



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**TRABAJO ESTRUCTURADO DE MANERA  
INDEPENDIENTE**

**Previo a la obtención del Título de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**

---

*“ESTUDIO DE PANDEO BAJO LA NORMA ASTM E9-89a PARA  
ELABORAR LA GUÍA PRÁCTICA EN LOS LABORATORIOS DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD  
TÉCNICA DE AMBATO”*

---

**AUTOR: Egdo. Diego Javier Amancha Guangasi**

**TUTOR: Ing. Mauricio Carrillo**

**AMBATO – ECUADOR**

**2012**

## **CERTIFICACIÓN**

En mi calidad de Tutor de la presente Tesis de Grado, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico, bajo el tema “ESTUDIO DE PANDEO BAJO LA NORMA ASTM E9-89a PARA ELABORAR LA GUÍA PRÁCTICA EN LOS LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”, ejecutado por el Señor Diego Javier Amancha Guangasi, egresado de la Carrera de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, CERTIFICO que la presente tesis fue elaborada en su totalidad por el autor y ha sido concluido en forma total, en apego al plan de tesis aprobado.

.....

**Ing. Mauricio Carrillo**

**TUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

## **AUTORÍA**

El contenido del presente trabajo de investigación bajo el tema: “ESTUDIO DE PANDEO BAJO LA NORMA ASTM E9-89a PARA ELABORAR LA GUÍA PRÁCTICA EN LOS LABORATORIOS DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO”, así como sus opiniones e ideas, comentarios de resultados y análisis son de exclusiva responsabilidad del autor.

.....

**Egdo. Diego Javier Amancha Guangasi**

**C.I. 180379076-3**

## **DEDICATORIA**

*Dedico este trabajo de tesis a las personas que han estado conmigo incondicionalmente en los momentos más difíciles de mi vida y que han hecho de mí lo que hoy soy.*

*A MIS PADRES:*

*Manuel y María*

*A MIS HERMANOS:*

*Rigoberto, Sonia y Ligia.*

*Las personas que amo y por las que existo.*

## **AGRADECIMIENTO**

*Al Ing. Mauricio Carrillo por su incondicional apoyo en la elaboración de este trabajo de tesis. Por brindarme su amistad y confianza.*

*A mi padre, por su lucha, entrega, amor y dedicación en lograr el profesional que hoy, gracias a su apoyo soy. No lo defraudare padre.*

*A mi madre, por darme la vida y por ser el motor que me impulsa a seguir adelante y me da fortaleza para no dejarme vencer ante la adversidad, por muy difícil que ésta sea. Por su confianza en mí, mil gracias, usted es mi vida y la amo.*

*A mis hermanas Sonia y Ligia por apoyarme cuando más lo necesito, por compartir alegrías, sufrimientos, privaciones y por estar ahí cuando yo no estoy, muchas gracias.*

*A todos los profesores que contribuyeron en mi educación y formación siempre se los agradeceré.*

*A todos mis amigos que me han apoyado desde cerca y lejos hasta el final. Leo, Don Carlos, muchas gracias.*

*A todas las personas que me brindaron alientos de esperanza, por su apoyo, comprensión y cariño, no me resta más que decirles, GRACIAS.*

## **RESUMEN EJECUTIVO**

Este proyecto aborda el diseño y la construcción de un sistema mecánico para la realización de pruebas de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente, así como la implementación de un sistema electrónica dedicado al monitoreo del comportamiento de las probetas, cuando el esfuerzo de compresión aplicado en éstas provoca una falla por pandeo. Se tiene además comunicación serial RS-232 con la computadora, para permitir la visualización de la información en la pantalla.

Para seguir con el objetivo se procedió a adquirir la norma correspondiente al tema de estudio, Norma ASTM E9-89a; con la documentación obtenida se revisó los parámetros a seguir de acuerdo a los estándares que la norma exige, tales como el tipo de columnas a ensayar, métodos de cálculo, consideraciones de carga crítica y condiciones de empotramiento de los extremos, sistema extensiométrico para comprobación de la deformación y carga aplicada y el número adecuado de pruebas a realizarse por cada probeta seleccionada. Se considera además el tipo de equipo de compresión recomendado.

Se implementó galgas extensiométricas en el monitoreo del pandeo de columnas de sección circular de Acero AISI 1018, para la aplicación de carga de compresión en la máquina UTAPRESS, con la implementación del módulo de acondicionamiento extensiométrico GE-001UTA que funciona con el software PANDEO E9-11UTA.vi, diseñados bajo los parámetros que la Norma ASTM E9-89a exige, para la elaboración de la Guía Práctica de Laboratorio que se entrega a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>CAPÍTULO I. EL PROBLEMA</b>		<b>PÁGINAS</b>
1.1	Tema .....	14
1.2	Planteamiento del problema.....	14
1.2.1	Conceptualización.....	14
1.2.2	Análisis crítico .....	15
1.2.3	Prognosis.....	15
1.2.4	Formulación del problema .....	16
1.2.5	Preguntas directrices .....	16
1.2.6	Delimitación del objeto de estudio .....	17
1.2.6.1	Temporal.....	17
1.2.6.2	Espacial .....	17
1.2.6.3	De contenido .....	17
1.3	Justificación .....	17
1.4	Objetivo.....	18
1.4.1	General.....	18
1.4.2	Específico.....	18
 <b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>		
2.1	Antecedentes investigativos.....	19
2.2	Fundamentación teórica .....	23
2.2.1	Pandeo.....	23
2.2.1.1	Columnas largas con carga central .....	24
2.2.1.2	Propiedades de la sección transversal de una columna.....	26
2.2.1.3	Coeficiente de fijación de un extremo (C).....	26
2.2.1.4	Longitud efectiva (Le) .....	28
2.2.1.5	Relación de esbeltez.....	28
2.2.1.6	Relación de esbeltez de transición (Cc) .....	28
2.2.1.7	Análisis de columnas largas: fórmula de Euler.....	29
2.2.1.8	Factor de diseño y carga admisible.....	30

2.2.1.9	Análisis de columnas intermedias: fórmula de J.B. Johnson.....	31
2.2.1.10	Comparación de las columnas de Euler y de Johnson .....	31
2.2.2	Definición de norma .....	34
2.2.3	ASTM E9-89A (Traducida).....	35
2.2.3.1	Ámbito .....	35
2.2.3.2	Documentos de Referencia .....	36
2.2.3.3	Terminología.....	36
2.2.3.4	Resumen de Métodos de prueba .....	39
2.2.3.5	Significado y uso.....	39
2.2.3.6	Aparatos .....	40
2.2.3.7	Muestras de análisis .....	45
2.2.3.8	Procedimiento ASTM E9-89a.....	48
2.2.3.9	Cálculos.....	51
2.2.3.10	Informe de pruebas para la Norma ASTM E9-89a.....	52
2.2.3.11	Precisión y el sesgo .....	54
2.2.4	Sistemas de medición y control industrial .....	54
2.2.4.1	Galgas extensiométricas.....	55
2.2.4.2	Parámetros de selección de la galga extensiométrica .....	56
2.2.4.3	Adhesivos para galgas extensiométricas.....	61
2.2.4.4	Medición con galgas. Puente de Wheatstone.....	62
2.2.4.5	Selección de la galga extensiométrica .....	65
2.2.4.6	Principio básico de operación de la galga.....	66
2.2.4.7	Modelado mecánico de la galga.....	66
2.2.4.8	Factor de la galga .....	67
2.2.5	Instrumentación electrónica .....	68
2.2.5.1	Acondicionadores .....	69
2.2.5.2	Digitalización de senales. Microcontroladores .....	72
2.2.5.3	Comunicación .....	74
2.2.6	Introducción a LabView .....	77
2.2.6.1	Adquisición de datos.....	78
2.2.6.2	Conexión de hardware .....	79
2.2.6.3	Comunicación por el puerto serial con LabView, VISA .....	80

2.3	Fundamentación legal .....	82
2.4	Categorías fundamentales .....	82
2.5	Hipótesis .....	83
2.6	Señalamiento de variables.....	83
2.6.1	Variable independiente .....	83
2.6.2	Variable dependiente .....	83

### **CAPÍTULO III. METODOLOGÍA**

3.1	Modalidad básica de la investigación .....	84
3.2	Nivel y tipo de la investigación .....	84
3.2.1	Nivel.....	84
3.2.2	Tipo .....	85
3.3	Población y muestra .....	85
3.4	Operacionalización de variables .....	86
3.4.1	Variable Independiente. ....	86
3.4.2	Variable dependiente. ....	87
3.5	Plan de recolección de la información .....	88
3.6	Plan de procesamiento de la información .....	88

### **CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS**

4.1	Análisis de los resultados.....	90
4.1.1	Pruebas de compresión .....	90
4.1.1.1	Procedimiento .....	90
4.1.2	Acondicionamiento de extensómetro.....	94
4.2	Interpretación de resultados .....	103
4.3	Verificación de hipótesis.....	104

### **CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones .....	105
5.2	Recomendaciones.....	107

## CAPÍTULO VI. PROPUESTA

6.1	Datos informativos.....	109
6.2	Antecedentes de la propuesta.....	110
6.3	Justificación .....	111
6.4	Objetivos .....	111
6.4.1	Objetivo general.....	112
6.4.2	Objetivos específicos .....	112
6.5	Análisis de factibilidad .....	112
6.5.1	Tecnológico-Económico .....	112
6.5.2	Ambiental.....	113
6.6	Fundamentación.....	114
6.6.1	Pandeo E9-UTA.....	114
6.6.1.1	Descripción de funcionamiento .....	114
6.6.2	Especificaciones de la columna .....	119
6.6.3	Selección de la galga extensiométrica .....	122
6.6.4	Acondicionamiento del sensor con Cuarto de puente de Wheatstone ..	123
6.6.4.1	Acondicionamiento con sistema extensiométrico 435-692 .....	123
6.6.5	Acondicionamiento con amplificador operacional .....	131
6.6.6	Acondicionamiento de voltaje de salida, operacional LM 741.....	134
6.6.7	Adquisición de datos.....	136
6.6.8	Instrumentación virtual .....	137
6.6.9	Instrumentación virtual con LabView .....	137
6.6.9.1	Configuración del puerto serial, VISA Configure Serial Port.....	138
6.6.9.2	Configuración de lectura y escritura por el puerto serial.....	141
6.7	Metodología .....	142
6.7.1	Probetas.....	142
6.7.2	Máquina de compresión.....	147
6.7.2.1	Fuerza de compresión .....	147
6.7.2.2	Base inferior y placa de compresión.....	151
6.7.2.3	Tornillo de potencia .....	154
6.7.2.4	Ejes guías .....	158

6.8	Administración.....	159
6.8.1	Planeación.....	142
6.8.2	Organización.....	14759
6.8.3	Dirección.....	14259
6.8.4	Control.....	14760
6.8.5	Análisis económico.....	14260
6.9	Previsión de la evaluación.....	164
BIBLIOGRAFÍA.....		166
ANEXOS.....		168

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b>	Síntesis histórica, estudios en pandeo de columnas.....	19
<b>Tabla 2.2.</b>	Formulaciones basadas en teorías y su rango de aplicación.....	22
<b>Tabla 2.3</b>	Factor de fijación de los extremos de una columna.....	27
<b>Tabla 2.4.</b>	Plantillas representativas de compresión y dimensiones de las muestras para los ensayos de lámina delgada.....	45
<b>Tabla 2.5.</b>	Especímenes sugeridos para sólidos cilíndricos.....	46
<b>Tabla 2.6.</b>	Ejemplo de valores de factores de galga y sensibilidad transversal....	57
<b>Tabla 2.7.</b>	Sensibilidad a la tensión de varias aleaciones.....	58
<b>Tabla 2.8.</b>	Rango típico de temperatura para varias combinaciones de rejilla y de base.....	61

<b>Tabla 2.9.</b> Descripción de pines de conector DB9.....	77
<b>Tabla 4.1.</b> Fuerza de compresión aplicada, probetas ASTM, según tabla 4.5.....	92
<b>Tabla 4.2.</b> Fuerza de compresión aplicada, probeta UTA-01.....	93
<b>Tabla 4.3.</b> Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 01.....	96
<b>Tabla 4.4.</b> Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 02.....	97
<b>Tabla 4.5.</b> Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 03.....	98
<b>Tabla 4.6.</b> Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 04.....	99
<b>Tabla 4.7.</b> Voltaje emitido por la galga de aluminio, prueba 05.....	100
<b>Tabla 6.1.</b> Voltajes medidos, sistema extensiométrico RS AMIDATA.....	128
<b>Tabla 6.2.</b> Resistencias requeridas, $V_i = 3,5V$ y $V_f = 3,44V$ .....	129
<b>Tabla 6.3.</b> Resistencias requeridas, $V_i = 3V$ y $V_f = 2,96$ .....	129
<b>Tabla 6.4.</b> Resistencias requeridas, $V_i = 2,5V$ y $V_f = 2,483V$ .....	130
<b>Tabla 6.5.</b> Resistencias requeridas, $V_i = 2V$ , $V_f = 1,987V$ .....	130
<b>Tabla 6.6.</b> Resistencias requeridas, $V_i = 1,5V$ y $V_f = 1,489V$ .....	131
<b>Tabla 6.7.</b> Voltaje de salida, amplificador de instrumentación AD 620.....	132
<b>Tabla 6.8.</b> Requerimientos del amplificador operacional LM 741.....	134

<b>Tabla 6.9.</b> Voltaje de salida, amplificador operacional LM 741.....	134
<b>Tabla 6.10.</b> Pruebas de compresión UTA-01.....	144
<b>Tabla 6.11.</b> Determinación de columnas cortas y largas.....	148
<b>Tabla 6.12.</b> Determinación de esfuerzo de compresión, para $C=3,75$ .....	149
<b>Tabla 6.13.</b> Descripción de pesos de partes de la máquina UTA PRESS.....	150
<b>Tabla 6.14.</b> Costos de probetas de acero AISI 1018.....	160
<b>Tabla 6.15.</b> Costos de partes de la máquina para ensayos de compresión.....	161
<b>Tabla 6.16.</b> Costos de fabricación del sistema de acondicionamiento y adquisición de datos.....	161
<b>Tabla 6.17.</b> Costos de procesos de construcción de la máquina de compresión UTA PRESS.....	162
<b>Tabla 6.18.</b> Costos adicionales del estudio.....	163

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b> Etapas del pandeo de una columna, sin carga, aplicando la carga, y falla de la columna.....	23
<b>Figura 2.2.</b> a) Ambos extremos están articulados; b) ambos extremos están empotrados; c) un extremo libre, un extremo empotrado; d) un extremo articulado, y un extremo empotrado.....	24
<b>Figura 2.3.</b> Curvas para la fórmula de J.B. Johnson.....	32
<b>Figura 2.4.</b> Curvas Euler-Johnson.....	32

<b>Figura 2.5.</b> Diagramas que muestran las condiciones de inmovilidad y la consiguiente deformación de pandeo.....	38
<b>Figura 2.6.</b> Ilustración de compresión.....	39
<b>Figura 2.7.</b> Bloque de cojinete ajustable para prueba de compresión.....	42
<b>Figura 2.8.</b> Bloque de apoyo esférico asentado.....	42
<b>Figura 2.9.</b> Ejemplo de aparato de prueba de compresión.....	44
<b>Figura 2.10.</b> Diagrama esfuerzo-deformación para la determinación de la Fuerza de producción por el método de compensación.....	52
<b>Figura 2.11.</b> Técnica de extensimetría.....	55
<b>Figura 2.12.</b> Galgas extensiométricas para usos específicos.....	56
<b>Figura 2.13.</b> Diagrama de bloques del sensor de tensión.....	56
<b>Figura 2.14.</b> Longitud de la galga.....	59
<b>Figura 2.15.</b> Ejemplos de galgas tipo roseta.....	59
<b>Figura 2.16.</b> Puente de Wheatstone.....	62
<b>Figura 2.17.</b> Configuración de cuarto de puente de Wheatstone.....	63
<b>Figura 2.18.</b> Configuración de medio de puente de Wheatstone.....	64
<b>Figura 2.19.</b> Configuración de puente completo de Wheatstone.....	65

<b>Figura 2.20.</b> Designación estándar para las galgas extensiométricas de la firma Vishay y RS AMIDATA.....	65
<b>Figura 2.21.</b> Ley de Hooke.....	66
<b>Figura 2.22.</b> Diagrama de conexión del amplificador AD620.....	70
<b>Figura 2.23.</b> Diagrama de retorno de tierra para las corrientes de polarización con entradas de termopar.....	71
<b>Figura 2.24.</b> Esquema básico de un seguidor.....	72
<b>Figura 2.25.</b> Amplificador diferencial básico.....	72
<b>Figura 2.26.</b> Presentación del PIC 16F628A y su diagrama de pines.....	73
<b>Figura 2.27.</b> Tabla de pines PIC 16F876A con sus funciones especiales.....	73
<b>Figura 2.28.</b> Comunicación serie asíncrona.....	74
<b>Figura 2.29.</b> Transmisión de dato binario.....	75
<b>Figura 2.30.</b> Diagrama de conexión PC-microcontrolador con el MAX232.....	76
<b>Figura 2.31.</b> Conector DB9, numeración de pines macho y hembra.....	76
<b>Figura 2.32.</b> Opciones de adquisición de datos en LabView.....	78
<b>Figura 2.33.</b> Interfaz para adquisición de datos DAQ.....	78
<b>Figura 2.34.</b> Hardware requerido para adquisición de datos.....	80

<b>Figura 2.35.</b> Ubicación para configuración de puerto serial en LabView.....	81
<b>Figura 2.36.</b> Función VISA, ejemplo de configuración de puerto serial.....	81
<b>Figura 4.1.</b> Probetas ASTM E9-89a, largas.....	92
<b>Figura 4.2.</b> Equipo SOIL TEST CT-769E.....	92
<b>Figura 4.3.</b> Pruebas de compresión, probetas de acero AISI 1018.....	92
<b>Figura 4.4.</b> Pruebas experimentales con galgas extensiométricas.....	94
<b>Figura 4.5.</b> Preparación de galga extensiométrica.....	95
<b>Figura 4.6.</b> Pegado de la galga en la probeta de acero AISI 1018 y ejecución de pruebas de compresión.....	95
<b>Figura 4.7.</b> Curvas de voltaje, Tabla 4.3.....	101
<b>Figura 4.8.</b> Curvas de voltaje, Tabla 4.4.....	101
<b>Figura 4.9.</b> Curvas de voltaje, Tabla 4.5.....	102
<b>Figura 4.10.</b> Curvas de voltaje, Tabla 4.6.....	102
<b>Figura 4.11.</b> Curvas de voltaje, Tabla 4.7.....	103
<b>Figura 6.1.</b> Modelo de diagrama a bloques para mediciones de tensión con galgas extensiométricas. ....	110
<b>Figura 6.2.</b> Logo RS AMIDATA y símbolo de empaques reciclables.....	113

<b>Figura 6.3.</b> Panel frontal del software PANDEO E9-11UTA.vi.....	115
<b>Figura 6.4.</b> Desarrollo del ensayo con PROBETAS ASTM.....	116
<b>Figura 6.5.</b> Opción para visualización de curvas.....	117
<b>Figura 6.6.</b> Verificación de columnas, probetas UTA.....	117
<b>Figura 6.7.</b> Programación interna de PANDEO.vi. (Fragmento).....	118
<b>Figura 6.8.</b> Visualización de RESULTADOS.....	118
<b>Figura 6.9.</b> Visualización de datos del sensor extensiométrico.....	119
<b>Figura 6.10.</b> Curva de datos recibidos por el módulo de acondicionamiento....	119
<b>Figura 6.11.</b> Probetas ASTM.....	120
<b>Figura 6.12.</b> Prueba de compresión.....	120
<b>Figura 6.13.</b> Prueba con probetas de dimensionamiento del UTA-O1 .....	121
<b>Figura 6.14.</b> Dimensiones de la columnas de prueba, pulgadas.....	121
<b>Figura 6.15.</b> Galgas RS N11-FA-8-120 (23 y 11).....	122
<b>Figura 6.16.</b> Acondicionamiento de cuarto de puente.....	123
<b>Figura 6.17.</b> Circuito básico para el tablero de circuito impreso RS stock no. 435-692 (ganancia de aprox. 1000).....	124
<b>Figura 6.18.</b> Circuito para indicadores de semiconductores y transductores.....	124

<b>Figura 6.19.</b> Circuito armado en una Protoboard.....	125
<b>Figura 6.20.</b> Circuito armado en baquelita perforada y baquelita impresa.....	125
<b>Figura 6.21.</b> Pruebas de laboratorio, protoboard.....	126
<b>Figura 6.22.</b> Elementos y herramientas para ensamble de sistemas extensiométricos.....	127
<b>Figura 6.23.</b> Circuito de monitor de presión que opera sobre una fuente de +5 V único. <i>ANEXO A6</i> .....	133
<b>Figura 6.24.</b> Curvas de voltaje, amplificador de instrumentación AD 620.....	133
<b>Figura 6.25.</b> Curvas de voltaje, amplificador operacional LM 741.....	135
<b>Figura 6.26.</b> Diagrama de conexión del PIC y del CI. MAX232 para enviar y recibir datos entre el PIC y un PC.....	136
<b>Figura 6.27.</b> Diagrama de conexión de un LCD al PIC.....	137
<b>Figura 6.28.</b> Inicializar sesión VISA.....	138
<b>Figura 6.29.</b> Dirección del puerto serial.....	139
<b>Figura 6.30.</b> Configuración de transmisión por el puerto serial con el adaptador USB.....	140
<b>Figura 6.31.</b> Instalación del adaptador USB-Serial TRENDnet.....	140
<b>Figura 6.32.</b> Configuración VISA WRITE-READ, escritura-lectura.....	141

<b>Figura 6.33.</b> Lectura de datos en formato ASCII y decimal.....	142
<b>Figura 6.34.</b> Prueba de compresión, Máquina UTA PRESS.....	143
<b>Figura 6.35.</b> Visualización de datos. Izquierda, UTA PRESS; derecha SOIL TEST CT-769E.....	146
<b>Figura 6.36.</b> Comprobación de resultados en TORNILLOS DE POTENCIA.vi.....	156
<b>Figura 6.37.</b> Requerimientos para $F=10000lb$ en TORNILLOS DE POTENCIA.vi.....	157
<b>Figura 6.38.</b> Comprobación del diseño del eje guía.....	158

## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA**

#### **1.1 TEMA**

Estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a para elaborar la guía práctica en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

##### **1.2.1 Conceptualización**

Muchos son los estudios realizados referente al pandeo de columnas de acero, ha tenido tal atención a nivel mundial debido a la importancia dentro del desarrollo industrial por su amplio campo de aplicación, citando como ejemplos: estructuras de refinerías de petróleo, edificios, puentes, etc.; llegándose a establecer así una norma específica para sus respectivos estudios, regulada por la ASTM (American Society of Testing Materials), sin embargo pocos son los proyectos de investigación realizados a nivel de los centros de educación superior del Ecuador, y por supuesto la raíz de esta situación no ha sido la falta de conocimiento ni capacidad, más bien el gasto económico que representa la realización de un estudio o investigación dentro de nuestro medio.

