimental. En las dos primeras propiedades el material se comporta según lo previsto en la bibliografía, es decir el porcentaje de error tiene un valor aceptable, 6,66 % en la elongación y 6,13 en la estricción. En el caso del módulo de elasticidad experimental obtenido tiene un error por encima del valor aceptable, de 17,64 %. Se considera que este error es producido por deficiencias en el proceso de medición de las deformaciones, específicamente por el extensómetro mecánico utilizado.
- En el caso de la simulación utilizando el Método de los Elementos Finitos se determina solamente el módulo de elasticidad. El error al determinar esta propiedad es despreciable, solamente del 0,5 %.

Capítulo 3. Preparación de la práctica de laboratorio

3.1. Introducción

La extensometría es uno de los métodos experimentales más utilizados para la determinación de tensiones a partir de las deformaciones [2]. Por tal motivo es de gran importancia que los estudiantes de Ingeniería Mecánica conozcan esta técnica y dominen los fundamentos básicos para su aplicación. Por otra parte, en el Laboratorio de Resistencia de Materiales no se cuenta con un extensómetro adecuado para realizar la medición de las deformaciones durante la realización del ensayo de tracción y poder determinar de esta forma propiedades fundamentales de los materiales como el módulo de elasticidad y la tensión de fluencia.

Es por esos motivos que en este capítulo se realiza la preparación de una práctica de laboratorio sobre el ensayo de tracción en la que se realiza la medición de las deformaciones utilizando la extensometría eléctrica. Se incluye todo el procedimiento del pegado de los “*strain gage*”, los conocimientos teóricos básicos, la técnica operatoria y las tablas y fórmulas que se utilizarán durante el desarrollo de la práctica.

3.2 Preparación de la superficie

El objetivo de la preparación del material es crear una superficie limpia, libre de imperfecciones y químicamente apropiada. Para alcanzar dichos parámetros se deben seguir al pie de la letra los siguientes procedimientos en orden:

- ✓ **Limpieza burda.** Se debe eliminar todo tipo de pintura, corrosión, oxidación o cualquier otro contaminante que pueda haber para el área de adhesión (más un área de tolerancia) de las galgas.
- ✓ **Suavizar la superficie.** Cualquier tipo de protuberancia, canales, o imperfección mecánica debe ser eliminada por un proceso de pulido, limado, cepillado o lo que sea necesario para el caso.
- ✓ **Eliminar grasas.** Este procedimiento se requiere para eliminar todo tipo de aceites, grasas, contaminantes orgánicos y residuos de productos químicos

solubles. La elección del agente de limpieza depende de la naturaleza del contaminante y si la superficie puede ser deteriorada por el limpiador. Entre las opciones más comunes están el tolueno, acetona, alcohol isopropílico, desengrasante en aerosol, baños líquidos agitados ultrasónicamente, métodos desengrasantes por vapor, tricloroetileno y otras sustancias químicas más especializadas.

Para áreas grandes usar primero un polvo limpiador abrasivo como AJAX en polvo. Habiendo hecho esto, se debe enjuagar la superficie con agua de tal manera que al terminar se deje una capa continua de sólo agua sobre la superficie. Ésta se debe secar con papel o con calor. El procedimiento de limpieza consiste en empapar una gasa en el agente limpiador y lavar la superficie cubriendo inicialmente un área mayor a la deseada [14].

Notas importantes:

- El agente limpiador debe estar químicamente limpio y no debe dejar residuos.
 - Nunca usar el agente limpiador directamente del recipiente donde se almacena. Una cantidad adecuada debe traspasarse a un recipiente limpio del cual se usará.
 - Cada gasa usada debe ser desechada y nunca introducir una gasa usada en el recipiente con el agente limpiador.
 - Porciones del agente limpiador sin usarse deben desecharse.
 - El área a limpiar debe ser bien delimitada y avanzar progresivamente en esa zona hasta cubrirla completamente sin regresar a limpiar nuevamente para evitar introducir nuevas partículas sucias a la zona limpia.
- ✓ **Lijado.** La adhesión entre dos superficies depende del área de las superficies que se cubre con el adhesivo. Un buen pulido fino de las superficies aumenta la adhesión porque aumenta el área de contacto efectiva. Para lijar la superficie se debe tomar en cuenta que sea un papel de lija apropiado para el material y de un grado adecuado. Para acero se usa un grado 80 a 180 y para aluminio un grado

220 a 360. Para evitar hacer canales en el material este procedimiento debe hacerse en movimientos circulares y de preferencia usando primero un papel de lija más grueso y después uno más fino.

- ✓ **Limpieza fina.** Cualquier residuo de lija, material o polvo generado en el proceso anterior debe ser eliminado cuidadosamente. Se pueden usar los mismos métodos usados en el punto 2.3. Tome cada gasa empapada con pinzas de punta finas o 'tweezers' y pásela por la superficie una sola vez. Este procedimiento debe ser repetido una y otra vez hasta que la gasa no muestre señas de decoloración al pasarla por la superficie. La superficie debe dejarse seca y libre de residuos de gasa. Debe cuidar no soplar o respirar cerca de la superficie y evitar tocarla.
- ✓ **Marcar la superficie.** La superficie del espécimen donde se van a aplicar las galgas debe marcarse ligeramente para poder alinear las galgas según la deformación que se desea medir. Utilícese un lápiz 4H para aluminio y un bolígrafo para acero para hacer unas ligeras marcas en la periferia del lugar de aplicación de las galgas. Tenga presente que las galgas contienen también señales de alineación.
- ✓ **Alcalinidad óptima.** Si es el caso, la superficie debe ser tratada para poner su valor de alcalinidad de 7 a 7,5 pH. Se aplica un neutralizador líquido libremente sobre la superficie limpia, se talla y seca con gaza o con palillos con punta de algodón. Tallar y secar debe hacerse siempre en una sola dirección y sin reusar el algodón o gaza.

Si los procedimientos anteriores se han seguido con atención y cuidado, la superficie está ya lista para que las galgas se adhieran. A partir de este momento las galgas deben ser adheridas tan pronto sea posible para minimizar contaminación [14].

3.3 Adhesión de las galgas

3.3.1. Posicionamiento de la galga

Tome la galga con unas pinzas finas y colóquela en una superficie químicamente limpia con la superficie de adhesión hacia abajo. Si va a usar terminales para soldar se recomienda colocarlas a 1.6 mm del límite de la galga y alineadas en el centro.

Tome un pedazo de cinta adhesiva de unos 10 ó 15 cm de largo y póngala sobre la galga y terminal de tal manera que queden centradas en la cinta. Levante la cinta cuidadosamente en un ángulo de aprox. 45° de la superficie, trayendo consigo la galga y terminal adheridas, como lo muestra la Figura (3.1).

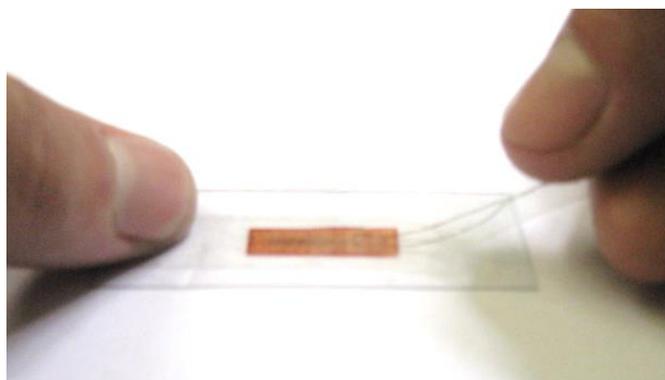


Figura 3.1. Galga y terminal adherida a la cinta.

3.3.2. Alineación de la galga

Posicione la cinta con la galga y terminal en el espécimen de tal manera que las marcas de alineación coincidan con las marcas del espécimen y pegue firmemente un extremo de la cinta como se muestra en la Figura (3.2). Si la alineación no coincidiera a satisfacción, levante la cinta de un extremo manteniendo un ángulo igual o menor a 45° hasta despegar la cinta completamente. Repita el procedimiento de alineación hasta quedar satisfecho. Para técnicos principiantes se recomienda usar cinta adhesiva especializada para estas aplicaciones ya que ésta no deja residuos de adhesivo cuando se despega.

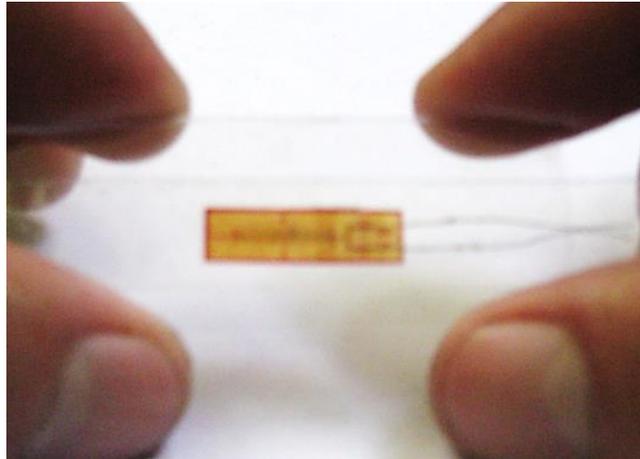


Figura 3.2. Galga y terminal alineada en la probeta.

3.3.3. Preparación final

Levante la cinta con la galga en un ángulo agudo Figura (3.3) hasta que el terminal quede aproximadamente 1 cm libre. Doble la cinta sobre sí misma y pegue el otro extremo sobre la superficie de la viga de tal manera que la galga y terminal queden expuestas en una superficie plana con la parte a adherirse hacia arriba Figura (3.4).

- **Nota 1:** Se deben revisar las especificaciones del fabricante para saber si la galga misma requiere de limpieza en la superficie de adhesión. Si la galga ha sido contaminada entonces debe ser limpiada con algodón y un neutralizador.
- **Nota 2:** Algunos adhesivos requieren que se le aplique a la galga un catalizador para que el adhesivo tome mejor efecto. Si este es el caso, siga los procedimientos marcados por el fabricante o consulte las guías técnicas publicadas por The Measurements Group, Inc.
- **Nota 3:** Los siguientes tres pasos deben ser realizados en la secuencia mostrada y en un lapso de 3 a 5 segundos. Lea y memorice estos pasos antes de iniciar el procedimiento.



Figura 3.3. Levantar la cinta en un ángulo agudo.

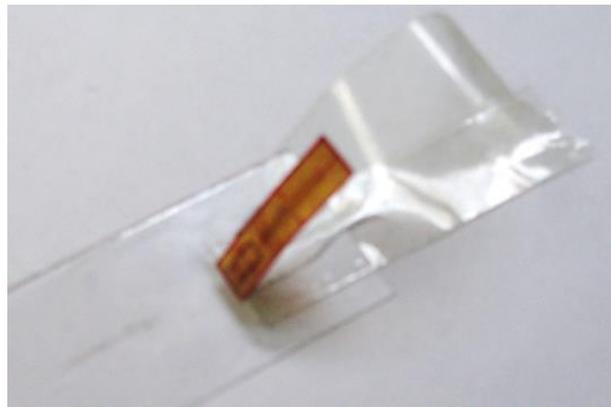


Figura 3.4. Posicionar la cinta para que la parte inferior de la galga quede expuesta.

3.3.4. Aplicación del adhesivo

Levante la cinta del lado que ha sido doblada sobre sí misma. Tomando la cinta sin jalar ni doblar. Aplique una o dos gotas de adhesivo en la unión de la cinta con el espécimen a aproximadamente 1 cm. de la periferia de la galga con terminal vea la Figura (3.5). Esto permite que la polimerización instantánea del adhesivo al contacto con el espécimen no provoque imperfecciones en la homogeneidad y uniformidad de la película de adhesivo.

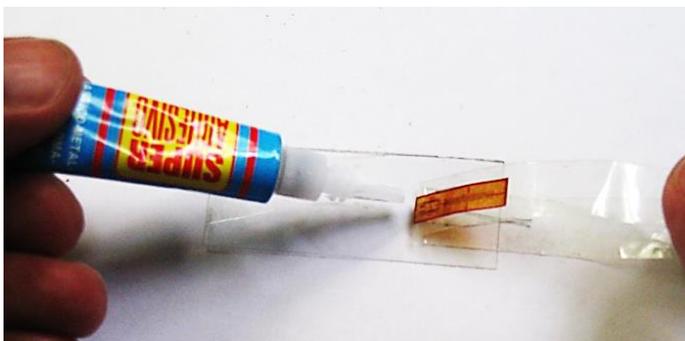


Figura 3.5. Aplicación del adhesivo.

3.3.5. Adhesión

Inmediatamente desdoble la cinta adhesiva para que esta quede aproximadamente a 30° de la superficie del espécimen con la galga y terminal haciendo un 'puente' sobre el lugar de instalación. Mientras se sostiene la cinta con una ligera tensión, aplique una presión deslizando con sus dedos y un pedazo de gasa que vaya oprimiendo la galga y terminal sobre su posición y alineación deseadas ver la Figura (3.6). Use una presión firme al recostar la galga sobre su posición ya que se requiere una película muy delgada y uniforme de adhesivo para resultados óptimos.



Figura 3.6. Adhesión.

3.3.6. Aplicación de presión

Inmediatamente después de la acción deslizando y ya con la galga en su posición y alineación correctas, aplique una presión firme con el dedo pulgar sobre la galga y terminal ver Figura (3.7). Esta presión se debe ejercer por lo menos por espacio de un minuto. En condiciones de humedad baja (menos de 30% de HR) o en temperaturas

menores a 20°C la presión debe extenderse a varios minutos, dependiendo de las condiciones. Cuando se tienen galgas de tamaño grande o superficies no uniformes puede requerirse de un dispositivo mecánico para aplicar la presión, por lo que también se requiere aplicar presión por más tiempo. El calor del dedo humano ayuda a una rápida polimerización del adhesivo. Espere por lo menos dos minutos para quitar la cinta después de retirar la aplicación de presión.