Si bien, esta es una generalización bastante superficial, la ingeniería no se basa solo en la ejecución de proyectos, sino también, del desarrollo de investigaciones que conlleven al entendimiento pleno de una determinada particularidad, situación que ha sido polémica a nivel nacional en cuanto a la calificación de la educación universitaria; por lo cual se desarrolla el estudio de pandeo, que si bien es un tema

bastante amplio debido al sinnúmero de materiales, técnicas y procesos existentes, el presente trabajo se rige a la norma ASTM E9-89a.

Estableciendo entonces esta norma como el eje de este estudio propuesto, y superando el apoyo y financiamiento para su desarrollo, es nuestro objetivo y el de la Universidad Técnica de Ambato fomentar el desarrollo de la investigación en los laboratorios cuya infraestructura es parte de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, llegando así a establecer una guía práctica aplicable dentro de la Carrera de Ingeniería Mecánica.

### **1.2.2 Análisis crítico**

Debido al poco desarrollo de proyectos de investigación dentro de las instituciones educativas de tercer nivel en Ecuador, la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato ha previsto establecer estudios de investigación dentro de sus laboratorios, por lo cual se implementará el estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a. Siendo esta una oportunidad más para formar profesionales altamente competitivos y demostrar el nivel académico de una Universidad catalogada de Tipo A.

### **1.2.3 Prognosis**

Obviar temas de carácter investigativo es negar la posibilidad de desarrollar nuestro propio modo de vida, de modelar nuestros futuros, siendo independientes de la forma de crear y de imaginar la solución a diversos problemas que el diario vivir nos plantea.

Por tanto, la realización de un estudio de un determinado fenómeno, el de pandeo en este caso, y bajo una estandarización internacional como lo es la norma ASTM E9-89a proporciona a la Facultad de Ingeniería Civil Mecánica la posibilidad de aprovechar sus recursos, tanto en lo referente a equipos e infraestructura, destinándolos al desarrollo de la investigación, que posibilita un mayor desempeño académico, tanto de docentes y estudiantes. Consecuentemente, la no

realización de este estudio implicará el seguir desarrollando la ingeniería desde un solo punto de vista, el teórico; siendo los principales perjudicados los estudiantes de la carrera, que en cuanto a resistencia de materiales, diseño de elementos mecánicos, por nombrar un par de cátedras, seguirá desarrollándose en base a libros y a su particular manera de describir el pandeo, y no desde la perspectiva que este trabajo de tesis proyecta, de realizar el estudio de manera experimental, rigiéndose a una estandarización reconocida y aplicada a nivel mundial; desarrollada y evaluada dentro de una guía práctica propia de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

#### **1.2.4 Formulación del problema**

¿El estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a servirá para elaborar la guía práctica en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato?

#### **1.2.5 Preguntas directrices**

¿El material y la geometría de la probeta inciden en el estudio de pandeo?

¿Cuáles son las condiciones de material, geometría y procedimientos de ensayo para la aplicación de la Norma ASTM E9-89a?

¿Cuáles son los equipos y máquinas requeridas para el estudio de pandeo dentro la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato?

¿Se puede implementar una guía práctica para estudios de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a dentro la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato?

## **1.2.6 Delimitación del objeto de estudio**

### **1.2.6.1 Temporal**

El presente proyecto se realizará a partir del mes de marzo de 2010 hasta el mes de noviembre del 2011.

### **1.2.6.2 Espacial**

Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

### **1.2.6.3 De contenido**

Este proyecto de acuerdo a su complejidad está dentro de los campos de diseño mecánico, estructuras metálicas, resistencia de materiales, elementos finitos, sistemas de medición y control industrial.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

La investigación se origina pensando principalmente en los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, a los cuales se les dará la oportunidad de conocer la forma de aplicación de una norma, de desarrollar una práctica bajo los parámetros que esto implica, y el de experimentar de manera directa la forma, efectos, tiempo, y consecuencias del pandeo de determinado material ensayado en laboratorios equipados para este tipo de estudios. No se ha excluido a los docentes de la facultad, que tendrán mayores posibilidades de demostrar sus capacidades y conocimientos, de comparar resultados teóricos, con datos de experimentos de diversas pruebas, según la necesidad o requerimiento de cada cátedra y nivel.

Sin duda, la Universidad Técnica de Ambato, se beneficia en forma amplia y directa por incrementar la calidad de educación que ofrece a la comunidad, a los estudiantes de los diversos colegios del país, a los que se les podrá ofrecer estudios teórico-prácticos, aplicados bajo normas internacionales y asistidas

además por hardware y software desarrollados dentro de los campus de la universidad.

Cabe además resaltar la originalidad del presente trabajo, que pocas veces son desarrollados en bien de la universidad, de sus estudiantes y docentes, estableciendo una guía práctica aplicada y regulada por los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica; sin obviar la aplicación de tecnología de última generación adquirida para este trabajo de tesis.

## **1.4 OBJETIVO**

### **1.4.1 General**

Estudiar el pandeo bajo la norma ASTM E9-89a y su incidencia en la factibilidad de la realización de la guía práctica en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

### **1.4.2 Específico**

- Describir el tipo de probeta que se requiere para el estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89A.
- Establecer el material que la norma exige para el ensayo de pandeo.
- Determinar las condiciones del equipo requerido para el estudio.
- Proponer una solución para desarrollar el estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a para la implementación de una guía práctica en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

“El problema del pandeo fue resuelto por Euler en el siglo XVIII no en respuesta a problemas técnicos sino simplemente desarrollando ejemplos de ecuaciones diferenciales.”<sup>1</sup>

Euler (1744) fue el primero en estudiar el fenómeno del pandeo encontrando la carga crítica de una barra homogénea sometida a compresión. A partir de ese momento diversos autores han realizado estudios teóricos y experimentales en relación a este fenómeno. La Tabla 2.1 resume diversos trabajos en relación al pandeo de columnas.

**Tabla 2.1.** Síntesis histórica, estudios en pandeo de columnas.

Año	Autor	Publicación	Síntesis de resultados
1744	EULER (1707-1783)	“Methodus inveniendi líneas curvas maximimini proprietate gaudentes...,” ApéndiceI,”Decurvis elasticis,” Bousquet, Lausanay Ginebra, 1744.	Estudios pioneros en pandeo para determinar la carga crítica de columnas ideales.
1845	A.H.E Lamarle (1806-1875)	“Mémoire sur la flexion du bois,” <i>Annales des Travaux Publiques de Belgique</i> , parte 1, vol. 3, 1845, págs. 1-36.	Señala que la fórmula de Euler se debe usar para relaciones de esbeltez mayores a cierto límite, y que debe experimentarse para columnas con relaciones menores a este valor.

<sup>1</sup> Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Flexión compuesta y pandeo en barras rectas. RICARDO AROCA HERNÁNDEZ-ROS

Año	Autor	Publicación	Síntesis de resultados
1889	A.G. Considère (1841-1914)	“Resístanse des pièces comprimés,” <i>Congrè sinternational des Procédés de Construction</i> , Paris. Septiembre 9-14, 1889.	Primeros ensayos en columnas. Las tensiones sobre el lado cóncavo de la columna se incrementan con $E_t$ y las tensiones sobre el lado convexo disminuyen con $E$ . Mostró la no aplicabilidad de Euler al pandeo inelástico y estableció que el módulo reducido tenía un valor entre $E$ y $E_t$ .
1889	F. Engesser (1848-1931)	“Ueber die Knickfestigkeit Gerader Stäbe,” <i>Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen</i> , vol. 35, No.4, 1889, págs. 455-462.	Sugiere la teoría del módulo de elasticidad tangente. Denota el módulo tangente como $T = d\sigma/d\epsilon$ y propone usar $T$ en lugar de $E$ en la ecuación de Euler para carga crítica. La teoría de módulo tangente se considera también teorema de Engesser.
1895		“Knickfragen,” <i>Schweizerische Bauzeitung</i> , vol. 25, No. 13, Marzo 30/1895, págs., 88-90.	
1895	F.S. Jasinsky (1856-1899)	“Nochein Wort zu den ‘Knickfragen,’ ” <i>Schweizerische Bauzeitung</i> , vol. 25, No. 25, 22 junio/1895, págs. 172-175.	Señala que la teoría de Engesser era incorrecta; hace notar el trabajo de Considère y presenta la teoría del módulo reducido. Establece que el módulo reducido no podía calcularse a nivel teórico.
1895	F. Engesser	“Ueber Knickfragen,” <i>Schweizerische Bauzeitung</i> , vol. 26, No. 4, Julio 27, 1895, págs. 24-26.	Reconoce el error en teoría del módulo tangente y mostró cómo calcular el módulo reducido para cualquier sección transversal. Teoría del módulo reducido se conoce también como teoría de Considère-Engesser.

Año	Autor	Publicación	Síntesis de resultados
1908	Theodore von Kármán (1881-1963)	“Ueber Knickfragen,” <i>Schweizerische Bauzeitung</i> , vol. 26, No. 4, Julio 27, 1895, págs. 24-26.	Presenta teoría del módulo reducido (independiente de los demás). Obtiene las fórmulas para $E_r$ de secciones rectangulares e idealizadas doble T (sin alma). Involucra efectos de excentricidades de la carga de pandeo y muestra que la carga máxima disminuye con rapidez con el aumento de la excentricidad.
1910		“Untersuchungen über Knickfestigkeit,” <i>Mitteilungen über Forschungsarbeiten auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Verein Deutscher Ingenieure</i> , Berlin, Heft 81, 1910.	
1956		<i>Collected Works of Theodore Von Kármán</i> , vols. I-IV, Butterworths Scientific Publications, Londres, 1956.	
1946	Shanley (1904-1968)	“The column paradox,” <i>Journal of the Aeronautical Sciences</i> , vol. 13, No. 12, diciembre 1946, pág 678.	Señala paradojas lógicas en teoría de módulo tangente y módulo reducido y propone una teoría para resolverlas.
		“Inelastic column theory,” <i>ibid.</i> , vol. 14 No. 5, mayo de 1947, págs. 261-267.	Presenta análisis adicionales y resultados en pruebas de columnas que apoyan su teoría.

**Fuente.** Cuadernos del Instituto Juan de Herrera de la Escuela de Arquitectura de Madrid. Flexión compuesta y pandeo en barras rectas. RICARDO AROCA HERNÁNDEZ-ROS.

Si bien los conceptos teóricos son importantes para entender el comportamiento de las columnas, el diseño práctico de columnas debe tomar en cuenta factores no considerados en la teoría; por ejemplo, las columnas de acero siempre contienen tensiones residuales producidas por sus procesos de fabricación. Estas tensiones varían considerablemente en diferentes partes de la sección transversal, de manera que el nivel de tensión requerido para producir la fluencia varía sobre toda la sección transversal. Ya en 1920 se tenían más de 400 referencias de estudio de

pandeo entre teórico y experimental. Diversos autores han desarrollado a partir de esa fecha, una serie de planteamientos con base en pruebas experimentales.

**Tabla 2.2.** Formulaciones basadas en teorías y su rango de aplicación.<sup>2</sup>

Autor	Expresiones para tensión crítica	Rango de aplicación
EULER	$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_e}{r_g}\right)^2} \quad \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{pl}}}$	Elástico - lineal $\frac{L_e}{r_g} > \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c$
Secante (Timoshenko [1])	$\sigma_{pl} = \sigma_Y = \frac{P}{A} \left[ 1 + \frac{e \cdot c}{r_g^2} \sec \left( \frac{l}{2r_g} \sqrt{\frac{P}{EA}} \right) \right]$	Elástico e inelástico
Walker [7] (con deformación inicial)	$\sigma_{cr} = 0.5 [\sigma_Y + (1 + \eta) \sigma_E] - \sqrt{0.25 [\sigma_Y + (1 + \eta) \sigma_E]^2 - \sigma_Y \sigma_E}$ $\eta = \frac{b_1 c}{r_g^2}, \quad b_1: \text{deflexión inicial}$	Elástico e inelástico
Walker [7] (con carga excéntrica)	$\sigma_{cr} = \frac{1}{1 - \left(\frac{\pi^2}{8} - 1\right) \xi} \left\{ \frac{0.5 [\sigma_Y + (1 + \xi) \sigma_E]}{-\sqrt{0.25 [\sigma_Y + (1 + \xi) \sigma_E]^2 - \sigma_Y \sigma_E}} \right\}$ $\xi = \frac{ec}{r_g^2}, \quad e: \text{excentricidad de carga}$	Elástico e inelástico
Módulo tangente [1]	$\sigma_{cr} = \sigma_t = \frac{\pi^2 E_t}{\left(\frac{L_e}{r_g}\right)^2} \quad E_t < E \quad \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{pl}}}$	No lineal $\frac{L_e}{r_g} < \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c$
Módulo reducido [1]	$\sigma_{cr} = \sigma_r \frac{\pi^2 E_r}{\left(\frac{L_e}{r_g}\right)^2} \quad E_t < E_r < E \quad \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_{pl}}}$	No lineal $\frac{L_e}{r_g} < \left(\frac{L_e}{r_g}\right)_c$

**Fuente.** Laboratori de Sistemes Oleohidràulics y Pneumàtics LABSON  
UPC(1998)

De todos los estudios realizados a nivel mundial ya mencionados no ha existido mayor interés por encontrar nuevas teorías en relación al pandeo de columnas, sino más bien se han tecnificado sus procedimientos de verificación de las teorías existentes con la ayuda de hardware y software desarrollados para este fin, con el firme propósito de mejorar tiempos, costos, y minimización del rango de error en cada cálculo requerido debido a la aparición de nuevos materiales en la

<sup>2</sup>Laboratori de Sistemes Oleohidràulics y Pneumàtics LABSON – UPC(1998)

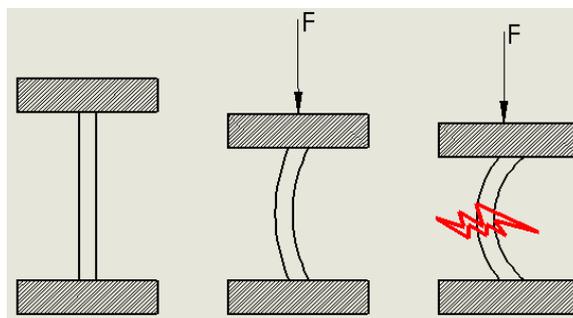
construcción de diversas estructuras, en las cuales pudiese presentarse el pandeo de un miembro estructural.

A nivel nacional los estudios desarrollados han sido mínimos, y de estos casi su totalidad se encuentran dentro del campo de la Ingeniería Civil, como es el caso del Estudio de las especificaciones codificadas del pandeo como propuesta de modificación de los códigos de Diseño de Estructuras de hormigón armado desarrollada en la Escuela Politécnica del Ejército ESPE por el M.Sc. Marcelo Romo Proaño, siendo este el más actual y relevante estudio realizado sobre el pandeo de columnas.

## 2.2 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.2.1 Pandeo

Se considera de manera específica el pandeo de columnas, siendo estos miembros largos y esbeltos, que soportan una carga axial de compresión. De ahí que mientras más esbelto sea un miembro a compresión, puede fallar por flexión o de flexionarse en forma lateral, en vez de por compresión directa del material. Un claro ejemplo se puede evidenciar al comprimir una regla plástica o algún otro objeto esbelto. Al existir flexión lateral se dice que la columna se ha pandeado. Si existiese una carga axial creciente, las deflexiones laterales también aumentan y la columna termina por fallar completamente.



**Figura 2.1.** Etapas del pandeo de una columna, sin carga, aplicando la carga, y falla de la columna.

**Fuente.** Diego Amancha.

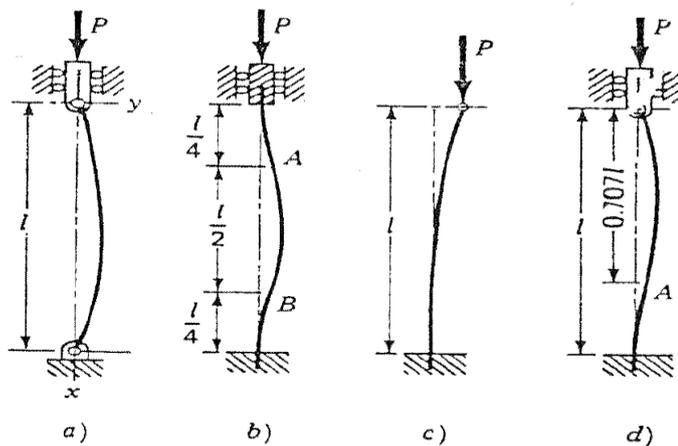
Sin embargo el fenómeno de pandeo no se limita a columnas, puede presentarse en muchos y variados tipos de estructuras. Si colocásemos un gran peso sobre una lata de aluminio, las paredes cilíndricas delgadas se pandean y la lata se colapsa. Ahora, si este caso fuese el de una columna de un edificio, el perjuicio no solo es del tipo material, sino que se traducen en pérdida de vidas humanas.

El pandeo es una de las principales causas de falla en estructuras, por lo que siempre debe considerarse en el diseño la posibilidad de que ocurra.

### 2.2.1.1 Columnas largas con carga central<sup>3</sup>

La relación entre carga crítica y el material de una columna se describen en la figura 2.2a. Sea una barra de longitud  $l$  cargada con una fuerza  $P$  que actúa a lo largo del eje centroidal en extremos redondeados o articulados. En la figura, la barra curva en la dirección  $y$  positiva. Lo anterior requiere un momento negativo, de aquí:

$$M = -Py \quad (2.1)$$



**Figura 2.2.** a) Ambos extremos están articulados; b) ambos extremos están empotrados; c) un extremo libre, un extremo empotrado; d) un extremo articulado, y un extremo empotrado.

**Fuente.** Diseño en Ingeniería Mecánica de Joseph E. Shigley, sexta edición.

<sup>3</sup> SHIGLEY, Mischke, (1985). Diseño en Ingeniería Mecánica, Tercera edición en español, México D.F.

Si la barra se curvara en la dirección  $y$  negativa, habría un momento positivo, y por tanto  $M = -Py$ , como en el caso anterior. Se describe:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{P}{EI}y; \quad \text{o bien} \quad \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{P}{EI}y = 0 \quad (2.2)$$

Esto se parece a la ecuación diferencial bien definida para el movimiento armónico simple. La solución es:

$$y = A \operatorname{sen} \sqrt{\frac{P}{EI}}x + B \operatorname{cos} \sqrt{\frac{P}{EI}}x \quad (2.3)$$

Donde  $A$  y  $B$  son constantes de integración y se determinan mediante las condiciones de frontera del problema. Se evalúan utilizando las condiciones  $y=0$  en  $x=0$  y en  $x=l$ . Esto da  $B=0$ , y:

$$0 = A \operatorname{sen} \sqrt{\frac{P}{EI}}l \quad (2.4)$$

La solución trivial sin alabeo ocurre con  $A=0$ . Sin embargo, si  $A \neq 0$ , entonces:

$$\operatorname{sen} \sqrt{\frac{P}{EI}}l = 0 \quad (2.5)$$

La ecuación 2.5 se satisface por  $\sqrt{P/EI}l = n\pi$ , donde  $n=1,2,3\dots$ . Resolviendo para  $P$  cuando  $n=1$  da la primera carga crítica:

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (2.6)$$

La cual se conoce como *fórmula de Euler para columnas*; y sólo se aplica a columnas de extremo redondo. Si se sustituye estos resultados en la ecuación 2.3, se obtiene la ecuación de la curva de deflexión:

$$y = A \operatorname{sen} \frac{\pi x}{l} \quad (2.7)$$

Indicando que la curva de deflexión es un seno de media onda. Sólo interesa la carga crítica mínima, que ocurre con  $n=1$ .

#### 2.2.1.2 Propiedades de la sección transversal de una columna<sup>4</sup>

La tendencia de una columna a pandearse depende de la forma y las dimensiones de su sección transversal y también de su longitud y la forma de fijarla a miembros o apoyos adyacentes. Las propiedades importantes de la sección transversal son:

1. El área de la sección transversal  $A$ , dependiendo de la geometría de la columna. (*Anexo A.1*)
2. El momento de inercia  $I$  de la sección transversal, con respecto al eje para que  $I$  es mínimo. (*Anexo A.1*)
3. El valor mínimo de radio de giro  $r$ , calculado con la ecuación 2.8.

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2.8)$$

#### 2.2.1.3 Coeficiente de fijación de un extremo (C)<sup>5</sup>

La aparición de deflexión por pandeo limita severamente la resistencia en compresión de un pilar o cualquier tipo de pieza esbelta. Eventualmente, a partir

---

<sup>4</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

<sup>5</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

de cierto valor de la carga axial de compresión, denominada carga crítica de pandeo, puede producirse una situación de inestabilidad elástica y entonces fácilmente la deformación aumentará produciendo tensiones adicionales que superarán la tensión de rotura, provocando la ruina del elemento estructural.