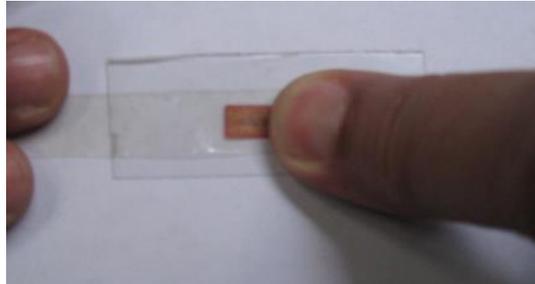


Figura 3.7. Aplicación de presión.

3.3.7. Retirar la cinta

La galga y terminal ya deben estar firmemente adheridas al espécimen. Para retirar la cinta, júlela directamente sobre sí misma de forma continua y lenta para evitar ejercer fuerzas innecesarias sobre la galga. Realmente no es necesario retirar la cinta inmediatamente después de la instalación y puede permanecer como protección mecánica hasta que se vaya a proceder a soldar.



Figura 3.8. Cómo retirar la cinta.

3.4 Procedimientos para soldar

3.4.1. Herramienta y técnica para soldar

Se debe cuidar que la punta del cautín sea de terminación plana o tipo desarmador plano (Figura 3.9) y que se suelde usando la parte plana Figura (3.10). Se debe cuidar que se tenga una temperatura adecuada en el cautín y que no se haga contacto con los terminales de la galga por más de un segundo [2].

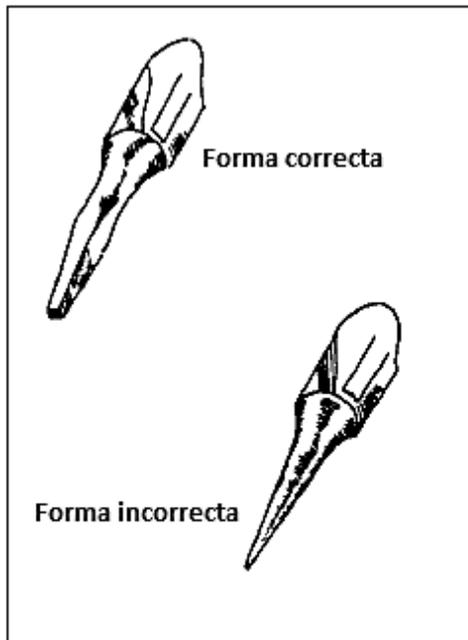


Figura 3.9. Formas correcta e incorrecta de la punta del cautín

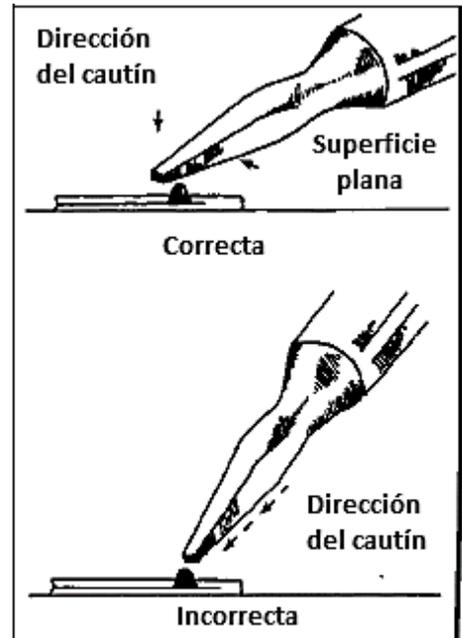


Figura 3.10. Formas correcta e incorrecta de aplicar la soldadura

3.5. Procedimiento para soldar

Este procedimiento debe realizarse con cuidado para evitar cualquier eventual daño a la galga. Como paso previo a soldar cables a las galgas los cables a soldar y las terminales deben ser recubiertos de soldadura para obtener una mejor transferencia de calor y una soldadura más rápida y nítida. En el caso de tener galgas extensiométricas no encapsuladas, antes de soldar se debe cubrir el área de la galga con cinta adhesiva, dejando la mitad de los terminales de la galga expuestos para soldar, como en la Figura (3.11). Procure usar un cautín con temperatura controlada. Temperaturas muy altas

tienden a oxidar la punta y a evaporar instantáneamente la pasta de soldar lo cual hace la operación más difícil. Se recomienda fijar el cable a soldar con una cinta adhesiva también para tener los cables a soldar en el lugar correcto y dispone de ambas manos para soldar. Coloque el cautín a un ángulo de 30° o menor sobre la terminal de la galga y cable y al mismo tiempo alimente aproximadamente 3 mm de soldadura Figuras (3.10 y 3.12). Al terminar levante simultáneamente la punta del cautín y la soldadura. La soldadura debe ser de la que contiene flujo antioxidante en su interior. El procedimiento de soldadura de cada terminal debe durar aproximadamente 1 segundo. La soldadura debe quedar como un pequeño montículo sobre el terminal Figura (3.13) y la punta del cable y debe tener un aspecto suave y brillante. Deben evitarse picos y soldaduras opaca.



Figura 3.11. Protección del área de la galga y parte superior de los terminales con cinta adhesiva.

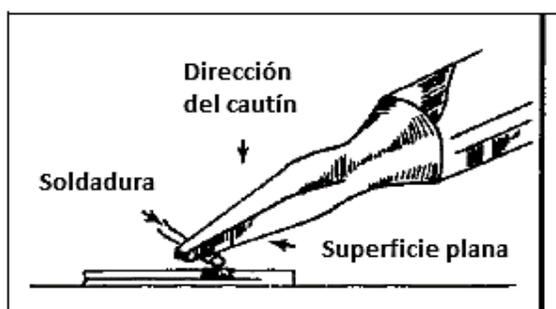


Figura 3.12. Colocación del cautín y la soldadura

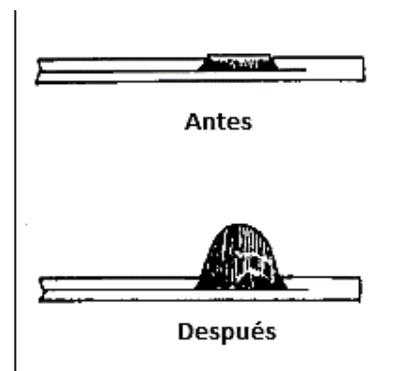


Figura 3.13. Forma correcta del montículo de soldadura

3.6 Recubrimientos de protección

3.6.1. Barniz de recubrimiento.

La instalación completa debe protegerse mediante recubrimientos especializados. El tipo y técnica de recubrimiento depende de la aplicación y el ambiente de uso del sensor. En general se requiere de al menos un barniz protector y podría llegar a requerirse una capa de silicón o cera para protección mecánica y contra la humedad.

3.7 Instalación de las galgas para el ensayo de laboratorio

3.7.1. Puente de Wheatstone

Para evaluar las variaciones de resistencia experimentadas por las galgas cuando se deforman, éstas se conectan en un circuito eléctrico y se mide la variación de la tensión eléctrica en ellas. Las resistencias de las bandas tienen valores comprendidos entre 0.001Ω y 0.72Ω , por lo que las variaciones que se producen son muy pequeñas y exigen métodos capaces de detectar incrementos de resistencia de 0.0001Ω . El circuito en *Puente de Wheatstone* que se representa en la Figura (3.14) permite medir estas diferencias de potencial y, según cuántas galgas se utilicen y dónde se conecten, amplificar la señal producida por la deformación para facilitar su lectura.

El puente de Wheatstone está formado por cuatro resistencias unidas en serie –paralelo, de las cuales una o varias de ellas son galgas eléctricas o extensómetros, mientras que las restantes son simples resistencias eléctricas que completan el diseño del puente. La Figura (3.14) muestra dos ilustraciones diferentes del puente de Wheatstone que son idénticas eléctricamente [2].

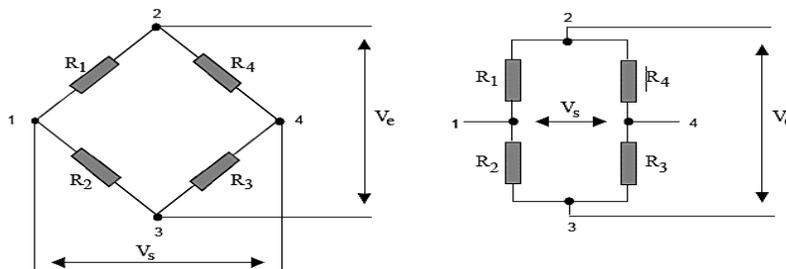


Figura 3.14. Puente de Wheatstone

Las cuatro ramas del circuito están formadas por las resistencias R_1 , R_2 , R_3 y R_4 . Los puntos 2 y 3 del puente designan las conexiones para el voltaje de excitación del puente (V_e). La señal de medida es voltaje de salida del puente (V_s), que se obtiene en los puntos 1 y 4.

La alimentación del puente se puede realizar en corriente continua ó alterna.

3.7.2. Condición de equilibrio del Puente

Se dice que el puente está equilibrado cuando no hay diferencia de potencial entre los puntos 1 y 4, es decir, $V_s = 0$. Para ello, se debe cumplir la condición:

$$R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4 \quad (3.1)$$

Partiendo de esta condición, una sollicitación de la estructura dará lugar a una deformación que afectará al extensómetro adosado a la misma. De esta deformación se derivará un cambio de resistencia eléctrica que desequilibrará el puente, haciendo variar la aguja del voltímetro de la posición inicial cero, al haberse originado una diferencia de potencial entre 1 y 4.

Ley de signos:

La expresión que define el comportamiento del puente de Wheatstone para el caso más general en el que las cuatro resistencias sean bandas extensométricas pegadas a un sólido elástico que se deforma es:

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (3.2)$$

De esta expresión se deduce que las variaciones de resistencia influyen con distinto signo sobre la tensión de salida según la rama considerada. Partiendo de una resistencia cualquiera, se cumple la regla de que las resistencias situadas en ramas adyacentes influyen en sentido contrario, mientras que la de la rama opuesta lo hace en el mismo sentido. En la Figura 3.15 se representa esta regla, llamada “regla de los signos”, muy importante a efectos prácticos, pues indica cómo tienen que estar montadas las galgas en cada caso [2].

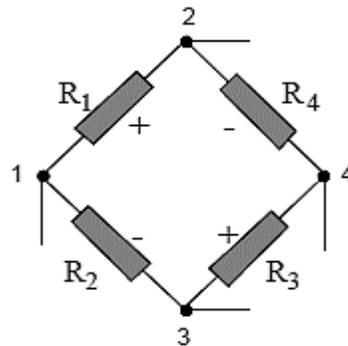


Figura 3.15. Ley de los signos

La expresión anterior también muestra que los cambios relativos de resistencias de cada rama del puente es el factor gobernante en el equilibrio del puente y no los cambios absolutos de resistencia.

Teniendo en cuenta (3.2), la ecuación de comportamiento del puente (3.3) puede reescribirse en función de las deformaciones longitudinales (ϵ):

$$\frac{\Delta V_s}{V_e} = \frac{1}{4}(\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (3.3)$$

Esta ecuación indica que la variación unitaria del voltaje que se mide entre los puntos 1 y 4 es directamente proporcional a la suma algebraica de las deformaciones que sufren las bandas que componen el puente de medida.

3.7.3. Circuitos elementales

De acuerdo con el problema de medida que se presente, se conectarán al puente una o varias bandas. Las denominaciones de circuito en *puente completo*, *medio puente* o *cuarto de puente*, indican que las cuatro, dos o una de las resistencias del circuito respectivamente son galgas extensométricas. En las restantes ramas se disponen resistencias eléctricas de valor fijo para completar el puente.

Las configuraciones en medio puente y puente completo permiten amplificar la señal producida por la deformación de las galgas, con lo que se facilita la medida de la misma, o bien filtrar unas componentes de la deformación y amplificar otras. La medida la que se

amplifica la señal en una determinada configuración se denomina factor de sensibilidad del puente. A las ramas de un circuito en puente de Wheatstone cuya resistencia eléctrica puede variar por causa de una deformación se las denomina ramas activas. En caso contrario se dirá que es una rama pasiva. En las Figuras siguientes que muestran algunas de las diferentes configuraciones de circuitos se representará esta diferencia por medio de un tono gris que indica banda activa.

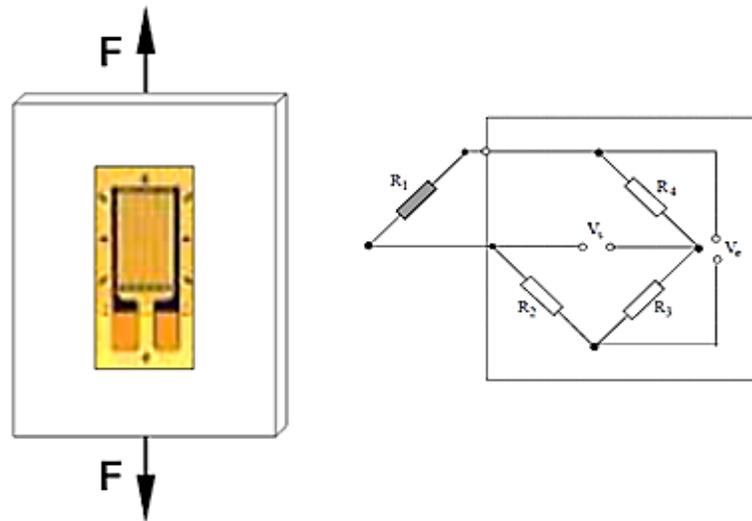


Figura 3.16. Probeta en tracción y circuito en cuarto puente

$$\varepsilon = \frac{P}{E \cdot A} \quad \varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{ prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto de puente)}$$

Esta configuración longitudinal de la galga responderá a las cargas de tracción, pero es inafectada por las galgas torsionales si la galga se monta en línea central. Debe tomarse cierta precaución en cómo se aplica la carga, porque los transductores que utilizan esta configuración también responderán a cualquier carga axial que pueda estar presente. Puesto que esta configuración produce una cantidad pequeña de no linealidad y es sensible a los cambios de temperatura, la configuración siguiente de “medio puente” se prefiere generalmente.