**Tabla 2.3** Factor de fijación de los extremos de una columna. Autores varios.

VALORES DE C	Ambos estremos articulados(a)	Un extremo fijo y el otro articulado(b)	Ambos extremos fijos(c)	Un extremo fijo y el otro libre(d)
TEÓRICOS Robert Mott,	1	0.7	0.5	2
PRÁCTICOS Robert Mott	1	0.8	0.65	2.1
TEÓRICOS Robert Mott	1	0.699	0.5	2
TEÓRICOS Joseph Shigley	1	2	2	0.25
CONSERVADOR Joseph Shigley	1	1	1	0.25
RECOMENDADO Joseph Shigley	1	1.2	1.2	0.25
Coefficiente de fijeza ASTM E9-89a.	1	2	3.75	No aplica

**Autor.** Diego Amancha. (Recopilación de varios autores)

Los primeros valores que se asignan a C son teóricos y se basan en la forma de la columna pandeada. Los segundos valores tienen en cuenta la fijación esperada de los extremos de las columnas en casos reales y estructuras prácticas, el tercer valor corresponde a valores considerados recomendados en función de recomendaciones desde el punto de vista del diseño mecánico.

#### 2.2.1.4 Longitud efectiva ( $L_e$ )<sup>6</sup>

Para determinar el factor de longitud efectiva de una sección deben considerarse los elementos que se conectan al primero en ambos extremos. La forma de soportar ambos extremos de la columna afecta la longitud efectiva de la columna, que se define como sigue;

$$L_e = C * L \quad (2.9)$$

Donde  $L$  = longitud real de la columna entre los soportes.

$C$  = coeficiente de fijación de un extremo.

#### 2.2.1.5 Relación de esbeltez<sup>7</sup>

La relación de esbeltez es el cociente de la longitud de la columna entre su radio de giro mínimo. Esto es:

$$\text{Relación de esbeltez} = \frac{L}{r_{min}} \quad (2.10)$$

Se empleará la relación de esbeltez para ayudar a seleccionar el método de análisis de columnas rectas y con carga central.

#### 2.2.1.6 Relación de esbeltez de transición ( $C_c$ )<sup>8</sup>

Se debe considerar dos métodos para analizar columnas rectas con carga central: 1) la fórmula de Euler para columnas largas y esbeltas y 2) la fórmula de J. B. Johnson para columnas intermedias. La elección del método apropiado depende del valor de la relación de esbeltez real de la columna que se analiza, comparado

---

<sup>6</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

<sup>7</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

<sup>8</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

con la relación de esbeltez de transición o constante de columna,  $C_c$ , que se define como sigue:

$$C_c = \sqrt{\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot E}{S_y}} \quad (2.11)$$

Donde:  $E$  = Módulo de elasticidad de la columna

$S_y$  = Resistencia de fluencia del material

### 2.2.1.7 Análisis de columnas largas: fórmula de Euler<sup>9</sup>

En el análisis de una columna larga se emplea la fórmula de Euler:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{(C \cdot L/r)^2} \quad (2.12)$$

Con la ecuación se calcula la carga crítica  $P_{cr}$  donde la columna empezaría a pandearse. Con frecuencia, es más cómodo emplear una fórmula alternativa de la ecuación de Euler.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{(C \cdot L/r)^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{(C \cdot L)^2 / r^2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A \cdot r^2}{(C \cdot L)^2} \quad (2.13)$$

Pero, de acuerdo con la definición de radio de giro  $r$ ,

$$r = \sqrt{I/A}$$

$$r^2 = (I/A)$$

---

<sup>9</sup> ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

Entonces, la ecuación alternativa de Euler es,

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A \cdot I}{(C \cdot L)^2 \cdot A} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(C \cdot L)^2} \quad (2.14)$$

Y en función de carga por unidad de área:

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E}{(L/r)^2} \quad (2.15)$$

Esta forma de la ecuación de Euler es útil en un problema de diseño donde el objetivo es especificar el tamaño y la forma de una sección transversal de columna para soportar cierta carga.

#### **2.2.1.8 Factor de diseño y carga admisible<sup>10</sup>**

Como se espera una falla con una carga límite y no con un esfuerzo, el concepto de un factor de diseño se aplica en forma distinta que en la mayor parte de los demás miembros sometidos a cargas. En vez de aplicarse el factor de diseño a la resistencia a la fluencia o la resistencia última del material, se aplicará a la carga crítica, calculadas con las ecuaciones 2.12 o 2.14. Para aplicaciones típicas en el diseño de máquinas, se emplea un factor de diseño 3. Para columnas estacionarias con cargas y extremos empotrados bien conocidos se podrá emplear un factor menor tal como 2. En resumen, el objetivo del análisis y diseño de las columnas es garantizar que la carga aplicada a una columna sea segura, que sea bastante menor que la carga crítica de pandeo. Las siguientes definiciones se deben comprender:

$P_{cr}$  = Carga crítica de pandeo

$P_a$  = Carga admisible

---

<sup>10</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

$P$  = Carga real aplicable

$N$  = Factor de diseño

Entonces:

$$P_a = P_{cr}/N \quad (2.16)$$

La carga real aplicable  $P$  debe ser menor que  $P_a$ .

### 2.2.1.9 Análisis de columnas intermedias: fórmula de J.B. Johnson<sup>11</sup>

Cuando la relación de esbeltez real en una columna,  $CL/r$  es menor que el valor de transición  $C_c$ , la columna es intermedia y se debe emplear la fórmula de J.B. Johnson. La fórmula de J.B. Johnson se escribe como sigue:

$$P_{cr} = AS_y \left[ 1 - \frac{S_y(C.L/r)^2}{4.\pi^2.E} \right] \quad (2.17)$$

Para una columna corta, la carga crítica se ve afectada por la resistencia del material y por su rigidez  $E$ . La resistencia no influye en una columna larga cuando se emplea la fórmula de Euler.

### 2.2.1.10 Comparación de las columnas de Euler y de Johnson<sup>12</sup>

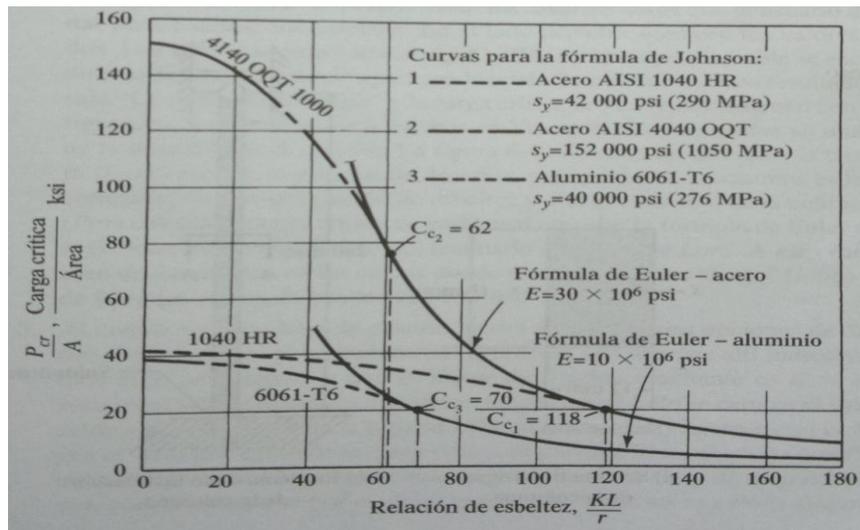
Ya se observó que no existe diferencia bien definida entre un elemento de compresión simple y una columna. La figura 2.4.a es una gráfica de los criterios de falla de elementos de compresión simples y de columna de Euler. Si el elemento es de longitud corta fallará por fluencia; si es largo, por pandeo. En consecuencia, en la gráfica se tiene la relación de esbeltez ( $L/k$ ) como abscisa y

---

<sup>11</sup>ROBERT L. MOTT, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.

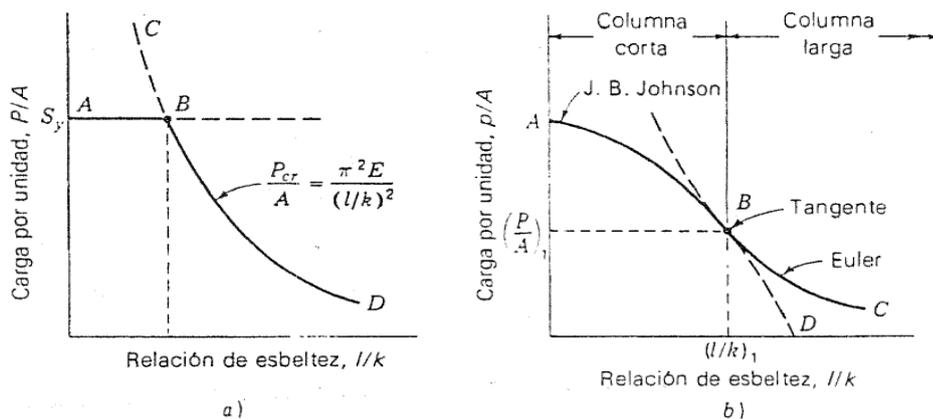
<sup>12</sup>SHIGLEY, Mischke, (1985). Diseño en Ingeniería Mecánica, Tercera edición en español, México D.F.

la carga por unidad de área ( $P/A$ ) como ordenada. Así, habrá una ordenada, levantada en el punto correspondiente a una relación de esbeltez determinada, la cual cortará a la recta AB y definirá a un elemento como puntal pues su falla será por fluencia; o bien cortará a la curva BD y definirá a un elemento como columna, la cual fallará por pandeo. Por desgracia, esta teoría no se aplica con tanta simplicidad en la práctica.



**Figura 2.3.** Curvas para la fórmula de J.B. Johnson.

**Fuente.** Robert L. Mott, (2006). Diseño de elementos de máquinas, Cuarta edición, México.



**Figura 2.4.** Curvas Euler-Johnson.

**Fuente.** SHIGLEY, Mischke, (1985). Diseño en Ingeniería Mecánica, Tercera edición en español, México D.F.

Se han planteado muchas fórmulas para calcular columnas, la mayor parte de ellas empíricas, tratando de eliminar algunos de los inconvenientes de la fórmula de Euler. La fórmula parabólica o de J.B. Johnson, se usa extensamente en los campos de diseño de máquinas, automóviles, aviones y estructuras de acero.

Tal fórmula puede expresarse en la forma:

$$\frac{P_{cr}}{A} = a - b (L/C)^2 \quad (2.18)$$

Donde  $a$  y  $b$  son constantes que se ajustan para que la fórmula se adapte a los datos experimentales. La figura 2.4.b es una gráfica de dos fórmulas, la de Euler y la parabólica. La evaluación de las constantes  $a$  y  $b$  de la ecuación 2.18 depende de donde se decida localizar la intersección A de la figura 2.4.b y donde se desee el punto de tangencia B, Cabe notar que las coordenadas del punto B se especifican como  $(P/A)_i$  y  $(L/k)_i$ . Una de las versiones más ampliamente usadas de la fórmula parabólica es la que se obtiene cuando se hace que la intersección A corresponda a la resistencia de fluencia  $S_y$  del material y que la parábola sea tangente a la curva de Euler en  $(P/A)_i = S_y/2$ . Así, la primera constante de la ecuación 2.18 es  $a = S_y$ . Para determinar la segunda constante se sustituye  $P_{cr}/A$  por  $S_y/2$  y despeja  $(L/k)_i$ . Utilizando la ecuación 2.18 se obtiene:

$$\frac{S_y}{2} = S_y - b \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{S_y} \quad (2.19)$$

Esto es:

$$b = \left( \frac{S_y}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{L}{C \cdot E} \quad (2.20)$$

Que ha de usarse como constante en:

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - b \left( \frac{L}{C} \right)^2 \quad (2.21)$$

Siendo:

$$\left(\frac{L}{k}\right)_i = \left(\frac{L}{\rho}\right)_i = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{S_y}\right)^{1/2} \quad (2.22)$$

Donde  $k = \rho$ , radio de giro.

Desde luego, esta ecuación debe usarse únicamente para relaciones de esbeltez hasta  $(L/\rho)_i$ . Cuando:

$L/\rho > (L/\rho)_i$  Se emplea la de Euler.

(2.23)

$L/\rho < (L/\rho)_i$  Se emplea la de Johnson.

### 2.2.2 Definición de norma

En este trabajo se ha tomado una definición de Vincenti quien dice: *“Las normas son una clase especial de especificaciones utilizadas como un punto de referencia para una clase de artefactos. Una norma expresa cualidades aceptables de los artefactos para un conjunto de indicadores de calidad claves en una manera tan cuantitativa e inconfundible como sea posible. Una norma es un documento profesional abierto a la comunidad que describe los límites mínimos requeridos para diferentes clases de artefactos, cada uno dando una clase específica de designación, para ser aceptable a la comunidad”*.<sup>13</sup> Incluyendo además a Andrew Gibbons, quien va más allá cuando dice: *“El propósito del esfuerzo de establecer normas es definir cualidades medibles de importancia de un artefacto que promuevan la seguridad, interoperabilidad, uso eficiente, uso amigable y dar los valores mínimos que los productos deben satisfacer”*.<sup>14</sup>

---

<sup>13</sup>[Vincenti, 1993], p. 207

<sup>14</sup>[Gibbons, 2000], p. 24

### 2.2.3 ASTM E9-89A<sup>15</sup> (Traducida)

Métodos de Prueba Estándar de Análisis de Compresión de Materiales Metálicos a temperatura ambiente.

Esta norma se expide bajo la denominación fija E9, el número inmediatamente después de la designación indica el año de adopción original o, en el caso de revisión, el año de la última revisión. Un número entre paréntesis indica el año de su nueva aprobación última. Un épsilon superíndice (e) indica un cambio de redacción desde la última revisión o nueva aprobación.

*Este estándar ha sido aprobado para su uso por las agencias del Departamento de Defensa.*

#### 2.2.3.1 **Ámbito**

- 1) Estos métodos de ensayo cubren el aparato, las muestras, y el procedimiento de las pruebas de carga axial de compresión de los materiales metálicos a temperatura ambiente (Nota 1). Para conocer los requisitos adicionales relativos a los carburos cementados,

**Nota 1.** Para las pruebas de compresión a temperaturas elevadas, ver Prácticas de la Norma ASTM E 209.

- 2) Los valores indicados en unidades pulgada-libra deben ser considerados como la norma. Los valores equivalentes métricas citada en la norma puede ser aproximada.
- 3) Esta norma no pretende abordar todos los problemas de seguridad, si los hubiere, asociado con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta norma establecer prácticas apropiadas de seguridad y salud y determinar la aplicabilidad de las limitaciones reglamentarias antes de su uso.

---

<sup>15</sup>ASTM E9-89a, ANEXO B1, Traducción: Diego Amancha

### 2.2.3.2 Documentos de Referencia

Normas de ASTM:

- ✓ B 557 Métodos de prueba para la tensión de ensayo de aluminio forjado y fundido y aleación de productos de magnesio.
- ✓ E 4 Prácticas para el grupo de verificación de las máquinas de prueba.
- ✓ E 6 Terminología relativa a los métodos de pruebas mecánicas.
- ✓ E 83 Prácticas para la verificación y clasificación de extensómetro.
- ✓ E 111 Método de prueba para el Módulo de Young, Módulo Tangente, y modulo acorde.
- ✓ E 171 Especificación estándar para atmósferas de acondicionamiento y las pruebas de materiales de barrera flexible.
- ✓ E 177 Prácticas de condiciones de utilización de la precisión y tolerancia en la norma ASTM.
- ✓ E 209 Métodos de prueba práctica para la compresión, pruebas de materiales metálicos en temperaturas elevadas, con tasas de calefacción convencional o rápida y velocidades de deformación.
- ✓ E 251 Métodos de prueba para características de rendimiento metálico en condiciones de servicio de medidores de resistencia de tensión.

### 2.2.3.3 Terminología

- 1) *Definiciones:* Las definiciones de términos relativos a los ensayos de compresión y la temperatura ambiente en la terminología E 6 y especificación E 171, respectivamente, se aplicarán a estos métodos de prueba.
- 2) *Definiciones de términos específicos de este estándar:*
  - a) *Ajuste.*- Además de la falta de compresión por aplastamiento del material, la falta de compresión puede ocurrir por (1) inestabilidad elástico a lo largo de una muestra de la columna debido a no axialidad de carga, (2) la inestabilidad inelástica a lo largo de una muestra de la columna, (3) a la inestabilidad local, ya sea elástica o inelástica, sobre una pequeña porción de la longitud del medidor, o (4) en un giro o el fracaso de torsión en el que las secciones

transversales giran una sobre la otra en torno al eje longitudinal de la muestra. Este tipo de fracaso se denomina pandeo.

- b) *Columna*. Un miembro de compresión que se carga axialmente y que puede fallar por pandeo.
- c) *Radio de giro*. La raíz cuadrada de la relación entre el momento de inercia de la sección transversal sobre el eje centroidales a la sección transversal:

$$\rho = (I/A)^{1/2} \quad (2.24)$$

Donde:

$\rho$  = radio de giro,

$I$  = momento de inercia de la sección transversal respecto a los ejes centroidales (para los especímenes sin apoyo lateral, el menor valor de  $I$  es el valor crítico), y

$A$  = área transversal.

- d) *Tensión crítica*. La tensión axial uniforme que produce una columna para estar a punto de pandeo. La carga crítica se calcula multiplicando la tensión crítica de la sección transversal.
- e) *Ecuaciones de pandeo*. Si la tensión de pandeo es inferior o igual al límite proporcional del material su valor se puede calcular mediante la ecuación de Euler:

$$S_{cr} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E}{(L/\rho)^2} \quad (2.25)$$

- f) Si la tensión de pandeo es mayor que el límite proporcional del material su valor puede ser calculado con la ecuación de Euler modificado:

$$S_{cr} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E_t}{(L/\rho)^2} \quad (2.26)$$

Donde:

$S_{cr}$  = Esfuerzo de pandeo crítico

$E$  = Módulo de Young

$E_t$  = Módulo tangente en el esfuerzo de pandeo

$L$  = Longitud de la columna, y

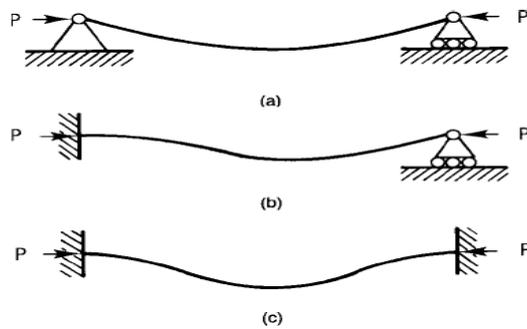
$C$  = Coeficiente final de inmovilidad.

Métodos de cálculo de la tensión crítica mediante la ecuación 2.26 se dan en la referencia (1).

g) *Coeficiente final de inmovilidad.* Hay ciertos modelos ideales para las condiciones de fijación que la teoría define el valor de la constante  $C$  (ver fig. 2.5). Estos valores son:

- Gira libremente (clavado o bisagra)  $C = 1$  (a)
- Un extremo fijo, la otra libre para girar  $C = 2$  (b)
- Los dos extremos fijos  $C = 4$  (c)

La norma no considera la condición fijo – articulado (bisagra)



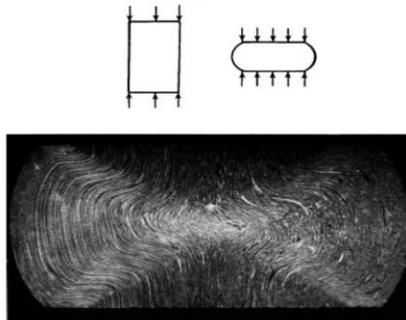
**Figura 2.5.** Diagramas que muestran las condiciones de inmovilidad y la consiguiente deformación de pandeo.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

**Nota 2.** Para las muestras de extremo plano probado entre yunques planos rígidos, se muestra en la referencia (1) que un valor de  $C = 3.75$  es el adecuado.

h) *Empotramiento.* Deformación restringida de las regiones final de una probeta, bajo la carga de compresión debido a la fricción en los tramos finales de

muestra y la consiguiente deformación transversal no uniforme, como se muestra esquemáticamente y en la fotografía en la figura. 2.6. La información teórica y experimental adicional se ilustra en la figura 2 que se da en el segundo documento de referencia.



**Figura 2.6.** Ilustración de compresión.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

#### **2.2.3.4 Resumen de Métodos de prueba**

El modelo es sometido a una creciente carga axial de compresión, tanto la carga y la tensión pueden ser controlados de forma continua o en incrementos finitos, y las propiedades mecánicas en compresión determinada.

#### **2.2.3.5 Significado y uso**

- 1) *Importancia.* Los datos obtenidos de un ensayo de compresión puede incluir el límite elástico, el límite de elasticidad, módulo de Young, la curva tensión-deformación, y la resistencia a la compresión (véase la terminología descrita en la Norma ASTM E6). En el caso de un material que no falla en la compresión de una fractura de rotura, la resistencia a la compresión es un valor que depende de la deformación total y la geometría de la muestra.
- 2) *Uso.* Las propiedades de compresión son de interés en los análisis de estructuras sometidas a compresión o flexión cargas o ambos, y en los análisis de trabajo de los metales y los procesos de fabricación que implican la deformación compresiva de gran tamaño como la forja y laminación. Para los metales quebradizos o no dúctiles que la fractura de la tensión a tensiones

por debajo de la resistencia a la fluencia, los ensayos de compresión ofrecen la posibilidad de ampliar el rango de datos de la tensión ejercida. Si bien la prueba de compresión no es complicado por estrangulamiento, como es la prueba de tensión para determinados materiales metálicos, pandeo y compresión pueden complicar los resultados y deben reducirse al mínimo.

#### **2.2.3.6 Aparatos**

1) **Máquinas de ensayos**, las máquinas utilizadas para las pruebas de compresión se ajustará a los requisitos de las Prácticas de la Norma ASTM E 4. Para las máquinas universales de ensayo con un espacio común, la calibración se realizará en la compresión.

Las superficies de apoyo de los ejes de la máquina de ensayo debe ser paralelo en todo momento con 0,0002 pulg / pulg. (m / m) a menos que se cuente con un dispositivo de alineación del tipo descrito en la sección de dispositivos de alineación o prensa secundaria.