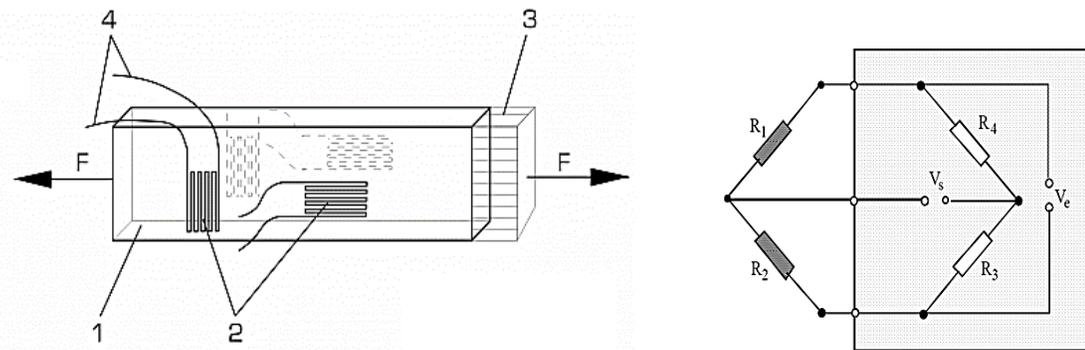


Figura 3.17. Probeta en tracción y circuito en medio puente

$$\varepsilon = \frac{P}{E \cdot A}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{K\varepsilon(1+\nu)}{4 + 2K\varepsilon(1-\nu)}$$

3.8 Práctica de laboratorio

Tema: “Métodos Experimentales”

Título: “Determinación de deformaciones mediante la extensometría en el ensayo de tracción”

Tiempo de duración: 2 horas

Objetivos:

- Determinar experimentalmente las deformaciones en una barra sometida a tracción mediante el método extensométrico.
- Determinar el módulo de elasticidad del material de forma experimental.
- Comparar los resultados teóricos con los obtenidos experimentalmente.

Indicaciones:

- Realizar un estudio del tema mediante el libro Mecánica de Materiales de Beer & Johnston, las notas de la conferencia y el estudio además de este folleto.
- Debe tener claro dominio de la técnica operatoria para poder realizar el ensayo.

- Llevar al laboratorio el equipamiento necesario para trabajar en el mismo como es, lápiz, goma de borrar, regla o cartabón, tablas matemáticas o calculadora.

1. Fundamentos teóricos

El desarrollo de los métodos de medida de esfuerzos es de historia reciente. De hecho, ha venido impuesto por las necesidades de la producción masificada, que recibió un impulso definitivo a raíz de la II Guerra Mundial. En el prólogo de un libro de Resistencia de Materiales de 1930 ya es patente esa situación: ... los tipos de máquinas y estructuras cambian muy rápidamente, con preferencia en las nuevas ramas de la industria y por lo general, el tiempo no permite que se reúnan los datos empíricos necesarios. El tamaño y costo de las estructuras aumentan constantemente, lo que origina una exigencia cada vez mayor en la seguridad de las mismas. Cada vez tiene más importancia en el proyecto el factor economía, dadas las condiciones actuales de competencia. La construcción debe reunir las condiciones necesarias de solidez y seguridad, y sin embargo, reducir al mínimo el gasto de material. La reducción de peso implica un aumento de las fatigas en la estructura y la investigación experimental de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados... (S.Timoshenko Resistencia de Materiales. Madrid. 1944).

El sobredimensionado en el diseño y el análisis empírico por ensayo y error son técnicas inaplicables en los sectores más avanzados de la industria. Se requieren vehículos veloces, máquinas sometidas a altos regímenes de trabajo, estructuras gigantescas, etc. Y todo ello rápido y barato. De ahí la necesidad de instrumentos capaces de determinar esfuerzos experimentales, bajo condiciones reales.

2. Definición de Extensometría

Robert Hooke estableció en 1678 la relación que existe entre tensiones y deformaciones en los cuerpos sometidos a sollicitaciones mecánicas. Si el material es isótropo y homogéneo y no se sobrepasa su límite elástico, entonces la relación es lineal.

Basándonos en este principio, la extensometría es el método que tiene por objeto la medida de las deformaciones superficiales de los cuerpos [4].

Clasificación de las mediciones extensométricas

Se tomará como criterio la evolución en el tiempo de los esfuerzos a medir:

a) *Medidas estáticas*: Comprenden el estudio de esfuerzos que varían lentamente en función del tiempo, como es el caso de la estructura de una presa cuando crecen las aguas.

b) *Medidas estáticas dinámicas*: consisten en la medida simultánea de esfuerzos sujetos a variación rápida (choques, vibraciones) y de esfuerzos de desarrollo lento. En el caso de un puente cuando soporta el paso de un vehículo.

c) *Medidas dinámicas*: Se limitan a las componentes de variación rápida. Un caso típico es la medida de vibraciones en el equilibrado de rotores.

En cuanto a los esfuerzos podemos clasificarlos según el estado de sollicitación considerado (tracción, compresión, flexión, torsión, cortante, etc. Y sus diferentes combinaciones).

3. Las galgas extensométricas

De entre los diferentes procedimientos que existen para convertir las deformaciones en señales eléctricas proporcionales, el más extendido es el que utiliza elementos cuya resistencia eléctrica varía en función de pequeños cambios de longitud. Esos elementos van adheridos a la superficie del material de prueba formando un conjunto solidario, y reciben el nombre de galgas extensométricas.

4. Tipos de galgas extensométricas

1- Galgas Metálicas:

El principio de medida de las galgas metálicas se basa en tres premisas:

- El valor de la resistencia de un conductor está en función de sus características geométricas (efecto enunciado por Lord Kelvin).
- A todo aumento de longitud corresponde una disminución de la sección transversal (efecto de Poisson).
- La variación de resistividad es proporcional a la variación relativa de volumen (efecto enunciado por Bridgman).

De todo ello resulta la ecuación:
$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Dónde: K es el factor de la galga, cuyo cálculo corre a cargo del fabricante.

- a) Galgas de filamento (wire strain gauge): el elemento sensible es un hilo conductor metálico (aleaciones de níquel con cobre o cromo) con una sección circular de 0.025 mm aproximadamente de diámetro, y encolado sobre un soporte aislante de resina epóxica, poliéster o material análogo. Para ofrecer la máxima longitud activa dentro de un área reducida, el hilo presenta varios pliegues siguiendo la disposición de la siguiente Figura.

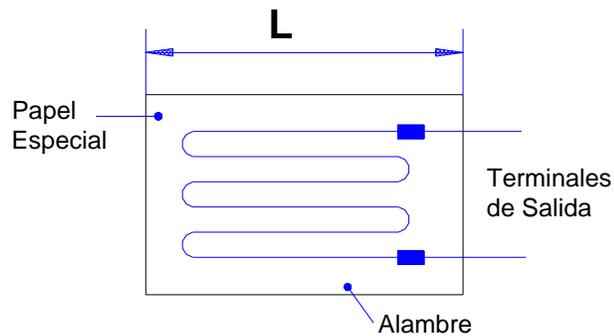


Figura 1. Esquema de una galga

- b) Galgas de trama pelicular (foie strain gauge): el elemento sensible es una película de metal de pocas micras de espesor, recortada mediante ataque fotoquímico.