#### **2) Superficie del bloque:**

a) Los dos extremos de la muestra de compresión deberán estar en bloques con superficies planas y paralelas en 0,0002 pulg / pulg. (m / m). La falta de paralelismo inicial puede ser superada por el uso de bloques de rodamiento regulable (*Nota 3 de esta sección*). Los bloques se componen de material duro. Prácticas de laboratorio actuales sugieren el uso de carburo de tungsteno para pruebas con acero y bloques de acero endurecido (55 HRC o más) y si las pruebas son con materiales no ferrosos como aluminio, cobre, etc. La muestra debe ser cuidadosamente centrada respecto a los ejes de la máquina de pruebas o a la prensa secundaria si se utiliza.

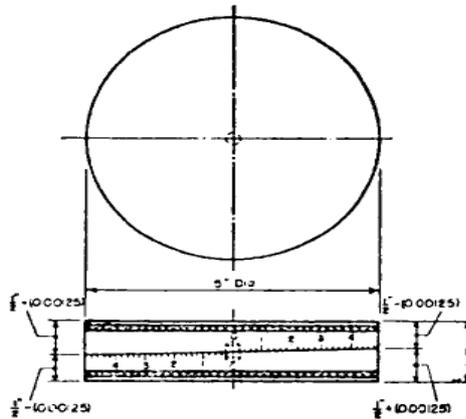
**Nota 3.** Hay que recordar que el objeto de un bloque de rodamiento es dar a la muestra regulación, incluso una distribución de la carga inicial como sea posible. Un bloque de rodamiento regulable no puede ser invocado para

compensar cualquier inclinación de la cabeza que puede ocurrir durante la prueba.

- b) El rodamiento de bloques de caras es ajustable teniendo que la muestra de contacto se hizo en paralelo antes que la carga se aplique a la muestra. Un tipo de bloque de rodamiento ajustable que ha resultado satisfactorio se ilustra en la figura. 2.7. Otro acuerdo que implique el uso de un bloque de rodamiento esférico arraigada de que se ha encontrado satisfactoria para el ensayo de materiales distintos en la hoja de formulario se muestra en la figura. 2.8. Es deseable que el bloque de rodamiento esférico debe estar en el extremo superior de la muestra de prueba (para muestras sometidas a ensayo con la carga de eje vertical). La superficie esférica del bloque deberá ser definida por un radio que tenga su punto de origen en la superficie plana que tiene que ver con la muestra.

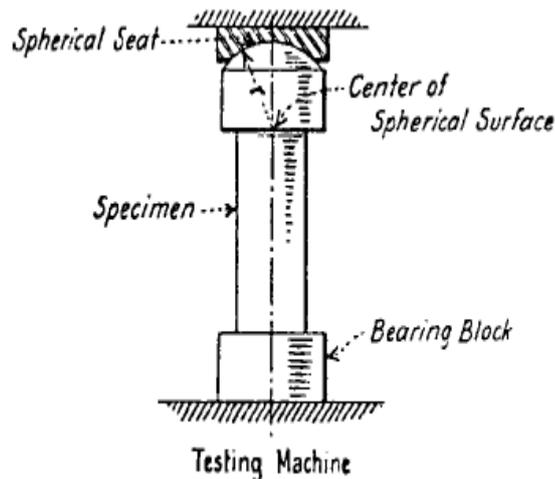
### 3) Dispositivos de alineación / prensa secundaria:

- a) Normalmente es necesario utilizar un dispositivo de adaptación, a menos que la máquina de ensayo se ha diseñado específicamente para el alineamiento axial. El diseño del dispositivo o prensa secundaria depende en gran medida del tamaño y la fuerza de la muestra. Deben estar diseñados de modo que la memoria RAM (o de otros elementos móviles) no tienda a inclinar el dispositivo o el armazón de la máquina como consecuencia de la carga. Los bloques de apoyo del dispositivo tendrán los mismos requisitos que para el paralelismo y planitud como se indica en los documentos de referencia de esta norma.
- b) Las exigencias principales de todos los dispositivos de alineación que se aplicará la carga axial, uniforme, y con insignificante "Slip-stick" fricción. Un dispositivo de alineación que se ha encontrado apropiado es la representada en la Figura 2.9 y se describen en los documentos de referencia. Otros dispositivos del tipo prensa secundaria también han sido utilizados con éxito.



**Figura 2.7.** Bloque de cojinete ajustable para prueba de compresión.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. ANEXOS Sección D.



**Figura 2.8.** Bloque de apoyo esférico asentado.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. ANEXOS Sección D.

Una muestra cilíndrica de acero AISI 4340(HRC =40) se comprimió el 57%, figura 2.6. El gráfico de la foto macro se hizo de una sección transversal pulida y grabada al agua fuerte de la muestra analizada. Las líneas de flujo muy distorsionados son el resultado de la fricción entre los extremos de la muestra y el aparato de carga. Se deben considerar las regiones triangulares de deformación limitada en los extremos y la zona transversal con corte severo.

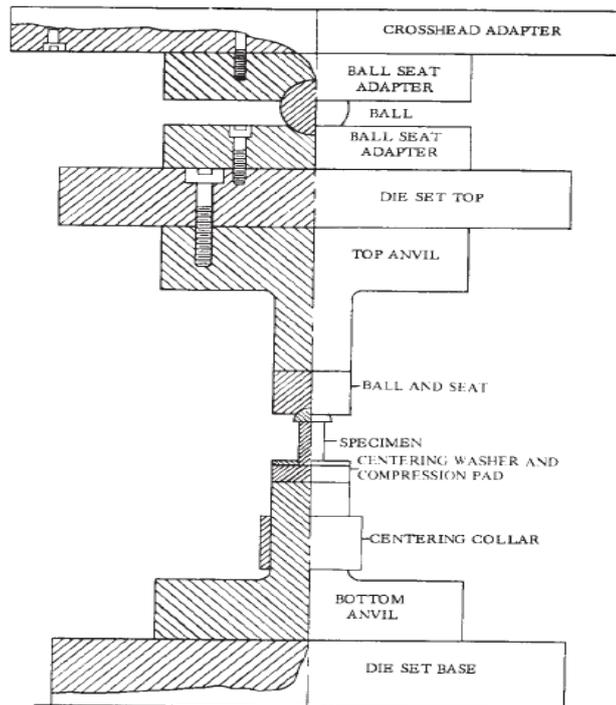
4) *Plantillas para pruebas de compresión.* En las pruebas de muestras de poco espesor, como material de láminas, algunos medios deben ser adoptados para

evitar el pandeo de la muestra durante la carga. Esto puede lograrse mediante el uso de una plantilla que contiene las placas del soporte que llevan a los lados del ancho de la muestra. La plantilla debe ofrecer una combinación adecuada entre los laterales de apoyo y la presión constante del muelle para evitar el pandeo, pero sin interferir con la deformación axial de la muestra. Aunque son apropiadas las combinaciones, cambian un poco con las variaciones en el material de muestra y el espesor, la temperatura de prueba, y la exactitud de la alineación, resultados aceptables, se puede obtener con rangos bastante amplios de apoyo lateral, de la presión y la tolerancia. En general, cuanto mayor es la constante del resorte de la plantilla, menor es la presión lateral de apoyo que se requiere. Ajustes adecuados de estas variables debe ser establecido durante la calificación del equipo.

- a) No es la intención de estos métodos para designar plantillas específicas para las pruebas de materiales de lámina, sino simplemente para dar algunos ejemplos y referencias a las plantillas que se han utilizado con éxito, algunos de los cuales se citan en la Tabla 2.4. Otras plantillas son aceptables siempre que eviten el pandeo y que pasen la prueba de aptitud establecidos en la sección de aparatos de prueba. Para la compresión de plantillas en general, se requiere que la muestra se lubrique a los lados del apoyo para impedir que fuerzas de rozamiento extrañas ocurran en los puntos de apoyo.

##### 5) *Medidas de tensión:*

- a) Dispositivos mecánicos o electromecánicos utilizados para la medición de la tensión se ajustarán a los requisitos de la clase aplicable descrito en la Norma ASTM E 83. El dispositivo deberá ser verificada en la compresión.
- b) Medidor de tensión eléctrica de resistencia, (o uno de los demás dispositivos de uso) se podrá utilizar un sistema de medición siempre que éste sea verificado y se encuentren dentro de lo establecido en la Norma ASTM E 83. Las características de los medidores de deformación de resistencia eléctrica se han determinado de métodos de ensayo de la Norma ASTM E 251.



**Figura 2.9.** Ejemplo de aparato de prueba de compresión.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

6) *Calificación del aparato de ensayo.* La calificación completa de un equipo de prueba, consiste en la máquina de ensayo y en su caso, uno o más de los siguientes: el dispositivo de alineación, la plantilla y el sistema de medición de la tensión; será de la siguiente forma:

- a) Realizar pruebas para establecer el módulo de elasticidad en cinco ejemplares de réplica de lámina de aluminio 2024-T3 o aleación de aluminio 2024-bar T4 de conformidad con el método de prueba de la norma ASTM E 111. Estas muestras de clasificación deberán ser a máquina de hoja a un bar en la ubicación especificada en métodos de prueba de la norma ASTM B 557. El espesor de la chapa o el diámetro de la barra pueden ser mecanizados con el espesor o el diámetro deseado. Es esencial que el extensómetro esté bien asentado en las muestras cuando se realiza esta prueba. Cuando los ejemplares de calificación de cada módulo proporcionan un valor de  $10,7 * 10^6$  psi (73,8 GPa)  $\pm 5\%$ , el aparato cumple los requisitos.

- b) El procedimiento de calificación se realizarán utilizando el modelo más delgado rectangular o una muestra de diámetro más pequeño redonda que se prueba en el aparato.

### 2.2.3.7 Muestras de análisis

- 1) **Rectangular y tipo lámina.** Muestras de especímenes de prueba deberá ser plana y de preferencia de todo el espesor del material.

**Tabla 2.4.** Plantillas representativas de compresión y dimensiones de las muestras para los ensayos de lámina delgada.

Type of Jig	Ref	Thickness		Width		Length		Gage Length		
		in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	
Montgomery-Templin:	(4 and 5)	General use	0.016 and over	0.40 and over	0.625	16.0	2.64	67.0	1	25
Magnesium alloys		0.016 and over	0.40 and over	0.750 <sup>B</sup>	20.0	2.64	67.0	1	25	
NACA (Kotanchik et al)	(6)	0.020 and over	0.50 and over	0.53	13.6	2.53	64.5	1	25	
Moore-McDonald	(7)	0.032 and over	0.80 and over	0.75 <sup>C</sup>	20.0	2.64	67.0	1	25	
LaTour-Wolford	(8)	0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	1.95	49.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.00	51.0	1	25	
Miller	(9-11)	0.006 to 0.010	0.15 to 0.25	0.48	12.2	2.22	56.5	1	25	
		0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	2.23	56.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.25	57.0	1	25	
Sandorff-Dillon:	(12)	General use	0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	4.12	104.5	2	50
High-strength steel		0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	3.10	78.5	2	50	

<sup>A</sup> See Ref. (13) for additional jigs and specimen dimensions.

<sup>B</sup> Reduced to 0.625 in. (16.0 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

<sup>C</sup> Reduced to 0.650 in. (16.5 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

La conversión a unidades métricas representa una aproximación de las dimensiones del espécimen, pero no la conversión exacta de las unidades libra/pulgada.

En caso de soporte lateral es necesario, que la anchura y longitud dependan de las dimensiones de la plantilla utilizada para apoyar la muestra. La longitud será suficiente para que la muestra pueda reducir la cantidad requerida para definir el límite de fluencia o límite de elasticidad, pero no lo suficiente como para permitir el pandeo en la parte no compatibles. Dimensiones de la pieza y los distintos tipos de plantillas se dan en la tabla 2.4.

- 2) **Los especímenes en forma de sólidos cilíndricos.** Se recomienda que, cuando sea factible, utilizar las muestras de prueba de compresión en forma de sólido cilindros circulares. Tres formas de probetas cilíndricas para los materiales metálicos son reconocidas, y designada como corto, medio-largo, y largo (Nota 4). Dimensiones sugeridas para las muestras de análisis sólido de compresión para el uso general se presentan en la Tabla 2.5.

**Tabla 2.5.** Especímenes sugeridos para sólidos cilíndricos.

Specimens	Diameter		Length		Approx L/D Ratio
	in.	mm	in.	mm	
Short	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	0.8
	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	2.0
Medium	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.50 ± 0.05	38. ± 1.	3.0
	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	2.38 ± 0.12	60. ± 3.	3.0
	1.00 ± 0.01	25.0 ± 0.2	3.00 ± 0.12	75. ± 3.	3.0
	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	3.38 ± 0.12	85. ± 3.	3.0
Long	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	6.38 ± 0.12	160. ± 3.	8.0
	1.25 ± 0.01	32.0 ± 0.2	12.50 min	320 min	10.0

<sup>A</sup> Other length-to-diameter ratios may be used when the test is for compressive yield strength.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

**Nota 4.** Los especímenes cortos normalmente se utilizan para ensayos de compresión de los materiales provistos como los metales en el servicio que se utilizan en forma de placas delgadas que llevan la carga perpendicular a la superficie. Especímenes de longitud media normalmente se utilizan para determinar la resistencia a la compresión general de las propiedades de los

materiales metálicos. Especímenes largos se adaptan mejor para la determinación del módulo de elasticidad en la compresión de los materiales metálicos. Las dimensiones modelo que figura en la tabla 2.5 se han utilizado con éxito. Las muestras con L/D (longitud/diámetro) de 1,5 o 2,0 están mejor adaptadas para la determinación de la resistencia a la compresión de los materiales de alta resistencia.

- 3) *Preparación de muestras.* Las superficies laterales respecto a la longitud de calibración no varían en diámetro, ancho o en el espesor más de 1% o 0,002 in (0,05 mm), lo que es menor. (Si se utiliza una sección reducida, este requisito sólo se aplica a la superficie de la sección reducida.) Además, la línea central de todas las superficies laterales de los ejemplares será coaxial en 0,01 in (0,25 mm).
  - a) *Acabado de la superficie.* Las superficies mecanizadas de las muestras tendrán un acabado de superficie de 63  $\mu$ in. (1,6 micras) o mejor. Lateral superficies mecanizadas a las que el soporte lateral es aplicable será terminado al menos al 40 micro pulgadas (1,0  $\mu$ in) media aritmética.
  - b) *Uniformidad y Paralelismo.* Los extremos de una muestra, deberá ser plano y paralelo de 0.0005 pulg/pulg (mm / mm) y es perpendicular a las superficies laterales en 0,3 grados de arco. En la mayoría de los casos la máquina requiere esta exigencia o trituración de los extremos de la muestra.
  - c) *Aristas de especímenes rectangular con una amplitud de material equivalente a por lo menos el espesor de la muestra se mecanizan todos los bordes cortados o estampada con el fin de eliminar el material cuyas propiedades pueden haber sido alteradas. (Si se utiliza una sección reducida, este requisito sólo se aplica a los bordes de la sección reducida.) Las muestras deberán ser trabajadas de forma que las superficies estén libres de mellas, hendiduras, y rebabas.*
- 4) *Longitud de ubicación de la galga:* los extremos de la longitud del medidor no podrá estar más cerca de los extremos de la muestra o en los extremos de la sección reducida de la mitad de la anchura o diámetro de la muestra.

### 2.2.3.8 Procedimiento ASTM E9-89a

1) *De la pieza de medición.* Mida el ancho y el espesor, o el diámetro de la muestra con un micrómetro a lo largo de la sección de calibre. Dimensiones de la pieza mayor de 0,10 pulgadas (2,5 mm) se debe medir con precisión de 0,001 pulgadas (0,02 mm), y los de menos de 0,10 pulgadas (2,5 mm) se debe determinar con precisión de 1% de la dimensión que se mide. Calcular el área transversal promedio de la sección de medidor de la muestra.

2) *Limpieza.* Limpie los extremos de la muestra y los bloques de fijación con acetona u otro disolvente adecuado para eliminar las trazas de grasa y aceite.

3) *Lubricación.* Teniendo la fricción superficial puede afectar los resultados. La fricción se ha reducido con éxito por la lubricación de la superficie del cojinete con la hoja de TFE fluorocarbon, di sulfuro de molibdeno, y otros materiales se resumen en el tercer documento de referencia.

4) *Instalación de la pieza.* Coloque el modelo que figura en el aparato de prueba y haciendo que coincidan la muestra sobre el soporte para garantizar la carga concéntrica. Además, verifique que la muestra carga-reacción de superficies sean iguales con las respectivas superficies del aparato. Si el aparato tiene soportes laterales, las muestras laterales deben estar en contacto con el mecanismo de apoyo con la presión de apriete recomendado por el fabricante del accesorio, o según lo determinado en las pruebas de fijación de verificación. Si los tornillos se utilizan para ajustar la presión del lado de apoyo, se recomienda que una llave de torsión se utilice para asegurar una presión constante.

a) *Transductor Adjunto.* Adjunte el extensómetro u otro tipo de transductores de ser necesario, a la sección de medición de la muestra. La longitud de colocación del medidor debe ser de al menos la mitad de la longitud o, preferentemente, un diámetro lejos de los extremos de la muestra.

5) *Selección del rango carga-deformación.* Configura el intervalo de carga de la máquina de ensayo de lo que la carga máxima prevista es de al menos un tercio del rango seleccionado. Seleccione la velocidad de deformación o la escala de desviación para que la parte elástica de la carga contra la tensión o contra carga de deformación en el registro autógrafo, sea entre 30 ° y 60 ° con el eje de carga.

6) *Medidas de tensión.* Dispositivos utilizados para la medición de la tensión deben cumplir con los requisitos de la clase aplicable de extensómetro descrito en la práctica de la Norma ASTM E 83. Medidores de tensión eléctrica, si existen, deberán tener las características de rendimiento establecido por el fabricante de acuerdo con métodos de ensayo de la Norma ASTM E 251.

7) *Velocidad de prueba.* Para las máquinas equipadas con las pruebas de deformación, ajustar la máquina para tensar la muestra a una tasa de 0,005 in./in.min (m/m.min). Para máquinas con control de carga o con control de velocidad de la sección transversal, fijar el tipo de modo que el modelo es probado en un porcentaje equivalente a 0.005 pulg/pulg.min (m/m•min) la deformación de la tasa en la parte elástica. Una tasa de 0,003 pulg/pulg.min (m/m•min) se puede utilizar si la velocidad de deformación del material es de tipo sensible.

a) Para las máquinas sin necesidad de equipos de estimulación de la velocidad de deformación o sistemas de control automático de retroalimentación, mantener una velocidad constante para obtener la tensión deseada de tasa promedio desde el inicio de la carga hasta el punto final de la prueba. La velocidad de deformación de la tasa media se puede determinar de un intervalo de tiempo de carga ya marcado, a un tiempo del gráfico de la velocidad de deformación, o desde el momento del inicio de la carga hasta el punto final de la prueba de un determinado dispositivo de medición de tiempo (cronómetro). Debe reconocerse que la utilización de máquinas con movimiento constante de velocidad no garantiza la velocidad de deformación constante a lo largo de una prueba.

b) También hay que señalar que la libre circulación de la velocidad de carrera con cabeza transversal puede diferir de la velocidad bajo carga para el ajuste de la máquina misma, y para los especímenes de diferentes rigideces. También puede dar lugar a diferentes velocidades, dependiendo de la máquina de prueba y fijación. Sea cual sea el método, la muestra debe ser probado a una velocidad uniforme, sin retrocesos o cambios repentinos. La tasa de examen también debe ser tal que la tasa de cambio de carga en la muestra que se prueba, será dentro de la respuesta dinámica de los sistemas de medición. Esto es de particular importancia cuando el análisis de muestras está por debajo de los materiales de alto módulo.

8) *Prueba de conducta.* Después de que el ejemplar ha sido instalado y alineado, y el transductor de presión o deformación de medición instalados, activar el dispositivo de grabación e iniciar la prueba a la tasa prescrita. Continuar la prueba a una velocidad uniforme hasta que la prueba se ha completado como se indica a continuación.

a) *Materiales dúctiles.* Para los materiales dúctiles, la resistencia a la fluencia o límite de elasticidad, y a veces la fuerza en un esfuerzo mayor que la velocidad de deformación del rendimiento, se puede determinar. La realización de la prueba para determinar tanto la aparición de la obtención o la resistencia a la compresión o de ambos es el mismo. Materiales sin diagramas altos de tensión-deformación, será necesario que la velocidad de deformación o desviación en el rendimiento se estime inicialmente, y la muestra sea lo suficientemente probada más allá de la estimación inicial para asegurarse que la tensión de fluencia pueda determinarse después de la prueba. Para los materiales, que muestran una curva de tensión-deformación fuerte o un punto de producción característico, la prueba se puede terminar bien después de un ángulo agudo o después de la caída de la carga que se observa.

b) *Materiales frágiles.* Materiales frágiles no pueden ser analizados para la falla por compresión o rotura.

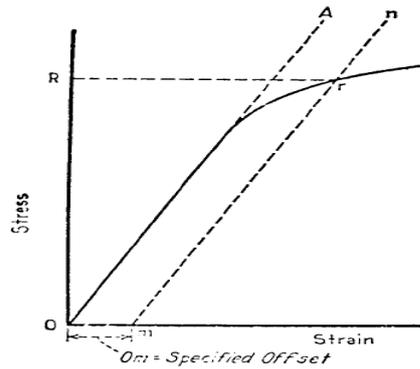
9) *Número de ejemplares.* De la pieza en bruto se tomarán de materiales a granel, de acuerdo a las especificaciones aplicables. El número de muestras a ensayar debe ser suficiente para satisfacer los requisitos que determine el propósito de la prueba, o según lo acordado entre las partes implicadas. Cuanto mayor sea la muestra, mayor es la confianza que la muestra representa la población total. En la mayoría de los casos, entre cinco y diez muestras deberá ser suficiente para determinar las propiedades de compresión de una muestra con una confianza razonable.