2- Galgas Semiconductoras: el elemento sensible es una banda de cristal semiconductor con un cierto grado de contaminación. También existen galgas de filamento y de trama.

5. Puente de Wheatstone (conexión de las galgas en un cuarto de puente)

Para medir la variación de la resistencia se emplea el puente de Wheatstone con preferencia a cualquier otro circuito. El puente de Wheatstone es un sistema pasivo formado por cuatro impedancias montadas dos a dos en serie, tal y como se muestra en la Figura. La tensión de alimentación V_e es aplicada a dos vértices opuestos y en los dos restantes se recoge la tensión de medida V_s .

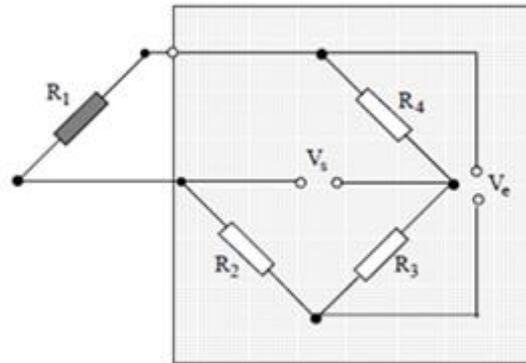


Figura 2. Circuito cuarto puente

6. Fuentes de error

Los materiales experimentan deformaciones de origen térmico que no corresponden a esfuerzo alguno y que sin embargo repercuten en la resistencia de los extensómetros provocando errores en las mediciones. Se fabrican galgas autocompensadas cuya resistencia tiene un coeficiente de temperatura negativo, de manera que, dentro de ciertos límites, pueden contrarrestar un coeficiente de dilatación del mismo valor.

Otros aspectos de interés:

Los extensómetros deben colocarse de modo que midan las deformaciones en las direcciones de las Tensiones Principales, que son las magnitudes más importantes a conocer.

En ocasiones no es posible conocer la dirección de todas las Tensiones Principales, pero sí al menos de una de ellas. En estos casos se utilizan las llamadas Rosetas, colocando la dirección de una de sus ramas coincidiendo con la dirección principal conocida y aplicando la Ley de Hooke generalizada, se pueden conocer las deformaciones en el resto de las direcciones y por tanto las tensiones.

7. Manipulación de las galgas

Para medir las deformaciones mediante extensómetros eléctricos, es necesario tener mucho cuidado al fijarlos a la pieza. Cada fabricante hace recomendaciones especiales, que deben seguirse estrictamente. El lugar de fijación del extensómetro en la pieza debe

estar limpio y debe dejarse después de pegado el tiempo recomendado para el secado. Esta es una labor cuidadosa y de ello depende posteriormente la precisión de las medidas [2].

Antes de medir con los extensómetros es necesario calibrarlo si no se conoce su K. Para ello se coloca el mismo en una probeta cuya deformación puede ser calculada con suficiente exactitud por los métodos de Resistencia de Materiales o medida con elementos mecánicos. Comparamos el registro del extensómetro (Δ) con la deformación calculada o medida (ε) y así es posible determinar el Coeficiente de Sensibilidad del extensómetro:

$$K = \frac{\Delta L}{L\varepsilon} = \frac{\Delta}{\varepsilon}$$

Es posible tener mayor exactitud, no con una medida, sino con varias y construir un gráfico. El valor de K es válido para todo el grupo de extensómetros con las mismas características. Se recomienda calibrar el 10 % de los extensómetros a utilizar. Es recomendable también, utilizar el mismo elemento de medición de la deformación que se utilizó en la calibración [2].

8. Descripción del equipo y técnica operatoria

El ensayo de tracción es uno de los más difundidos de todos los ensayos mecánicos, este se realiza a barras especialmente preparadas según la norma establecida.

La probeta a ensayar se ajusta por sus extremos mediante las mordazas de la máquina de manera que su eje longitudinal coincida con el eje vertical de simetría de las mordazas o mandíbulas de sujeción y por tanto con la línea de aplicación de la carga.

Una vez colocada la probeta en la máquina de ensayo se le aplica la fuerza desde cero lenta y uniformemente hasta alcanzar la rotura de la probeta.

Por acción de la fuerza o carga, la barra se alarga y simultáneamente se hace más estrecha hasta que se rompe.

En la sección perpendicular al eje de la barra actúa la tensión principal y en una sección oblicua actuarán simultáneamente tensiones normales y tangenciales.

La tensión tangencial alcanza su valor máximo cuando sección considerada está a 45° con el eje de la barra. En algunos materiales esta tensión provoca desplazamiento

relativo entre los cristales que se pueden observar a simple vista en la superficie pulida del material en forma de líneas, aproximadamente a 45° con el eje de la probeta.

En esta práctica los extensómetros han sido montados previamente por el profesor como se muestra en las Figuras siguientes, así como las conexiones tanto a la fuente de corriente (E) como al voltímetro (V) donde se realizarán las mediciones del voltaje de salida (vs.), el cual se anotará en la columna correspondiente en la tabla de Resultados Experimentales, en la medida que se apliquen las cargas.

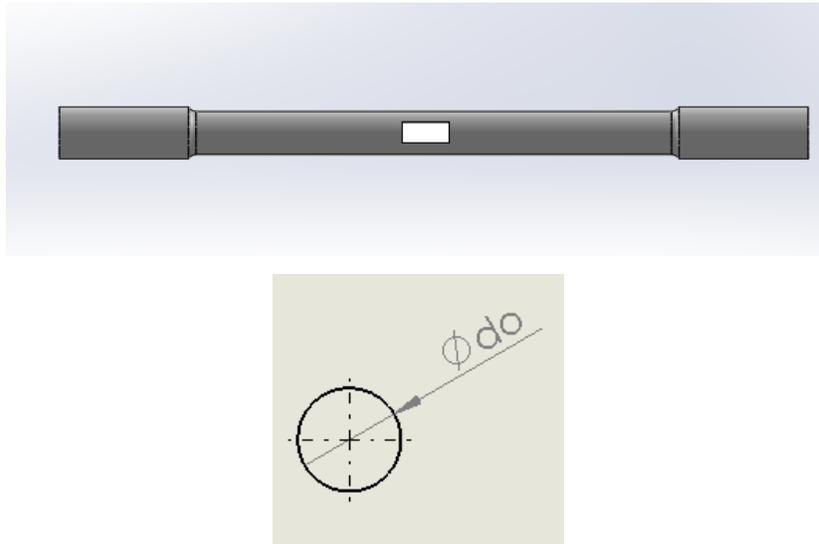


Figura 3. Probeta del ensayo y sus parámetros a medir.