10) *Precauciones:*

- a) En las pruebas de compresión de especímenes delgados relativamente largo, que no se apoya lateralmente, las muestras se puede doblar elásticamente y volar de la configuración de la prueba. Un dispositivo de protección debe estar en su lugar para evitar lesiones.
- b) *Rompiendo por fractura.* Algunos materiales pueden fallar de manera aplastante lo que hará que las piezas sean expulsadas como metralla. El dispositivo de protección debe estar en su lugar para evitar lesiones.

#### **2.2.3.9 Cálculos**

1) *Rendimiento de punto.* Los materiales que presentan una fuerte fatiga de la velocidad de deformación en el diagrama pueden presentar una disminución en la tensión con distintas presiones crecientes. El punto de rendimiento es la tensión máxima alcanzada justo antes de la caída repentina de la tensión. Para las máquinas de prueba sin esfuerzo o deformación, las capacidades de grabación, el punto de rendimiento puede determinarse tomando nota de la carga para la que la aguja marque el indicador descendiendo bruscamente, cuando en la máquina de ensayo se realicen pruebas a un ritmo constante.



**Figura 2.10.** Diagrama esfuerzo-deformación para la determinación de la Fuerza de producción por el método de compensación.

**Fuente.** Norma ASTM E9-89a. *ANEXOS Sección D.*

2) *Resistencia a la compresión.* Para un material que falla en la compresión por aplastamiento o fractura, la resistencia a la compresión es el esfuerzo máximo durante o antes de la fractura, determinada dividiendo la carga máxima por el área transversal. Para materiales dúctiles, la resistencia a la compresión puede ser determinada a partir del diagrama carga-deformación en una tensión total especificada. La tensión a la que esto se determinó debe ser especificada.

### 2.2.3.10 Informe de pruebas para la Norma ASTM E9-89a

Incluir la siguiente información en el informe de la prueba:

1. *Material de la pieza.* Describir el material de muestra, de aleación, tratamiento térmico, el número de planta de proceso por lotes, dirección de la fibra, etc., según sea el caso.
2. *Configuración de la pieza.* Incluya un bosquejo de la configuración de modelo o referencia a la elaboración de la muestra.
3. *Dimensiones de la pieza.* Indicar el estado actual de las dimensiones reales medidas para cada muestra.

4. *Accesorios de prueba y lubricante.* Describir la instalación fija de ensayo o hacer referencia a los dibujos del accesorio, especificando lubricante utilizado en cada caso.

5. *Máquina de prueba.* Incluir la marca, modelo, y la gama de carga de la máquina de prueba.

6. *Velocidad de las pruebas.* Anote el tipo de prueba y el modo de control.

7. *Diagrama carga-deformación.* Incluir, si es posible, la tensión, diagrama de velocidad de deformación, con escalas, número de la muestra, datos de prueba, la velocidad y otra información pertinente.

8. *Módulo de elasticidad.* Informe del módulo de elasticidad cuando sea necesario.

9. *Fluencia.* Informe sobre el rendimiento o el punto de tensión de rendimiento cuando es necesario y el método de determinación.

10. *Resistencia a la compresión.* Informe de la resistencia a la compresión de material exhibiendo la falla frágil. Una resistencia a la compresión en una tensión total especificada se puede informar de los materiales dúctiles. Si es así, el informe de la velocidad de deformación a la que el esfuerzo de compresión fue determinada.

11. *Tipo de error.* Cuando se aplica, describa el tipo de error de la muestra.

12. *Precisión y el sesgo.* Indique el estado de la precisión y la exactitud de los datos de cada muestra.

13. *Anomalías.* Indique las anomalías que se produjeron durante la prueba que pudo haber tenido un efecto sobre los resultados de la prueba.

- a) Para las pruebas de aceptación comercial de la sección correspondiente al informe se consideran suficientes el material y la configuración de la probeta así como el valor de fluencia y la resistencia a la compresión de estas.

#### **2.2.3.11 Precisión y el sesgo**

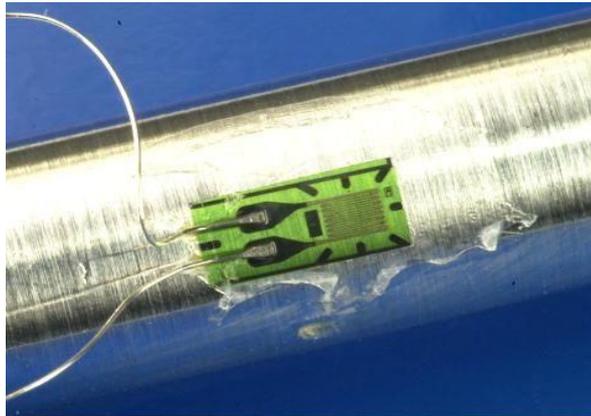
- a) *Precisión.* Los parámetros siguientes se informa para influir en la precisión de los métodos de prueba: un modelo de pandeo, la carga de fricción de la superficie, la muestra ensayada, y el tamaño de la muestra. El subcomité está en el proceso de cuantificación de estos efectos.
- b) *Sesgo.* No hay normas de referencia disponibles para los ensayos de tipo destructivo, por ejemplo la compresión. Por lo tanto, el sesgo de este método de ensayo es aún desconocido.

#### **2.2.4 Sistemas de medición y control industrial**

Los sistemas de medición y el control de los procesos industriales dependen de la capacidad de medir con exactitud y rapidez el valor de las variables que intervienen en su funcionamiento. La mejor manera de realizarlo es teniendo mediciones precisas de cada una de estas variables, lo cual se logra mediante la utilización de sensores y transductores. Para el caso de mediciones mecánicas, es preferible convertir las señales mecánicas a eléctricas porque:

- Las señales eléctricas pueden transmitirse de un lugar a otro de manera más fácil que las señales mecánicas.
- Las señales eléctricas son más sencillas de amplificar y filtrar que las señales mecánicas.
- Las señales eléctricas son sencillas de manipular para encontrar parámetros importantes como: la razón de cambio de una variable, integral de tiempo y determinar si la variable ha excedido algún límite, etc.

A través de la extensimetría se puede medir el esfuerzo que hay en un punto cualquiera de una pieza, que está sometida a una determinada carga. La medida no se efectúa de una forma directa, esto es, no se mide el esfuerzo directamente; lo que se mide es el alargamiento que sufre la pieza a la que se le aplica la carga. Si se conoce el alargamiento en un punto, se puede conocer entonces el esfuerzo que actúa en él, ya que ambas son directamente proporcionales y están relacionadas mediante el módulo elástico del material, según la ley de Hooke.



**Figura 2.11.** Técnica de extensimetría.

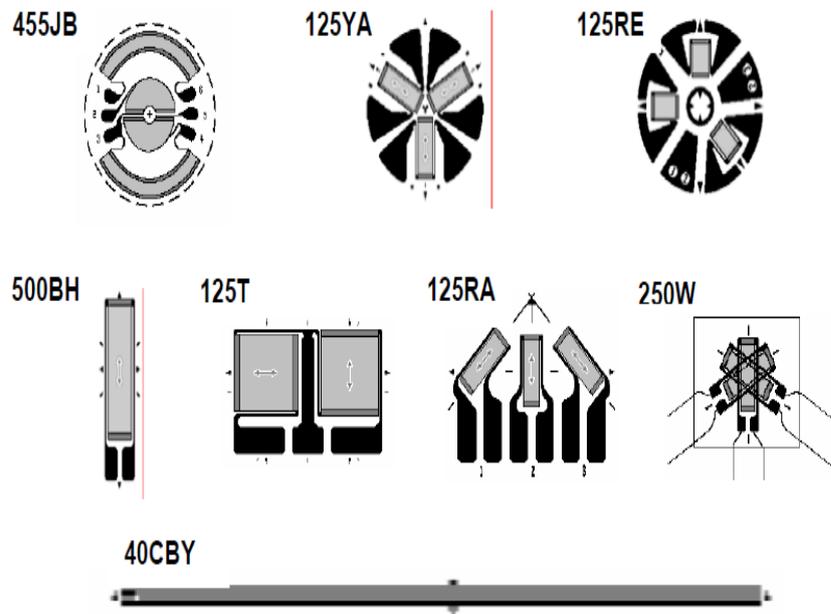
**Fuente.** <http://www.arqhys.com/construccion/galgas-extensiométricas.html>

#### **2.2.4.1 Galgas extensiométricas**

Las galgas extensiométricas (figura 2.12) son pequeños sensores capaces de detectar variaciones longitudinales extremadamente pequeñas y convertirlas en variaciones de resistencia medibles. Éstas se usan en la industria para medir con precisión fuerzas o pesos muy grandes. Existen galgas para medir fuerzas pequeñas, pero no son comunes.

La galga extensiométrica es un alambre de resistencia, la cual es pegada de manera firme en la superficie del objeto que se desea estudiar. Cuando al objeto se le aplica una fuerza de tensión o compresión, ésta provoca que el objeto se estire o se comprima ligeramente. Una galga adherida a una superficie se distorsiona ligeramente. La distorsión del alambre cambia su resistencia, la cual es función

del valor de la fuerza. Lo que mide en realidad una galga es la deformación, que se define como el cambio en la longitud de un objeto.



**Figura 2.12.** Galgas extensiométricas para usos específicos.

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.



**Figura 2.13.** Diagrama de bloques del sensor de tensión.

**Autor.** Diego Amancha

#### 2.2.4.2 Parámetros de selección de la galga extensiométrica

Los criterios de selección de la galga extensiométrica involucran evaluar diferentes parámetros como son: Variable física a estudiar (tensión, aceleración, desplazamiento, etc.); superficie sobre la cual se va a pegar (metal, concreto,

madera, plástico, etc.) y la temperatura de operación (medio ambiente o ambientes industriales).

La correcta selección del sensor garantiza el óptimo funcionamiento de la galga, para las condiciones ambientales de operación, medidas exactas y confiables, además de reducir al mínimo el costo total de la instalación de la galga. Para mediciones de tensión, las características de funcionamiento e instalación de una galga son afectadas por los siguientes parámetros:

**a. Sensibilidad a la tensión de la rejilla**

La galga posee una relación entre tensión aplicada al objeto de estudio y las variaciones de resistencia, la cual se llama sensibilidad a la tensión o factor de galga; se define como la razón de cambio de la resistencia eléctrica del conductor al cambiar la longitud relativa. Este parámetro es adimensional y es de suma importancia; ya que a medida que su valor es más grande, ante la misma tensión mecánica, se producen variaciones de resistencia mayores. El factor de la galga es función de la sensibilidad a la tensión de la aleación de los metales con la que fue fabricada la rejilla de la galga y de otros factores como son: Temperatura, tamaño, configuración de la rejilla y la forma de medirlo.

**Tabla 2.6.** Ejemplo de valores de factores de galga y sensibilidad transversal.

<i>Tipo de galga</i>	<i>Factor de galga</i>	<i>Sensibilidad transversal %</i>
EA-06-250BG-120	2.11	+0.4
EA-50-250BG-120	2.125	+0.9
WK-06-250BG-350	2.05	-3.4
WK-06-500AF-350	2.04	-9.2
WK-15-125AD-350	2.16	-1.9

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

**Tabla 2.7.** Sensibilidad a la tensión de varias aleaciones.

<i>Material</i>	<i>Nombre comercial</i>	<i>Sensibilidad a la tensión</i>
Cobre-níquel (55-45)	Constantan	+2.1
Níquel-cromo (80-20)	Nichrome V	+2.2
Níquel-cromo (75-20) mas hierro y aluminio	Karma	2.1
Hierro-cromo-aluminio	Armour D	+2.2
Níquel-cromo-hierro-molibdeno (36-8-55.5-0.5)	Isoelastic	+3.5
Platino-tungsteno (92-8)	-	+4.0
Cobre-níquel-manganeso (84-4-12)	Manganin	+0.6
Níquel	-	-12.0
Hierro	-	+4.0

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

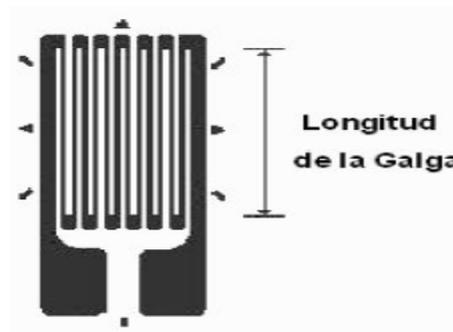
Los materiales básicos usados en la construcción de la rejilla de las galgas extensiométricas, son aquellos que muestran sensibilidad a la tensión y aspectos importantes como: Amplio rango de operación de temperatura, buen ciclo de trabajo, coeficiente de temperatura bajo y controlable. La tabla 2.6 muestra la sensibilidad a la tensión de algunos de los materiales utilizados para la construcción de galgas.

#### **b. Longitud de la galga**

La longitud de la galga es una consideración importante en la selección de la misma. A menudo es el primer parámetro que se define.

Debido a que las mediciones de tensión usualmente se realizan en máquinas o estructuras con dimensiones pequeñas; las galgas con longitudes superiores a los 13 mm se consideran largas, ofrecen ventajas comparadas con las galgas pequeñas (con longitud de 5 mm), debido a que son fáciles de manejar y a que poseen buena disipación de calor. Esta última consideración es muy importante cuando la galga es instalada sobre plástico u otro material con propiedad de baja transferencia de calor. La longitud de la galga es el promedio de la longitud de la rejilla entre el

número de líneas que tiene ésta. En la definición de la longitud de galga no se toma en cuenta la longitud de las etiquetas, tal como se muestra en la figura 2.14.

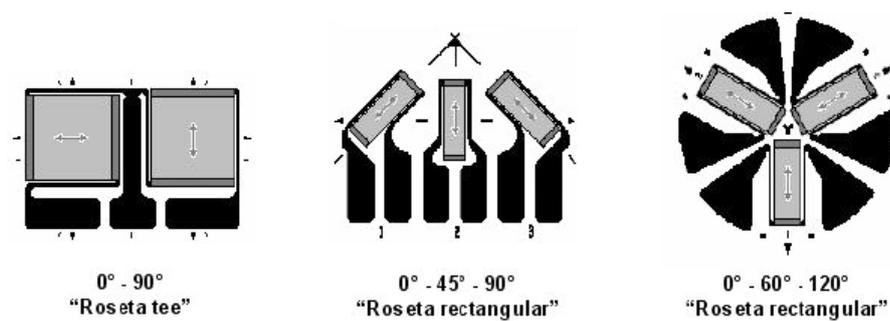


**Figura 2.14.** Longitud de la galga.

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

**c. Modelo de la galga**

El modelo de la galga es la forma, figura o patrón que se observa en la galga. En la figura 2.12 se observan ocho modelos diferentes de galgas. Debido a la variedad de aplicaciones y usos, existen diferentes modelos de galgas. El modelo incluye: la forma de la rejilla, el número de rejillas y orientación de las mismas (en galgas con múltiples rejillas) y la configuración de las etiquetas de soldado.



**Figura 2.15.** Ejemplos de galgas tipo roseta.

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

Cuando la dirección de la tensión es uniaxial y conocida con precisión, se usa una sola galga con una rejilla alineada en la dirección de la tensión. Para estados de tensión de dos ejes (biaxial) son requeridas de dos a tres galgas en forma de rosa para poder determinar la tensión principal. Cuando la dirección del eje principal es conocida, se pueden ocupar dos elementos “Roseta tee” a  $90^\circ$ , con la galga alineada para coincidir con el eje principal. Cuando no se conoce la dirección del eje principal de la tensión de estados biaxiales, se usa una galga con tres elementos en forma de rosa, con este arreglo se obtienen: la dirección y magnitud de las tensiones principales. La rosa puede ser instalada en cualquier orientación, usualmente una de las rejillas es alineada con alguno de los ejes significativos del objeto de estudio. Hay galgas con tres elementos en configuración rectangular a  $45^\circ$  o configuración delta a  $60^\circ$ . La configuración rectangular simplifica el análisis. Existe una gran variedad de galgas con más de dos rejillas, dependiendo la aplicación se elige la más adecuada. La figura 2.15 muestra algunos de los tipos de rosetas.

#### **d. Resistencia de la galga**

La resistencia de la galga tiene valores típicos de 120 ohms o 350 ohms. Es preferible usar una galga con resistencia grande para reducir el calentamiento de la misma y de esta forma reducir el efecto de los cables. La relación señal-ruido puede mejorarse con galgas de resistencia alta cuando el circuito acondicionador de señal incluye interruptores u otras fuentes que provoquen cambios en la resistencia. Valores de resistencia de 1000 ohms son usados cuando el objeto en estudio tiene bajas características de conducción de calor (plástico) o de 5000 ohms en equipos de medición que funcionan con baterías y que requieren de un bajo consumo de energía.

#### **e. Rango de temperatura de operación de las galgas**

El rango de temperatura de operación de la galga está en función de la aleación de la rejilla de la galga, base, adhesivo y otras limitaciones asociadas con la temperatura.

La temperatura influye notablemente en las características. A su vez, cualquier variación en estas características influye en el factor de galga. Este coeficiente se mide en % / °C, que es la variación porcentual del valor nominal del factor de galga respecto al incremento de temperatura. El rango típico para varias combinaciones comerciales de rejilla/base disponibles para galgas es mostrado en la tabla 2.8.

**Tabla 2.8.** Rango típico de temperatura para varias combinaciones de rejilla/base.

<i>Lámina</i>	<i>Base</i>	<i>Estático</i>	<i>Dinámico</i>
Cobre-níquel	Polyimide	-75 a +175°C	-195 a +205°C
Cobre-níquel	Epoxy	-45 a +99°C	-195 a +175°C
Isoelastic	Polyimide	-	-195 a +205°C
Karma	Fibra de vidrio reforzada	-269 a +290°C	-269 a +400°C
Níquel-cromo	strippable	-260 a +425°C	-260 a +425°C

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

### 2.2.4.3 Adhesivos para galgas extensiométricas

La teoría de operación de las galgas, asume que la tensión en la rejilla de la galga es idéntica a la tensión que sufre la superficie donde la galga es adherida. Para lograrlo, es necesaria la selección de un adhesivo apropiado para la aplicación a desarrollar, además de una cuidadosa instalación de la galga.

Existen una variedad de adhesivos disponibles para la industria y usos comerciales, pocos de ellos poseen las características necesarias para lograr una exitosa instalación de galga. Debido a esto, los fabricantes de galgas han formulado sus propios adhesivos con las características y control de calidad adecuado para asegurar un desempeño aceptable.

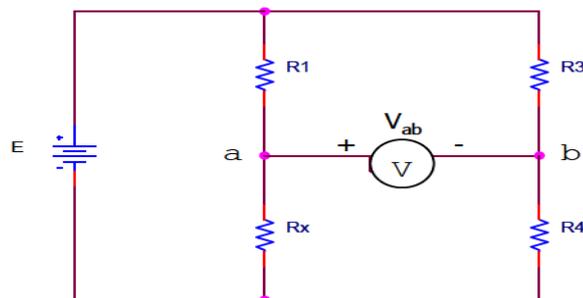
Los adhesivos ideales tienen las siguientes características: Forman una capa delgada, muestran linealidad, corto tiempo de secado, soportan altas elongaciones

y son compatibles con todas las bases de galgas, materiales y superficies sobre las cuales se van a aplicar. Los principales tipos de adhesivos usados con galgas son:

- Cyanoacrylate.
- Epoxies y Epoxy-Phenolic.
- Polyesters.
- Polyimide.
- Nitrocellulose.
- Cemento cerámico.

#### 2.2.4.4 Medición con galgas. Puente de Wheatstone.

El puente de Wheatstone (figura 2.16) es un instrumento eléctrico de medición inventado por Samuel Hunter Christie en 1833, mejorado y popularizado por Charles Wheatstone en 1843. Se utiliza para medir resistencias desconocidas mediante el equilibrio de los brazos del puente. En la figura 2.16 se muestra el diagrama del puente, el cual está formado por una fuente de voltaje  $E$ , un voltímetro  $V$  y cuatro resistencias  $R_1$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  y  $R_x$  que es la resistencia desconocida.



**Figura 2.16.** Puente de Wheatstone.

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

El voltaje que detecta el voltímetro depende de la diferencia de potencial existente entre el punto  $a$  y  $b$  (figura 2.16). Se dice que el puente de Wheatstone está en equilibrio cuando la diferencia de potencial entre el punto  $a$  y  $b$  es igual a cero

volts, lo cual se logra cuando la relación entre las resistencias es igual a la ecuación 2.26:

$$R_1 R_4 = R_x R_3 \quad (2.26)$$

Si el puente no está en equilibrio  $V_{ab} \neq 0$ . Si se supone que tres de sus resistencias son iguales ( $R_1=R_3=R_4=R$ ) y que solo una de ellas tiene un valor diferente ( $R_x \neq R$ ), el voltaje de  $V_{ab}$  es función de la resistencia  $R_x$  y su valor está dado por la ecuación 2.27:

$$V_{ab}(R_x) = V_b - V_a = E \left[ \frac{R_x}{R + R_x} - \frac{1}{2} \right] \quad (2.27)$$

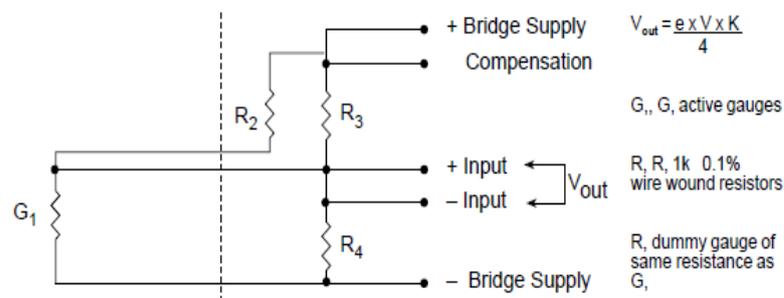
Si el valor de  $R_x$  está cerca de  $R$ , la ecuación 2.22 se puede aproximar a una función lineal dada por la ecuación 2.28.

$$V_{ab}(R_x) = (R_x - R) \frac{E}{4R} \quad (2.28)$$

### - Tipos de puentes de Wheatstone

Esta aplicación es utilizada dependiendo del tipo y complejidad de la medición que se esté efectuando, existen configuraciones diferentes del puente de Wheatstone descritas a continuación:

#### a) Configuración de un cuarto de puente.

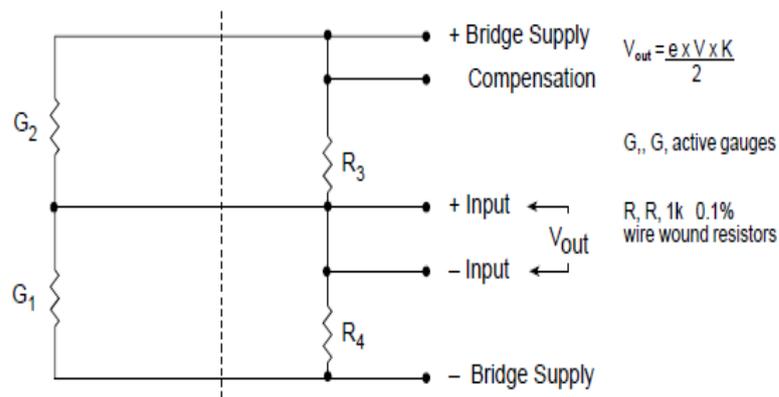


**Figura 2.17.** Configuración de cuarto de puente de Wheatstone.

**Fuente.** Data pack E. RS Data Sheet. 232-5957. ANEXO A3.

Cuando se utiliza sólo una galga y resistores complementando el puente, la configuración se denomina cuarto de puente. En esta configuración los cables conductores que conectan la galga con el puente deben de ser del mismo calibre y si se puede, deben de trenzarse para evitar diferencia de temperatura entre ellos. La Figura 2.17 muestra esta configuración.

**b) Configuración de medio puente.** Esta configuración se ilustra en la figura 2.18, posee un voltaje a la salida que es lineal y dobla aproximadamente la salida del circuito del cuarto de puente.



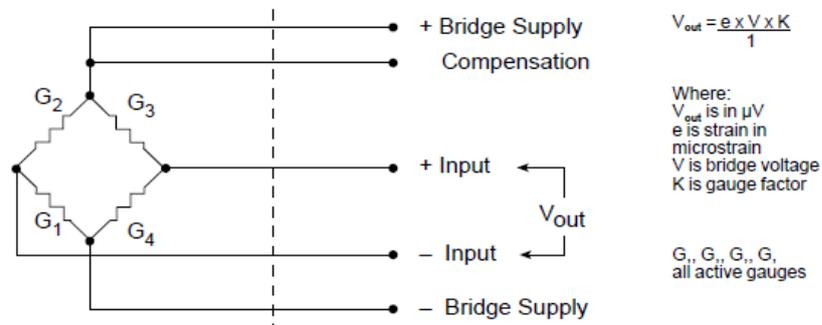
**Figura 2.18.** Configuración de medio de puente de Wheatstone.

**Fuente.** Data pack E. RS Data Sheet. 232-5957. ANEXO A3.

Aquí ambas galgas están activas solo que la segunda galga se coloca transversalmente a la primera galga. Para que esta configuración funcione adecuadamente, la resistencia de una galga debe incrementarse mientras que la de la otra debe disminuir.

**c) Configuración de puente completo.** En esta, los cuatro brazos del puente son utilizados y la sensibilidad del puente aumenta considerablemente, siendo el voltaje de salida cuatro veces el de una configuración de un cuarto de puente. La Figura 2.19 muestra una configuración de puente de Wheatstone completo. Esta configuración se usa cuando el punto donde se efectúa la medición está retirado de los instrumentos de medición y también cuando las condiciones ambientales son

sumamente cambiantes. Su uso principal es en transductores donde se requiere leer unidades diferentes a las de deformación (presión, carga, etc).

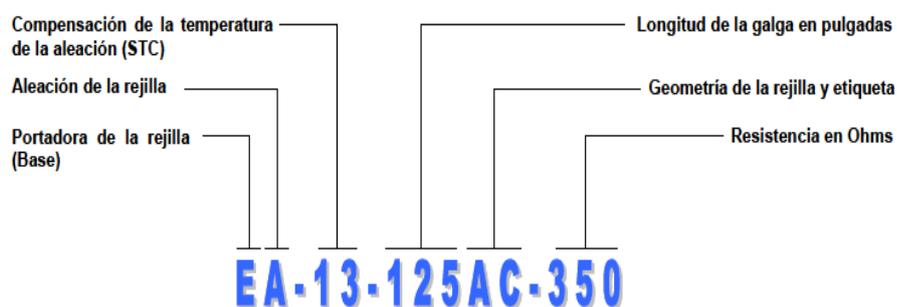


**Figura 2.19.** Configuración de puente completo de Wheatstone.

**Fuente.** Data pack E. RS Data Sheet. 232-5957.ANEXO A3.

#### 2.2.4.5 Selección de la galga extensiométrica

Para esta tarea se toman en cuenta diferentes factores entre los que se pueden mencionar: Duración de la prueba, rango de tensión requerido y temperatura de operación. En la selección de la galga debe considerarse que la combinación entre el material de la estructura, la galga y el adhesivo sean factibles para el pegado. Las galgas de la firma Vishay y RS AMIDATA utilizan un sistema de designación estándar para las galgas extensiométricas, la designación de la galga a utilizar se muestra en la figura 2.20.



**Figura 2.20.** Designación estándar para las galgas extensiométricas de la firma Vishay y RS AMIDATA.

**Fuente.** Diseño, construcción y caracterización de un sensor para medir cargas a tensión por extensometría. Guillermo Amando Ruiz Rojas. Huajuapán de León, Oaxaca 2005.

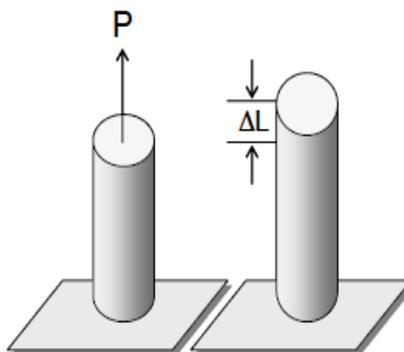
#### 2.2.4.6 Principio básico de operación de la galga

La galga extensiométrica es un transductor pasivo que convierte un desplazamiento mecánico en un cambio de resistencia. Este dispositivo se adhiere a una variedad de materiales con el fin de medir la carga mecánica aplicada al material. La estructura sobre la cual se pega la galga cambia su longitud en función de la fuerza de tensión que experimenta, lo cual hace que la resistencia de la galga cambie. Para medir este cambio, la galga se conecta a un puente de Wheatstone en configuración de medio puente o puente completo (DATA PACK E 232 5957 del ANEXO A3). Antes de que se modele el comportamiento de la galga, es necesario explicar los principales parámetros que afectan a una estructura mecánica cuando se le somete a una fuerza axial.

#### 2.2.4.7 Modelado mecánico de la galga

En todos los materiales el alargamiento producido por una fuerza axial  $P$  (en la dirección de la fuerza), va acompañado por una contracción en la dirección transversal.

Las barras cargadas axialmente se alargan bajo carga de tensión y se acortan bajo cargas de compresión. Una barra prismática es un miembro estructural que tiene un eje longitudinal recto y una sección transversal constante en toda su longitud. Comúnmente se usan barras prismáticas circulares (figura 2.21), pero también existen miembros estructurales de otras formas.



**Figura 2.21.** Ley de Hooke.

**Fuente.** [http://html.rincondelvago.com/leydehooke\\_2.html](http://html.rincondelvago.com/leydehooke_2.html)

En la figura 2.21 se muestra el efecto del alargamiento ( $\Delta l$ ) que experimenta una barra prismática circular cuando es sometida a una tensión ( $P$ ) se obtiene que el alargamiento o compresión que experimenta una barra, tiene una relación que establece que la tensión es directamente proporcional a la longitud e inversamente proporcional al módulo de elasticidad por el área, expresado en la ecuación:

$$\Delta l = \frac{P \cdot L}{E \cdot A} \quad (2.29)$$

Donde:  $\Delta l$  = Alargamiento del metal [m].

$P$  = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

$E$  = Módulo de elasticidad del material [N/m<sup>2</sup>].

$A$  = Área transversal de la estructura [m<sup>2</sup>].

$L$  = Longitud inicial sin tensión [m].

#### 2.2.4.8 Factor de la galga

Cuando la galga no presenta deformación, posee una resistencia nominal ( $R$ ). Una figura de mérito usada para especificar la sensibilidad de la galga, es el factor de la galga ( $GF$ ). Es un parámetro adimensional definido como la unidad de cambio de la resistencia por unidad de cambio de longitud, mostrado en la ecuación:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l} \quad (2.30)$$

Donde:  $GF$  = Factor de la galga.

$R$  = Resistencia nominal de la galga [ $\Omega$ ].

$\Delta R$  = Cambio en la resistencia de la galga [ $\Omega$ ].

$l$  = Longitud inicial del objeto [m].

$\Delta l$  = Cambio en la longitud del objeto [m].

Un factor de galga alto significa un cambio mayor de resistencia, ante un cambio pequeño de longitud, el cual es más fácil de medir que un cambio pequeño de resistencia. Por tal razón, para aplicaciones en medición de tensión o cargas mecánicas es preferible una alta sensibilidad.

Ahora bien, combinando las ecuaciones 2.29 y 2.30 se obtiene la ecuación 2.31, la cual determina el cambio de resistencia en función de la tensión mecánica aplicada a una columna circular.

$$\Delta R = \frac{GF \cdot R \cdot P}{E \cdot A} \quad (2.31)$$

Donde:  $\Delta R$  = Variación de resistencia de la galga [ $\Omega$ ].

$GF$  = Factor de la galga.

$R$  = Resistencia de la galga [ $\Omega$ ].

$P$  = Tensión, fuerza, peso, carga [N].

$E$  = Módulo de elasticidad del material [N/m<sup>2</sup>].

$A$  = Área transversal de la estructura [m<sup>2</sup>].

### 2.2.5 Instrumentación electrónica

Es la parte de la electrónica, principalmente analógica, que se encarga del diseño y manejo de los aparatos electrónicos y eléctricos, sobre todo para su uso en diferentes mediciones. La instrumentación electrónica se aplica en

el sensado y procesamiento de la información proveniente de variables físicas y químicas, a partir de las cuales realiza el monitoreo y control de procesos, empleando dispositivos y tecnologías electrónicas acorde al tipo de aplicación.

#### **2.2.5.1 Acondicionadores**

La señal de salida de un sensor no suele ser válida para su procesamiento. Por lo general requiere de una amplificación para adaptar sus niveles a los del resto de un determinado circuito. Un ejemplo de amplificador es el amplificador de instrumentación AD 620, que es muy inmune a cierto tipo de ruido.

No sólo hay que adaptar niveles, también puede que la salida del sensor no sea lineal o incluso que ésta dependa de las condiciones de funcionamiento (como la temperatura ambiente o la tensión de alimentación) por lo que hay que linealizar el sensor y compensar las variaciones existentes. La compensación puede ser hardware o software, en este último caso ya no es parte del acondicionador.

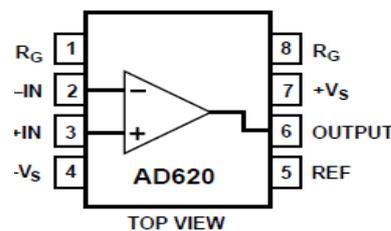
Otras veces la información de la señal no está en su nivel de tensión, puede que esté en su frecuencia, su corriente o en algún otro parámetro, por lo que también se pueden necesitar demoduladores, filtros o convertidores corriente-tensión. Un ejemplo de cuando la información no está en el nivel de tensión puede ser un sensor capacitivo, en el que se necesita que tenga una señal variable en el tiempo (preferentemente sinusoidal).

Un ejemplo clásico de acondicionador es el puente de Wheatstone descrito en la sección de medición con galgas, en el que se sustituyen una o varias impedancias del puente por sensores. A continuación típicamente se coloca un amplificador.

Por último, entre el acondicionador y el siguiente paso en el proceso de la señal puede haber una cierta distancia o un alto nivel de ruido, por lo que una señal de tensión no es adecuada al verse muy afectada por estos dos factores.

1) **Amplificador de instrumentación.** Al implementar un amplificador de instrumentación con componentes discretos, es muy difícil encontrar componentes que sean “del mismo valor” como es el caso de las resistencias, o bien que el voltaje de offset sea muy cercano a cero en el caso de los amplificadores operacionales.

El amplificador de instrumentación de circuito integrado es un circuito que está construido internamente de manera muy similar al circuito de la figura 2.22, sin embargo en la fabricación de este circuito los componentes fueron diseñados para tener solo pequeñas variaciones, las cuales hacen que el circuito funcione de manera adecuada en amplios rangos de ganancia y voltajes de operación. Adicionalmente muchos de los amplificadores de instrumentación durante su producción cuentan con un control de calidad donde se prueban las características de operación de los amplificadores de instrumentación. Un amplificador de alta relación costo/desempeño, es el amplificador **AD620**, cuyo diagrama de terminales se presenta a continuación:



**Figura 2.22.** Diagrama de conexión del amplificador AD620.

**Fuente.** [www.datasheetcatalog.net/es/datasheets\\_pdf/A/D/6/2/AD620.shtml](http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/A/D/6/2/AD620.shtml)

El diagrama de terminales corresponde a un amplificador de instrumentación donde la salida está dada por la ecuación:

$$V_0 = G(V_{+IN} - V_{-IN}) \quad (2.32)$$

Donde:  $V_0$  = Voltaje de salida (OUTPUT)

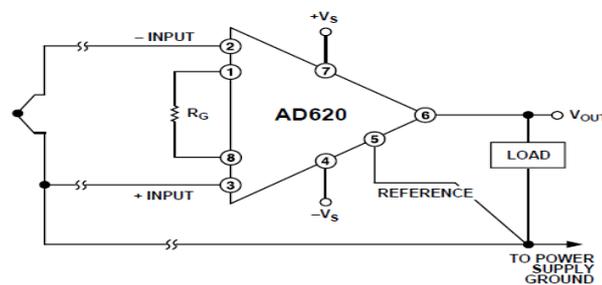
$G$  = Ganancia

$V_{+IN}$  = Voltaje de entrada positiva

$V_{-IN}$  = Voltaje de entrada negativa

Teniendo que establecer la ganancia  $G$  de acuerdo a la necesidad del diseño, sea 1, 10, 100, etc., en función de la resistencia  $R_G$ , descrita en la ecuación 2.33 y en la figura 2.23.

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G - 1} \quad (2.33)$$



**Figura 2.23.** Diagrama de retorno de tierra para las corrientes de polarización con entradas de termopar.

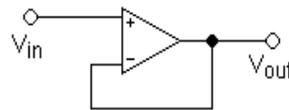
**Fuente.** [www.datasheetcatalog.net/es/datasheets\\_pdf/A/D/6/2/AD620.shtml](http://www.datasheetcatalog.net/es/datasheets_pdf/A/D/6/2/AD620.shtml)

2) **Amplificador Operacional.** Un amplificador operacional (comúnmente abreviado A.O. u Op-Amp), es un circuito electrónico (normalmente se presenta como circuito integrado) que tiene dos entradas y una salida. La salida es la diferencia de las dos entradas multiplicada por un factor ( $G$ ) ganancia. Este tipo de circuitos integrados presentan diversos tipos de configuraciones según la aplicación requerida.

a) **Seguidor.** Es aquel circuito que proporciona a la salida la misma tensión que a la entrada.

Presenta la ventaja de que la impedancia de entrada es elevadísima, la de salida prácticamente nula, y puede ser útil, por ejemplo, para poder leer la tensión de un sensor con una intensidad muy pequeña que no afecte apenas a la medición. De hecho, es un circuito muy recomendado para realizar medidas de tensión lo más exactas posibles, pues al medir la tensión del sensor, la corriente pasa tanto por el

sensor como por el voltímetro y la tensión a la entrada del voltímetro dependerá de la relación entre la resistencia del voltímetro y la resistencia del resto del conjunto formado por sensor, cableado y conexiones.



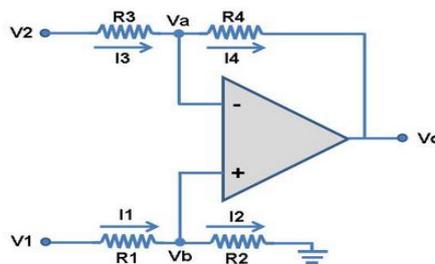
**Figura 2.24.** Esquema básico de un seguidor.

**Fuente.** [http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador\\_operacional](http://es.wikipedia.org/wiki/Amplificador_operacional)

**b) Amplificador diferencial.** Se llama amplificador diferencial a un amplificador cuya salida es proporcional a la diferencia entre sus dos entradas ( $V_1 - V_2$ ). La salida puede ser diferencial o no, pero en ambos casos, referida a tierra. El voltaje de salida  $V_0$  se calcula como:

$$V_0 = \frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2) \quad (2.34)$$

En la figura 2.26 se muestra la configuración básica de un amplificador operacional, donde  $R_3 = R_1$  y  $R_4 = R_2$ .

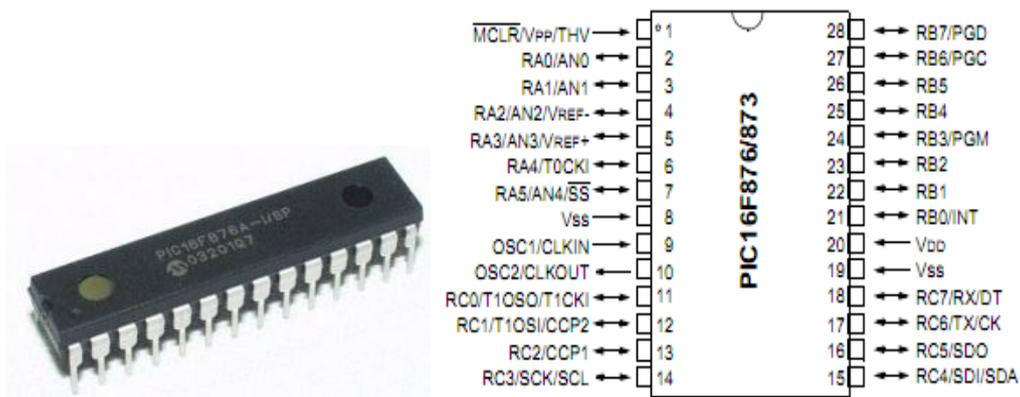


**Figura 2.25.** Amplificador diferencial básico.

**Fuente.** <http://portalbiomedico.com/electronica/amplificadoroperacional/a-plificador-operacional-diferencial-basico-conceptos-basicos.html>

### 2.2.5.2 Digitalización de señales, Microcontroladores

Para que el procesamiento de la señal sea eficaz hay que convertir la señal en digital. La instrumentación también estudia la conversión analógica-digital, así como la conversión digital-analógica.



**Figura 2.26.** Presentación del PIC 16F628A y su diagrama de pines.

**Fuente.** Microcontroladores PIC Programación en Basic. Carlos A. Reyes, Ecuador 2006.

Por otra parte también pueden usarse técnicas de multiplexación de señales en el caso que haya más de una para medir. Una de las formas más utilizadas es la utilización de microcontroladores, que es un circuito integrado que incluye en su interior las tres unidades funcionales de un computador: unidad central de procesamiento, memoria y periféricos de entrada y salida de datos. Son diseñados para reducir el costo económico y el consumo de energía de un sistema en particular.

PIN	NOMBRE	DESCRIPCION
17	RA0/AN0	Pin bidireccional I/O, entrada comparador análogo.
18	RA1/AN1	Pin bidireccional I/O, entrada comparador análogo.
1	RA2/AN2/VREF	Pin bidireccional I/O, entrada comp. análogo y Voltaje de referencia.
2	RA3/AN3/CMP1	Pin I/O, entrada comp. análogo y salida del comparador análogo 1.
3	RA4/T0CKI/CMP2	Pin I/O, entrada reloj TIMER0 y salida del comparador análogo 2.
4	RA5/MCLR/VPP	Pin de entrada, en modo MCLR activa RESET externo.
15	RA6/OSC2/CLKOUT	Pin I/O, entrada oscilador externo, salida de ¼ de la frecuencia OSC 1.
16	RA7/OSC1/CLKIN	Pin I/O, entrada oscilador externo, entrada del reloj externo.
6	RB0/INT	Pin I/O, resistencia Pull-Up programable, entrada de interrupción ext.
7	RB1/RX/DT	Pin I/O, resist. Pull-Up, entrada dato RS232, I/O dato serial asincrónico.
8	RB2/TX/CK	Pin I/O, resist. Pull-Up, salida dato RS232, I/O señal de reloj asincrónico.
9	RB3/CCP1	Pin I/O, resist. Pull-Up, módulo CCP/PWM entrada o salida.
10	RB4/PGM	Pin I/O, resist. Pull-Up, entrada del voltaje bajo de programación.
11	RB5	Pin I/O, resistencia Pull-Up programable.
12	RB6/T1OSO/T1CKI	Pin I/O, resist. Pull-Up, salida oscilador TIMER1, entrada reloj de ICSP.
13	RB7/T1OSI	Pin I/O, resist. Pull-Up, entrada oscilador TIMER1, I/O datos de ICSP.

**Figura 2.27.** Tabla de pines PIC 16F876A con sus funciones especiales.

**Fuente.** Microcontroladores PIC Programación en Basic. Carlos A. Reyes, Ecuador 2006.

### 2.2.5.3 Comunicación

Como se menciona en la sección anterior, la funcionalidad de un microcontrolador depende de la comunicación entre este y una PC, utilizando un puerto de entrada para transmisión de datos, en la actualidad es común utilizar la comunicación serial bajo el protocolo RS 232. (Recommended Standard 232, también conocido como Electronic Industries Alliance RS-232C), que es una interfaz que designa una norma para la realización del intercambio serie, de datos binarios entre un equipo DTE (Equipo terminal de datos) y un equipo DCE (*Data Communication Equipment*, Equipo de Comunicación de datos). En particular, existen ocasiones en que interesa conectar otro tipo de equipamientos, como pueden ser computadores. Evidentemente, en el caso de interconexión entre los mismos, se requerirá la conexión de un DTE (*Data Terminal Equipment*) con otro DTE.