Cuadros de anotaciones, procesamiento de datos y resultados

Datos iniciales:

Material	do (cm)	l (cm)	A (cm ²)	E (MPa)
Acero				2×10^5

Resultados Experimentales

No.	Carga P (kN)	Voltaje de salida $V_s \times 10^{-3}$ (Volts)	Incremento de Voltaje de salida $\Delta V_s \times 10^{-3}$
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
$\sum \Delta V_s =$			
$\Delta V_s \text{ prom} =$			

Cálculo teórico de la tensión y la deformación unitaria:

Expresiones:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad \sigma = E \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{N \cdot l}{E \cdot A}$$

Cálculo práctico de la tensión y la deformación unitaria:

Expresiones:

$$\varepsilon_p = \frac{4 \cdot \Delta V_s \text{ prom}}{V_e \cdot K \cdot K_f} \text{ (cuarto puente)} \quad \sigma = E \cdot \varepsilon$$

Dónde:

V_e - voltaje de entrada (1 Volts.)

K - factor del extensómetro (lo da el fabricante)

$\Delta V_s \text{ prom}$ – Valor promedio del Voltaje de salida.

K_f - Ganancia

Por ciento de error:
$$\% \text{ error} = \frac{\Delta \varepsilon_T - \Delta \varepsilon_P}{\Delta \varepsilon_T} * 100$$

Preguntas de autocontrol

1. Defina el concepto de extensometría.
2. Clasifique las mediciones extensométricas.
3. Mencione los tipos de galgas que Ud. Conoce.
4. Realice un esquema del puente de Wheatstone en cuarto de puente.
5. Mencione algunas de las fuentes de error que pueden existir en las mediciones extensométricas.
6. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de las galgas metálicas y de los extensómetros en general?

3.9. Conclusiones parciales

- Se preparó una práctica de laboratorio para la asignatura Resistencia de Materiales que combina el ensayo de tracción con la aplicación de la extensometría eléctrica. Ambas temáticas son de gran importancia para la formación de los futuros Ingenieros Mecánicos y ayuda en la motivación de los mismos.
- Se estableció todo el procedimiento para el montaje de las galgas extensométricas en las probetas para el laboratorio. El mismo es válido para el montaje de estos dispositivos en cualquier aplicación práctica que se quiera hacer por parte del especialista.
- En la práctica se utiliza el montaje de un cuarto de puente de Wheatstone. Se utiliza este circuito por ser el más simple, no obstante, permite la adquisición de las habilidades previstas por parte de los estudiantes.

Conclusiones generales

- Después de realizar una revisión bibliográfica sobre estas temáticas se pudo constatar que se han realizado muchos trabajos en los años recientes que estudian el ensayo de tracción. Para estos estudios se ha utilizado la simulación utilizando el MEF y la extensometría eléctrica.
- Se realizó el ensayo de tracción utilizando probetas de AISI 1015. Como resultado de este ensayo se determinó la estricción y la elongación, que coincidió con lo expuesto en la literatura para este tipo de acero. También se determinó el módulo de Young, lo que en este caso el error al compararlo con el teórico superó los valores permitidos. Se considera que este error es producido por el extensómetro mecánico que se utilizó para determinar las deformaciones.
- Se realizó la simulación del ensayo de tracción utilizando el software SolidWorks. Como resultado de esta simulación se determinaron las tensiones y deformaciones que aparecen al aplicar las cargas. Con resultados de esta simulación se determinó el módulo de Young teniendo un error mínimo.
- Se realizó el montaje de una práctica de laboratorio para la asignatura Resistencia de Materiales en la que se utiliza la extensometría eléctrica para la medición de las deformaciones durante el ensayo de tracción.

Recomendaciones

- Realizar el montaje de otra práctica de laboratorio en la que se realice el montaje de medio puente de Wheatstone

Bibliografía

- 1- Cabezas E., Celentano D. Experimental and numerical analysis of the tensile test using sheet specimens. *Mecánica Computacional*. Vol. XXI, pp. 854-873. October 2002. ISSN 2591-3522
- 2- Hoffman K. Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas. Editora Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. 1989.
- 3- Chagoyén C. et al. La vinculación de la simulación numérica y los ensayos, su aplicación a un puente de ferrocarril. *Revista Técnica de la Universidad de Zulia*. Vol. 36, No 2. pp 1-11. 2013. ISSN 0254-0770
- 4- Gere J. *Mechanics of Materials*. McGraw Hill. 7ma edición. 2013
- 5- Suárez F. et al. Análisis de la deformación de rotura en el ensayo de tracción en probetas cilíndricas de acero perlítico. XXVIII Encuentro de Mecánica de Fractura. Gijón, España. 2011
- 6- Landessman A., Moreira F., Miranda E. Experimental investigation of the mechanical properties of ZAR-345 cold formed steel at elevated temperatures. *Materials Research*. Vol 17 No 4. 2014. ISSN 1980-5373
- 7- Mendoza A. Estudio de las propiedades mecánicas del sistema óseo. *Revista Ingeniería e Investigación* No 41. Diciembre 1998. ISSN 2248-8723
- 8- ASM International #05106G. *Tensile Testing*. Second Edition. 2004
- 9- NC 04-03. *Probetas de sección circular con cabeza lisa*.
- 10- Colcha J., Villa M. Diseño e implementación de un sistema electrónico-informático para aplicaciones en ensayos en la máquina universal. Tesis de grado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. 2010
- 11- Ruiz J. Análisis de elementos mecánicos con concentradores de esfuerzos mediante extensometría eléctrica. Tesis de grado. Instituto Politécnico Nacional. Mexico. 2009
- 12- *Practical strain gage measurements*. Aglient Technologies. 1999
- 13- Douglas J. *Development of Laboratory Apparatus for Fundamental Damping Studies*. Tesis de Maestría. The Ohio State University. 2014
- 14- Espinosa M. *Diseño y construcción de una celda de carga*. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Nuevo León. 1995

- 15- Cano A. Estudio y simulación numérica de ensayos de tracción en aceros. Tesis de Grado. Université de Lorraine. Francia. 2013
- 16- Jose E., Anto T. Analisis of tensile Test of Mild Steel using Finite Element Method. International Journal of Innovations in Engineering Technology. Volume 5 Issue 4 August 2015. ISSN 2319-1058
- 17- Baltar J., Carvalho C. Simulation of uniaxial tensile test through of Finite Element Method. INOVAE, Vol. 5, No 2. pp 3-13. 2017. ISSN 2357-7797
- 18- Nirbhay M. et al. Tensile test simulation of CFRP test especimen using finite elements. International Conference on Advanced in Manufacturing and Materials Engineering, AMNE. 2014. ISSN 2211-8128
- 19- Matweb. <http://www.matweb.com/> Consultado: 6-02-2018
- 20- SAE Handbook. Society of Automotive Engineers. 2000. ISBN-10: 0768005973
- 21- Frias E. Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del MEF. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Cataluña. 2004
- 22- Vercher A. Mejora de los elementos de transición en XFEM aplicando Mecánica de la Fractura Elástica Lineal. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. 2010
- 23- Negrín L. Métodos numéricos en ingeniería. Editorial Feijoo. 2015. ISBN 978-859-312-142-2

Anexos

Anexo 1A: Promedio de las dos mediciones.