El RS-232 consiste en un conector tipo DB-25 (de 25 pines), aunque es normal encontrar la versión de 9 pines (DB-9), más barato e incluso más extendido para cierto tipo de periféricos. La interfaz RS-232 está diseñada para imprimir documentos para distancias cortas, de hasta 15 metros según la norma, y para velocidades de comunicación bajas, de no más de 20 Kilobits/segundo. A pesar de esto, muchas veces se utiliza a mayores velocidades con un resultado aceptable.

Una manera de conectar a dos dispositivos es mediante comunicaciones serie asíncronas. En ellas los bits de datos se transmiten en serie (uno detrás de otro) y cada dispositivo tiene su propio reloj. Previamente se ha acordado que ambos dispositivos transmitirán datos a la misma velocidad. Los datos serie se encuentran encapsulados en tramas de la forma:

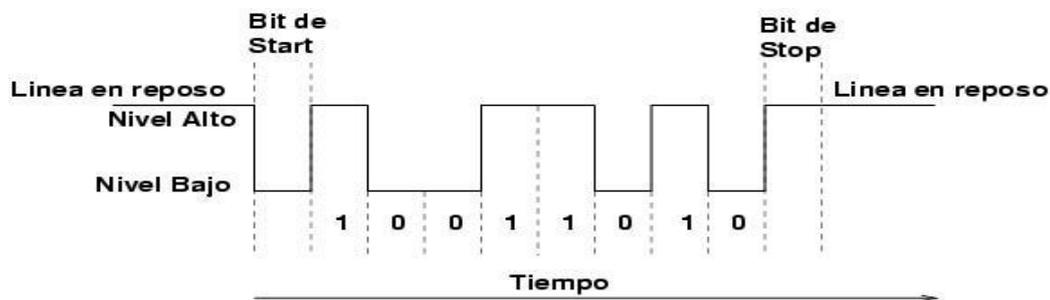


**Figura 2.28.** Comunicación serie asíncrona.

**Fuente.** <http://www.iearobotics.com/proyectos/cuadernos/ct1/ct1.html>

Primero se envía un bit de start, a continuación los bits de datos (primero el bit de mayor peso) y finalmente los bits de STOP. El número de bits de datos y de bits de Stop es uno de los parámetros configurables, así como el criterio de paridad par o impar para la detección de errores. Normalmente, las comunicaciones serie tienen los siguientes parámetros: 1 bit de Start, 8 bits de Datos, 1 bit de Stop y sin paridad.

En la figura 2.29 se puede ver un ejemplo de la transmisión del dato binario 10011010. La línea en reposo está a nivel alto:



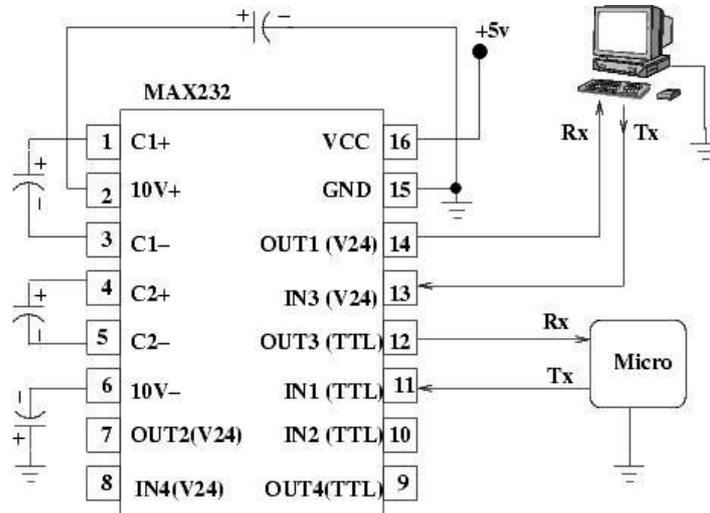
**Figura 2.29.** Transmisión de dato binario.

**Fuente.** <http://www.iearobotics.com/proyectos/cuadernos/ct1/ct1.html>

Adicionalmente se requiere de un MAX232 que es un circuito integrado que convierte los niveles de las líneas de un puerto serie RS232 a niveles TTL (*transistor-transistor logic*, lógica transistor a transistor) y viceversa. Lo interesante es que sólo necesita una alimentación de 5V, ya que genera internamente algunas tensiones que son necesarias para el estándar RS232. Otros integrados que manejan las líneas RS232 requieren dos voltajes, +12V y -12V.

Este chip permite adaptar los niveles RS232 y TTL, permitiendo conectar un PC con un microcontrolador. Sólo es necesario este chip y 4 condensadores electrolíticos de 22 microfaradios. El circuito integrado posee dos convertidores de nivel TTL a RS232 y otros dos que, a la inversa, convierten de RS232 a TTL. Estos convertidores son suficientes para manejar las cuatro señales más utilizadas del puerto serie del PC, que son TX, RX, RTS y CTS. TX es la señal de transmisión de datos, RX es la de recepción, y RTS y CTS se utilizan para

establecer el protocolo para el envío y recepción de los datos. El esquema es el siguiente:



**Figura 2.30.** Diagrama de conexión PC-microcontrolador con el MAX232.

**Fuente.** <http://www.iearobotics.com/proyectos/cuadernos/ct1/ct1.html>

### 2.2.5.3.1 Conector DB9<sup>16</sup>

El conector DB9 (originalmente *DE-9*) es un conector analógico de 9 clavijas de la familia de conectores D-Subminiature (D-Sub o Sub-D).

El conector DB9 se utiliza principalmente para conexiones en serie, ya que permite una transmisión asíncrona de datos según lo establecido en la norma RS-232 (RS-232C).



**Figura 2.31.** Conector DB9, numeración de pines macho y hembra.

**Fuente.** <http://es.kioskea.net/contents/elec/connecteur-prise-db9.php3>

<sup>16</sup> <http://es.kioskea.net/contents/elec/connecteur-prise-db9.php3>

**Tabla 2.9.** Descripción de pines de conector DB9

<b>Número de PIN</b>	<b>Descripción</b>
1	CD: Detector de transmisión
2	RXD: Recibir datos
3	TXD: Transmitir datos
4	DTR: Terminal de datos lista
5	GND: Señal de tierra
6	DSR: Ajuste de datos listo
7	RTS: Permiso para transmitir
8	CTS: Listo para enviar
9	RI: Indicador de llamada

**Autor.** Diego Amancha.

Diseñado para enlazar la computadora y módems externos de baja velocidad, para líneas telefónicas, etc. Actualmente, el estándar es usado principalmente en aplicaciones industriales, para la transmisión por cable de datos entre la computadora central y unidades terminales remotas, a bajas velocidades (< 19.2 kbps) y distancias de hasta 50 metros.

### **2.2.6 Introducción a LabView**

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Labview permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactivo basado en software. Se puede diseñar especificando su sistema funcional, su diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. Labview es a la vez compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación, como por ejemplo Matlab. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración

con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos, desde desarrollos educativos hasta proyectos industriales.

### 2.2.6.1 Adquisición de datos

La plataforma de Adquisición de Datos en LabVIEW contiene una plataforma para la NIDAQ tradicional y una para NI-DAQmx. Los VIs tradicionales están divididos por el tipo de medición, los VIs DAQmx están divididos por el tipo de tarea.

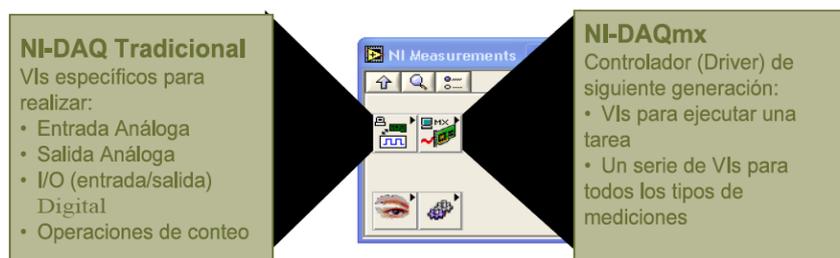


Figura 2.32. Opciones de adquisición de datos en LabView.

Fuente. Labview 7.0.

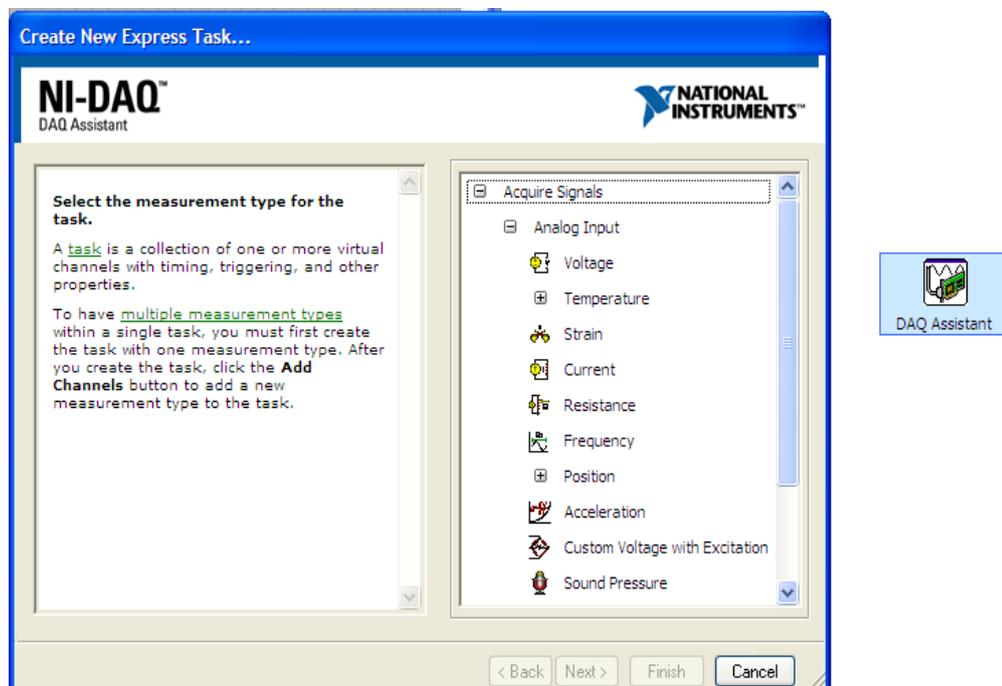


Figura 2.33. Interfaz para adquisición de datos DAQ.

Fuente. Labview 7.0.

Antes de utilizar la Adquisición de Datos de VIs se debe completar varios pasos. Los dispositivos deben se configurados para las computadoras en esta clase.

1. El software NI-DAQ debe estar instalado en la computadora.
2. Debe tener instalado una tarjeta E-series DAQ y esta debe ser configurada usando el Explorador de Automatización & Mediación (Measurement & Automation Explorer (MAX)).

En la figura 2.33 la ventana de ayuda del DAQ (DAQ Assistant) que puede ser configurada rápidamente para leer temperaturas de una tarjeta de Adquisición de Datos (DAQ).

#### **2.2.6.2 Conexión de hardware**

Hay muchos arreglos diferentes posibles de hardware para adquirir datos. Todos los sistemas de la Adquisición de Datos requieren algún tipo de conexión terminal que acepta una señal de su transductor y lo transmite a la tarjeta DAQ. Cuatro de estos bloques de terminales son el BNC-2120, SC-2075, SCB-68, y NI-ELVIS.

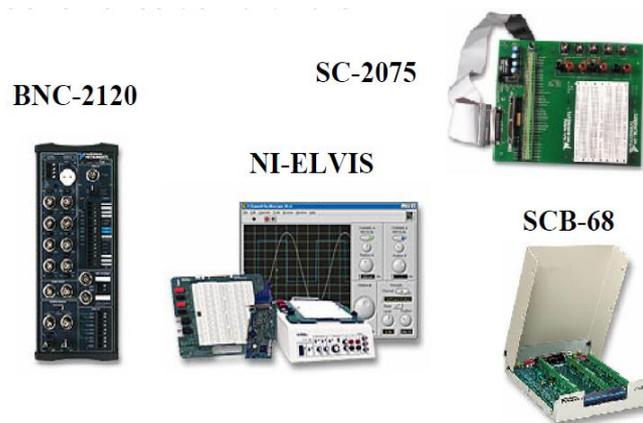
El BNC-2120 es un bloque de conexiones aislado (shielded) con conectores BNC de señal-etiquetada para la conectividad fácil a su dispositivo DAQ. También proporciona un generador de funciones, encoder (codificador) de cuadratura, referencia de la temperatura, conector de termocupla, y LED para probar la funcionalidad del hardware dispuesto por el usuario.

El SC-2075 proporciona áreas para conexión (breadboard areas) para hacer prototipos y conectividad BNC y de terminales de resorte (spring terminal). Los  $\pm 15$  V de alimentación fija así como la alimentación ajustable de 0 a 5 V y LEDs hacen del SC-2075 un instrumento ideal para laboratorios académicos.

El SCB-68 es un bloque de conexión de E/S (I/O) aislado (shielded) para señales resistentes y de bajo-ruido. Incluye dos áreas de conexión (breadboard areas) de

propósito-general así como un sensor de temperatura IC para la compensación de empalme frío en mediciones de temperatura.

NI-ELVIS (Sistema de Laboratorio Educacional de Instrumentación Virtual) es un ambiente de prototipo y diseño basado en LabView y consiste de instrumentos virtuales, un dispositivo de adquisición de datos multifuncional, y en una estación de trabajo con un banco y tablero de diseño.



**Figura 2.34.** Hardware requerido para adquisición de datos.

**Fuente.** <http://es.kioskea.net/contents/elec/connecteur-prise-db9.php3>

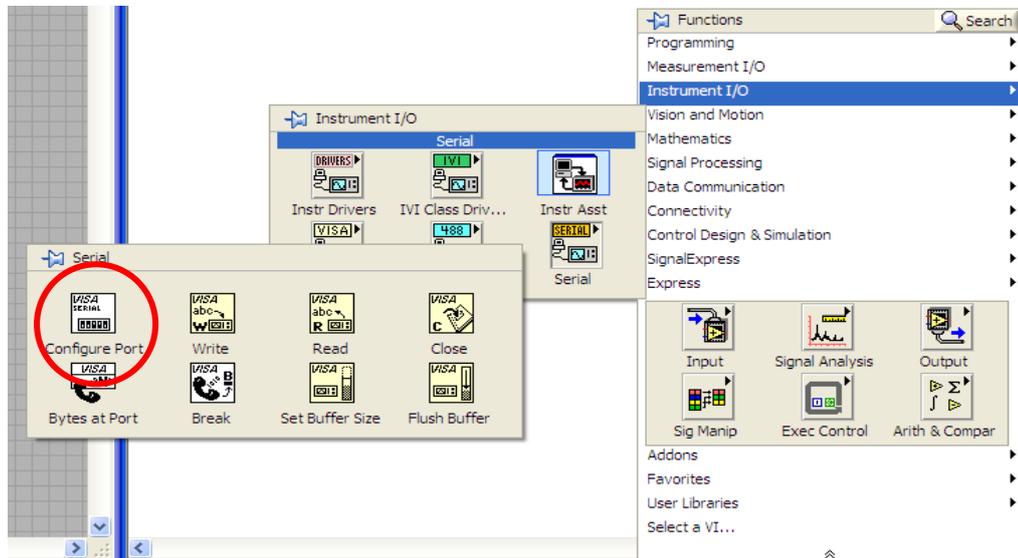
### 2.2.6.3 Comunicación por el puerto serial con LabView, VISA

Se transmite la información por un puerto que puede ser el COM1, COM2, etc., de forma serial, es decir a través de un solo cable, y cada bit pasa uno tras otro a alta velocidad dependiendo del tipo de datos enviados o recibidos. Se debe tener cuidado al momento de transmitir datos debido al tipo, sean estos de tipo binario, decimal, hexal o ASCII.

LabView cuenta con funciones para iniciar, escribir y leer el puerto serial, controlados por la función VISA referida en esta sección.

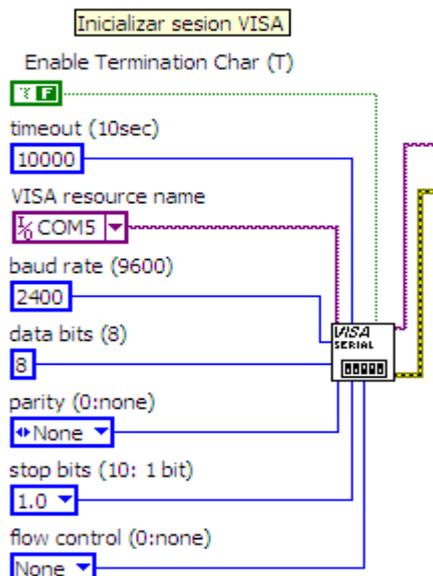
Dependiendo de la necesidad del usuario la configuración puede variar como se muestra en la figura 2.35. Una vez transmitidos los datos éstos serán procesados, almacenados o transformados de acuerdo al requerimiento para el cual ha sido configurado.

Para tener acceso al puerto serial usando LabView se debe iniciar una sesión VISA. La configuración del tipo de comunicación serial se hace con “VISA configure serial port”, que se puede encontrar en Functions >> Instrument I/O >> Serial >> VISA configure serial port.



**Figura 2.35.** Ubicación para configuración de puerto serial en LabView.

**Fuente.** Labview 7.0. **Autor.** Diego Amancha.



**Figura 2.36.** Función VISA, ejemplo de configuración de puerto serial.

**Fuente.** Labview 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

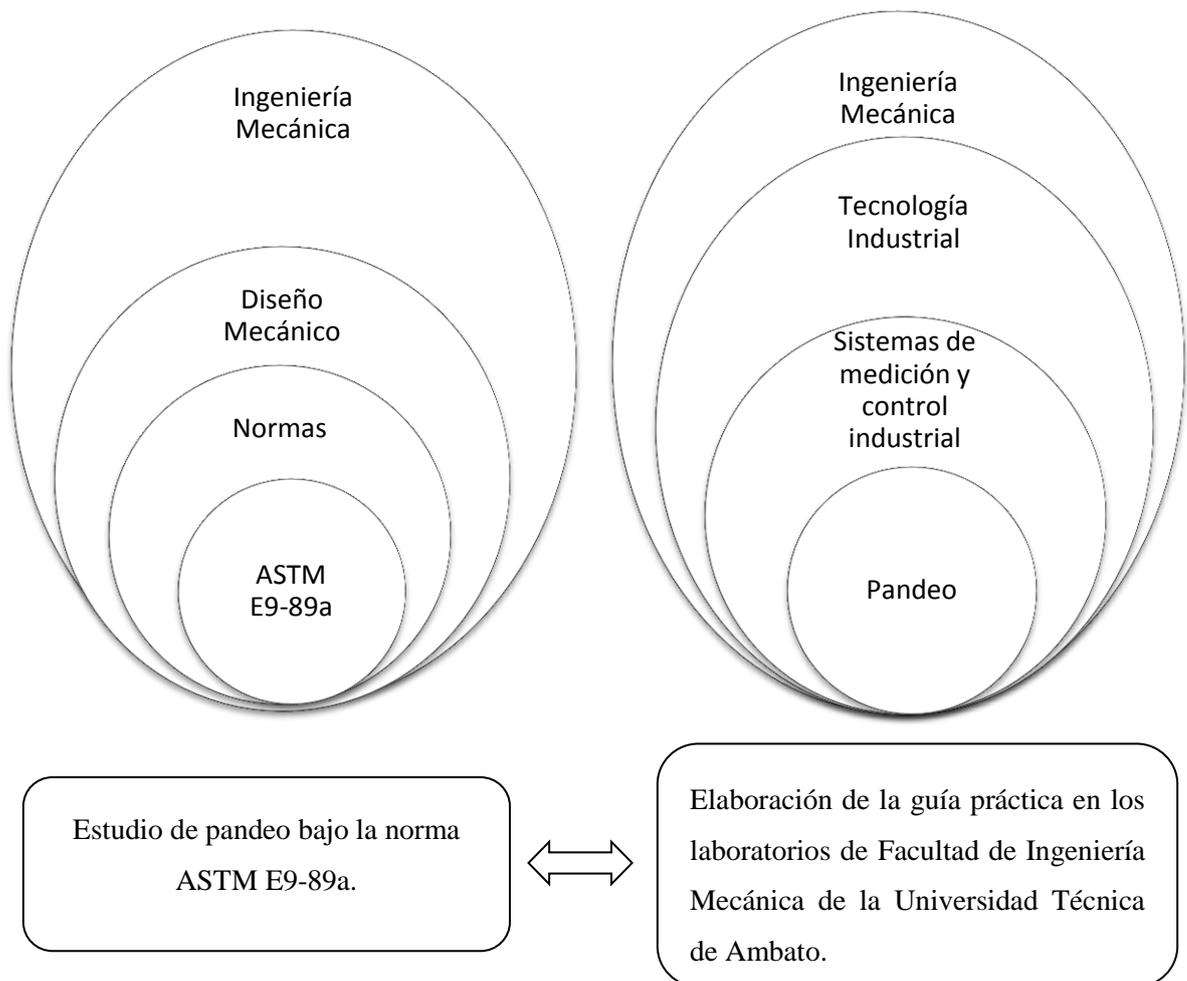
## 2.3 FUNDAMENTACIÓN LEGAL

➤ Norma ASTM E9-89a.

Siendo ésta norma un compendio de las siguientes Normas de referencia:

- E 6 Terminología relativa a los métodos de pruebas mecánicas.
- E 83 prácticas para la Verificación y clasificación de Extensómetro
- E 177 Prácticas de utilización Condiciones de la precisión y el sesgo en la norma ASTM
- E 251 Métodos de prueba para determinar características de rendimiento metálico en condiciones de servicio, Medidores de resistencia de tensión.