Código: PRO 09.16-3	Versión: 01	Página 5 de 7
---------------------	-------------	---------------

Anexo 1 A

	RESULTADOS QUIMICOS Y FISICOS	Código : REG 09.16-3-2
---	--------------------------------------	------------------------

Método: Fe-10-F 09/05/2018 10:56:08

Comentario: Aceros de baja y media a Element concentration

TALLER: UCLV Calidad: Registro #: 493

NOMBRE DEL MATERIAL: MUESTRA#: ACERO 1

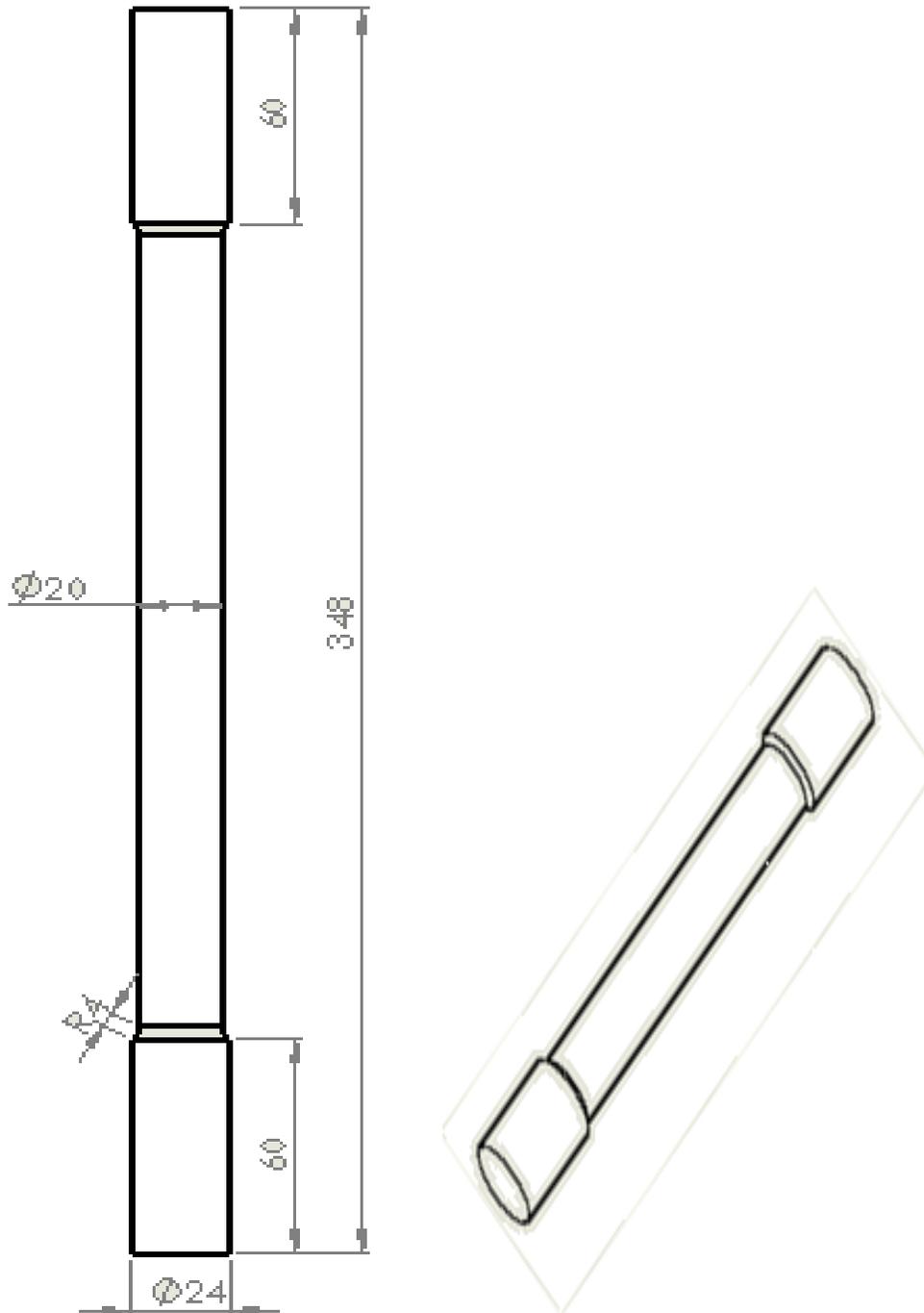
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
	%	%	%	%	%	%	%	%
<x> (2)	0.174	0.0096	0.423	0.0228	0.0401	0.164	0.0089	0.0890

	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W	Pb
	%	%	%	%	%	%	%	%
<x> (2)	0.0124	0.0087	0.135	< 0.0010	< 0.0010	0.0019	< 0.0100	< 0.0030

	Sn	As	Zr	Bi	Ca	Ce	Sb	Te
	%	%	%	%	%	%	%	%
<x> (2)	0.0059	0.0069	< 0.0015	0.0054	0.0024	< 0.0030	0.0046	0.0049

	B	Zn	La	Fe	Ceq			
	%	%	%	%	%			
<x> (2)	0.00071	< 0.0020	< 0.0010	98.9	0.295			

Anexo 2: Dimensiones de la probeta.



Anexo 3: Prefactura



FINE SPAVY ASSOCIATES AND ENGINEERS PVT. LTD.

Plot No. C-45/2, MIDC Area, **MIRAJ - 416 410**, Dist - Sangli (Maharashtra State - **INDIA**).

Tel. Nos : +91-233-2644832, 2644332, 2644532, 2644932.

Emails : export@finegrouptest.com / sales@finegrouptest.com ; Web : www.finegrouptest.com

Ref : FSA/EXP/2018

Date : 17/03/2018

To,

Universidad Central "Marta Abreu" De Las Villas
Facultad de Ingeniería Mecánica, Carretera a Camajuaní km 5,
Santa Clara, Villa Clara, Cuba

Tel. No. : +42281630

E-mail : linegrin@uclv.edu.cu

SUB:- Quotation for Mechanical Extensometer.

REF:- Your email dated 15/03/2018.

Dear Sir

As per above reference, we are giving here below our detailed lowest offer.

Sr. No	Description of item	Qty	Unit price in US\$
1.	Mechanical Extensometer, Model : FXT-3 as per standard supply and leaflet.	1 No	550/-

Terms & Conditions :

The above prices are C&F Suitable International Airport at Cuba basis (By Air). Packing -Air worthy.

Validity of offer - 60 days.

Delivery period – – 1 to 2 weeks from the date of receipt of technically and commercially clear order with 100% advance at our end.

Payment - 100% advance by Swift Transfer before dispatch of machine from our works.

Commissioning - If you want the machines to be commissioned by us then charges will be extra

Hope the above is clear to you and we now await for your valued order soon.

Thanking you

Yours faithfully

FOR FINE SPAVY ASSOCIATES & ENGINEERS PRIVATE LIMITED

M. YUNUS (Sales Manager)

Cell : +91-9850507360