## 2.4 CATEGORÍAS FUNDAMENTALES



## **2.5 HIPÓTESIS**

El estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a servirá para la elaboración de la guía práctica en los laboratorios de Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

## **2.6 SEÑALAMIENTO DE VARIABLES**

### **2.6.1 Variable independiente**

Estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a.

### **2.6.2 Variable dependiente**

Elaboración de la guía práctica en los laboratorios de Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

## **CAPÍTULO III**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 MODALIDAD BÁSICA DE LA INVESTIGACIÓN**

En el presente trabajo de tesis predomina lo cuantitativo de lo cualitativo, ya que en las variables dependiente como independiente se definen bajo indicadores numéricos para detallar dimensionamientos, deformaciones, propiedades de las muestras, esfuerzos, tiempos de ejecución de las pruebas; en medida del esfuerzo al que serán sometidas las probetas que la Norma ASTM E9-89a prescribe.

#### **3.2 NIVEL Y TIPO DE INVESTIGACIÓN**

##### **3.2.1 Nivel**

Es indispensable la documental bibliográfica al requerir un fundamento científico para este trabajo de investigación, siendo necesario el respaldo de la bibliografía que corresponde al pandeo de columnas, métodos de pruebas, registros de estudios previos y sus correspondientes resultados y conclusiones.

Claramente se hace necesario la investigación de laboratorio, por cuanto se requiere del espacio físico y equipos pertinentes a ensayos de pandeo, de acuerdo a los requerimientos del procedimiento para cada prueba, adquisición de datos y sus posteriores comparaciones.

De aquí que la histórica es de suma relevancia, al comparar datos obtenidos de ensayos ya realizados por distintos investigadores, tomando en cuenta sus recomendaciones para un mejor desarrollo del presente trabajo de tesis.

### **3.2.2 Tipo**

En el desarrollo del presente trabajo la investigación explicativa intenta dar cuenta de un aspecto de la realidad, explicando su significatividad dentro de una teoría de referencia, a la luz de leyes o generalizaciones que dan cuenta de hechos o fenómenos que se producen en determinadas condiciones. Es así que nos regiremos a una Norma de conocimiento y aplicación mundial, direccionada al estudio de pandeo bajo métodos de prueba en probetas de diversos materiales y dimensiones, según los requerimientos del estudio.

De ahí que mediante la investigación descriptiva no se limita a la recolección de datos, sino que además se identifican relaciones que existen entre dos o más variables, o entre una y otra prueba, con el fin de determinar la relación entre resultados teóricos y resultados de pruebas de laboratorio que ayuden a un mejor entendimiento del pandeo, al aplicar una carga a determinada columna. Por lo cual la investigación en este trabajo no se limita a uno o varios tipos, más bien a una correlación entre todas las posibles; relacionadas con el fin de describir y dar solución a una particularidad, el pandeo.

### **3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA**

De acuerdo al Anexo Sección D, ítem 8.9, correspondiente a la norma ASTM E9-89a, se requieren de 5 a 10 especímenes, de ahí se ha establecido como población y muestra el máximo de 10 probetas de acero AISI 1018 de 1,25 y 12,5 pulgadas de diámetro y longitud respectivamente para la realización de pruebas en la máquina SOIL TEST CT-769E de propiedad de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Se debe acotar que el número de probetas se mantendrá en 10 unidades si en el estudio se llegare a determinar cambio de geometría en las probetas.

### 3.4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

#### 3.4.1 Variable Independiente. Estudio de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS BÁSICOS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>Al someter un elemento a un esfuerzo de compresión, puede aparecer un fenómeno de inestabilidad elástica, el pandeo, que se manifiesta por la aparición de desplazamientos transversales a la dirección principal de compresión.</p> <p>Siendo el pandeo un fenómeno muy común, su estudio está reglamentado bajo diversas normas.</p>	<p>Esfuerzo de compresión</p> <p>Pandeo</p> <p>Norma</p>	<p>¿Cuáles son sus efectos?</p> <p>¿Cuál es el factor de seguridad en columnas sometidas a esfuerzos de compresión?</p> <p>¿Cuáles son los factores que influyen en la aparición del pandeo?</p> <p>¿Cómo se determina el pandeo?</p> <p>¿Bajo qué norma se realiza el estudio de pandeo?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Deflexión.</li> <li>- Reducción de volumen.</li> <li>- Falla por Pandeo.</li> <li>- Material del elemento</li> <li>- De 2 a 8</li> <li>- Geometría</li> <li>- Tipo de empotramiento C</li> <li>- Ecuación de Euler para columnas largas.</li> <li>- Ecuación de J.B Jhonson para columnas cortas.</li> <li>- ASTM E9-89<sup>a</sup></li> </ul>	<p>Laboratorios</p> <p>Catálogos</p> <p>Laboratorios</p> <p>Catálogos</p> <p>Registros oficiales</p> <p>Normas ASTM</p>

**Elaborado por:** Diego Amancha

**3.4.2 Variable dependiente.** Elaboración de la guía práctica en los laboratorios de Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

CONCEPTUALIZACIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEMS BÁSICOS	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS
<p>La guía práctica es una herramienta de trabajo única, que explica los procedimientos prácticos aplicados a un determinado estudio normalizado y desarrollado en base a una necesidad; establecidos en laboratorios si el estudio así lo requiere.</p>	<p>Normalización</p> <p>Desarrollo de la práctica</p>	<p>¿Bajo qué normalización se sustenta el procedimiento práctico de este estudio?</p> <p>¿Cuál es el procedimiento práctico a seguir en este estudio?</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Norma ASTM E9-89a</li> <li>- Selección de material de la probeta.</li> <li>- Selección del tipo de probeta</li> <li>- Selección del sensor.</li> <li>- Selección del sistema de adquisición y procesamiento de datos.</li> <li>- Ejecución del ensayo de compresión.</li> <li>- Elaboración del informe correspondiente a la práctica.</li> </ul>	<p>Observación directa</p> <p>Laboratorios</p> <p>Catálogos</p> <p>Registros oficiales</p> <p>Normas</p>

**Elaborado por:** Diego Amancha

### **3.5 PLAN DE RECOLECCIÓN DE LA INFORMACIÓN**

En esta investigación se empleará principalmente la observación directa, en un primer plano, en cuanto a los aspectos más superficiales como la preparación de materiales a utilizarse, acondicionamiento del medio, supervisión de equipos y verificación del proceso de cada ensayo. Posteriormente se utilizará una observación estructurada para establecer de antemano una pauta de observación explícita en que se detalla qué datos habremos de recoger, los datos se pueden cuantificarse más fácilmente, debido a su homogeneidad, y poder tener la certeza de no haber olvidado registrar ninguno de los aspectos principales del problema en estudio, como es el pandeo de columnas.

### **3.6 PLAN DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN**

- Buscar las mejores fuentes de información.
- Comparar las distintas fuentes de información obtenidas para realizar un compendio de todas y tener una idea clara del tema de investigación; primordialmente se verificará la existencia de una norma específica para el pandeo de columnas.
- Verificar la información obtenida, para desarrollar la investigación bajo estricta relación con los datos obtenidos, por lo que se buscará dentro de las normas ASTM un ítem específico de aplicación para estudio de pandeo.
- Valorar si la información recogida es suficiente para el desarrollo de la investigación, debido a que una sola Norma no abarca todos los temas que aparecen en una investigación, por cuanto normalmente tienen referencias de temas adicionales que pueden ser aplicables en este estudio.
- Recolectar los datos de prácticas realizadas de acuerdo a la Norma establecida en esta investigación.

- Determinar y realizar los correspondientes informes para la recolección de datos y resultados
- Tabular los datos y sus correspondientes resultados, para su representación en el informe pertinente.
- Analizar los datos teóricos y los datos recogidos en pruebas experimentales.
- Comparar los datos teóricos con los datos experimentales.
- Establecer una relación entre datos teóricos con los datos experimentales.
- Comparar datos de pruebas determinando la funcionalidad del equipo para pruebas de pandeo.
- Desarrollar un informe final, estableciendo procedimientos, resultados, conclusiones y recomendaciones que detallen la realización de un ensayo de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

##### 4.1.1 Pruebas de compresión

De acuerdo a la norma ASTM E9-89a, *Sección 2.2.3 y Anexos Sección D*; se determinó trabajar con probetas de acero AISI 1018 de 1,25 pulgadas de diámetro y 12,5 pulgadas de longitud de acuerdo a la tabla 2.5, por ser la probeta más larga con la que se tiene una mejor visibilidad del pandeo. En la tabla 4.1 se muestran los datos obtenidos de la compresión de 10 probetas ensayadas en la máquina SOIL TEST CT-769E de propiedad de la Universidad Técnica de Ambato y que se encuentra en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, la misma que ha sido adaptada para ensayos mecánicos con la colocación de bases de protección en la parte inferior y superior de la máquina.

##### 4.1.1.1 Procedimiento

Una vez seleccionado el tipo de probeta y el material para las pruebas de compresión se procede con la realización del ensayo en la máquina ya descrita:

- 1) Adquisición y verificación de probetas, Figura 4.1.
- 2) Verificación de máquina universal de compresión SOIL TEST CT-769E, adaptada para ensayos mecánicos. Figura 4.2.
- 3) Colocación de la probeta y ejecución del ensayo de compresión. Figura 4.3.
- 4) Toma de resultados, tabla 4.1.
- 5) Realización del segundo banco de pruebas con sensor extensiométrico.
- 6) Toma de resultados, tabla 4.2.



**Figura 4.1.** Probetas ASTM E9-89a, largas.

**Autor:** Diego Amancha.



**Figura 4.2.** Equipo SOIL TEST CT-769E.

**Autor:** Diego Amancha.



**Figura 4.3.** Pruebas de compresión, probetas UTA-01 de acero AISI 1018.

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 4.1.** Fuerza de compresión aplicada, probetas ASTM; según tabla 2.5

Nº de probeta	Fuerza (lb)	Observación
1	86000	
2	87000	
3	85000	Mínima fuerza
4	79000	
5	88000	
6	80000	
7	85000	
8	88000	Máxima fuerza
9	87000	
10	85000	

**Autor:** Diego Amancha.

El segundo banco de pruebas se realizó con probetas de dimensionamiento propio del autor, de 0,5 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud, considerando que las medidas expuestas cumplan la condición de la ecuación 2.23, y que cuyo resultado sea similar al obtenido con las probetas normalizadas, es decir:

Para probetas ASTM E9-89a, tabla 2.5:

$$\rho = r_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi d^4/64}{\pi d^2/4}} = \frac{d}{4} = \frac{1,25plg}{4} = 0,3125plg$$

$$Relación\ de\ esbeltez = \frac{L}{r_{min}} = \frac{12,5plg}{0,3125plg} = 40$$

$$\left(\frac{L}{\rho}\right)_i = \left(\frac{2 * \pi^2 * C * E}{S_y}\right)^{1/2} = \left(\frac{2 * \pi^2 * 3,75 * 29700KPSI}{53,7KPSI}\right)^{1/2} = 202,33$$

$L/\rho < (L/\rho)_i$  Se emplea la ecuación de Johnson.

Para probetas UTA-01 con  $d = 0,5plg$  y  $L = 10plg$ .

$$\rho = r_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi d^4/64}{\pi d^2/4}} = \frac{d}{4} = \frac{0,5plg}{4} = 0,125plg$$

$$Relación\ de\ esbeltez = \frac{L}{r_{min}} = \frac{10plg}{0,125plg} = 80$$

$$\left(\frac{L}{\rho}\right)_i = \left(\frac{2 * \pi^2 * C * E}{S_y}\right)^{1/2} = \left(\frac{2 * \pi^2 * 3,75 * 29700KPSI}{53,7KPSI}\right)^{1/2} = 104,49$$

$L/\rho < (L/\rho)_i$  Se emplea la ecuación de Johnson.

Con lo que se demuestra que el dimensionamiento establecido por el autor se encuentra dentro de los parámetros que la tabla 4.5 expone para este tipo de ensayos.

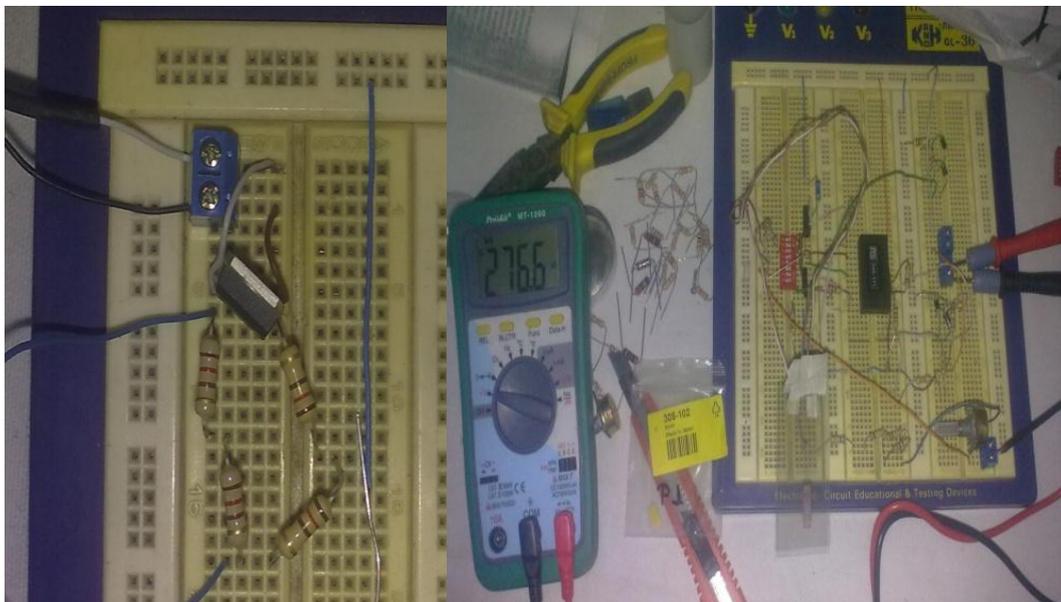
**Tabla 4.2.** Fuerza de compresión aplicada, probeta UTA-01.

Nº de probeta	Fuerza (lb)	Observación
1	8100	Máxima fuerza
2	7900	
3	8000	
4	8000	
5	7800	
6	7500	
7	7800	
8	7500	Mínima fuerza
9	8000	
10	8000	

**Autor:** Diego Amancha.

#### 4.1.2 Acondicionamiento de extensómetro

Una vez realizadas las primeras pruebas de compresión para determinar la carga mínima y máxima que soportan las probetas descritas se procede a verificar la aplicabilidad de utilizar galgas extensiométricas como un sistema de extensómetro que la Norma ASTM E9-89a indica en la *Sección 2.2.3* tomada de los *Anexos Sección D, ítem 8.4.1*; se coloca el dispositivo seleccionado con el acondicionamiento de la señal mediante la configuración de cuarto de puente de Wheatstone, *sección 2.2.4.3.a*), con una alimentación de 5V, voltaje establecido bajo experimentación.

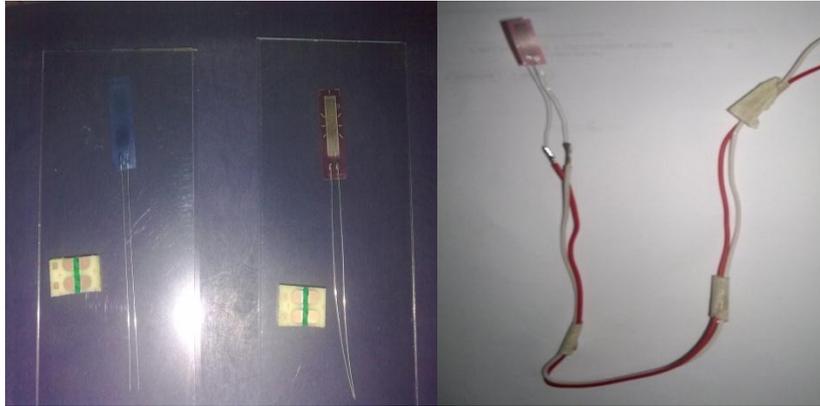


**Figura 4.4.** Pruebas experimentales con galgas extensiométricas.

**Autor:** Diego Amancha.

La utilización de galgas extensiométricas se fundamenta en los documentos de referencia de la Norma ASTM E9-89a, es decir en la Norma ASTM E 83 de Prácticas para la verificación y clasificación de extensómetros y la Norma ASTM E 251 de Métodos de prueba para características de rendimiento metálico en condiciones de servicio de medidores de resistencia a la tensión (galgas extensiométricas), se debe indicar que el tipo de galga extensiométrica se tomó de las recomendaciones del *ANEXO A3, Figura 1*.

La ubicación del sensor obedece a lo descrito en la *sección 2.2.3.8* sobre Procedimientos ASTM E9-89a, en la que se indica que el sensor debe colocarse a la mitad de la longitud de la probeta o al menos a una distancia equivalente a un diámetro de separación del extremo de ésta.



**Figura 4.5.** Preparación de galga extensiométrica.

**Autor:** Diego Amancha.



**Figura 4.6.** Pegado de la galga en la probeta de acero AISI 1018 y ejecución de pruebas de compresión.

**Autor:** Diego Amancha.

En las siguientes tablas se describe el voltaje medido con la galga completamente estática,  $V_{in}$ ; y con la galga flexionada por la compresión máxima,  $V_{fn}$ , determinado al ejercer compresión en las probetas; las pruebas se realizaron en la máquina SOIL TEST -769E.

**Tabla 4.3.** Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 01.

N°	Vin (mV)	Vfn (mV)
1	9,20	6,00
2	8,40	5,10
3	8,00	4,30
4	7,80	3,00
5	7,60	2,80
6	7,40	2,30
7	7,00	2,00
8	6,40	1,60
9	6,00	1,30
10	5,20	1,00
11	4,40	0,70
12	3,10	0,40
13	2,80	-1,60
14	3,70	-5,00
15	2,40	-3,00
16	2,30	-6,40
17	2,20	-3,50
18	2,30	-5,00
19	2,70	-1,20
20	2,40	-4,30

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 4.4.** Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 02.

<b>Nº</b>	<b>Vin (mV)</b>	<b>Vfn (mV)</b>
1	9,40	7,00
2	8,30	6,00
3	8,10	4,80
4	7,60	3,30
5	7,40	2,90
6	7,20	2,30
7	7,00	2,00
8	6,60	1,80
9	6,30	1,90
10	5,50	1,50
11	4,00	0,55
12	3,30	0,43
13	2,60	-1,40
14	3,50	-5,00
15	2,20	-3,00
16	2,50	-6,60
17	2,30	-3,50
18	2,40	-5,00
19	2,50	-2,00
20	2,70	-2,30

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 4.5.** Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 03.

Nº	Vin (mV)	Vfn (mV)
1	9,00	6,30
2	8,40	5,00
3	7,90	4,40
4	7,80	3,00
5	7,50	2,80
6	7,30	2,50
7	7,00	2,10
8	6,00	1,20
9	5,80	1,10
10	5,20	1,00
11	4,40	0,70
12	3,10	0,40
13	2,80	-1,60
14	3,70	-5,00
15	2,40	-4,30
16	2,30	-6,40
17	2,20	-3,50
18	2,30	-5,30
19	2,70	-1,50
20	2,40	-4,30

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 4.6.** Voltaje emitido por la galga de acero, prueba 04.

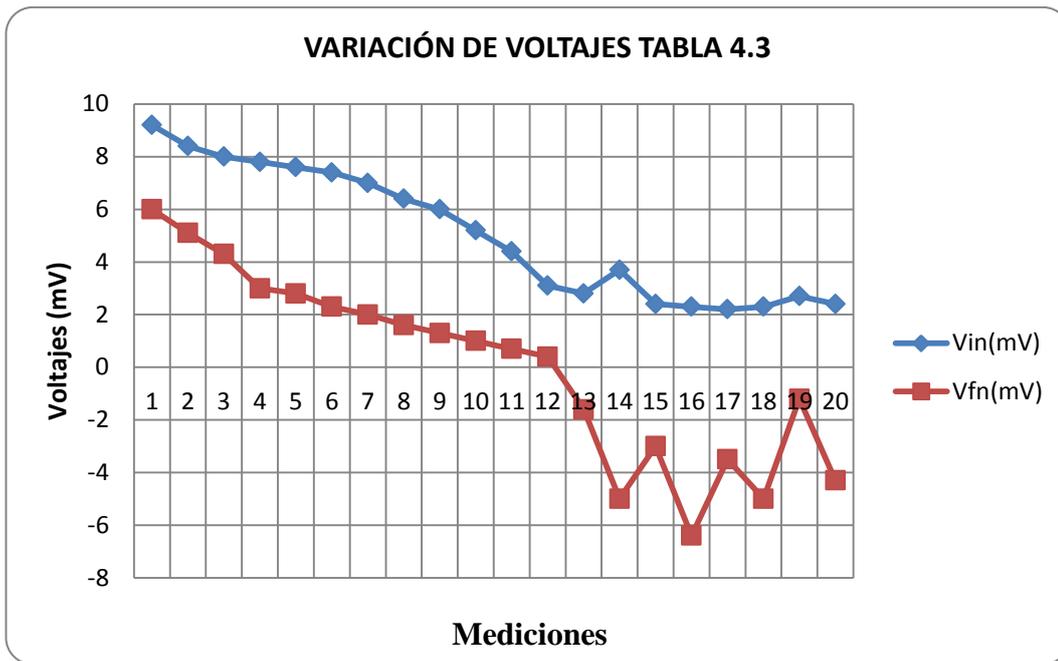
<b>Nº</b>	<b>Vin (mV)</b>	<b>Vfn (mV)</b>
1	9,50	6,90
2	8,40	5,32
3	8,20	4,00
4	7,90	3,00
5	7,50	2,80
6	7,32	2,30
7	7,10	2,20
8	6,50	1,70
9	6,10	1,00
10	5,40	0,90
11	4,60	0,80
12	3,30	0,20
13	2,90	-1,70
14	3,50	-5,60
15	2,30	-3,30
16	2,20	-5,40
17	2,20	-3,70
18	2,40	-4,80
19	2,50	-5,70
20	2,20	-3,50

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 4.7.** Voltaje emitido por la galga de aluminio, prueba 05.

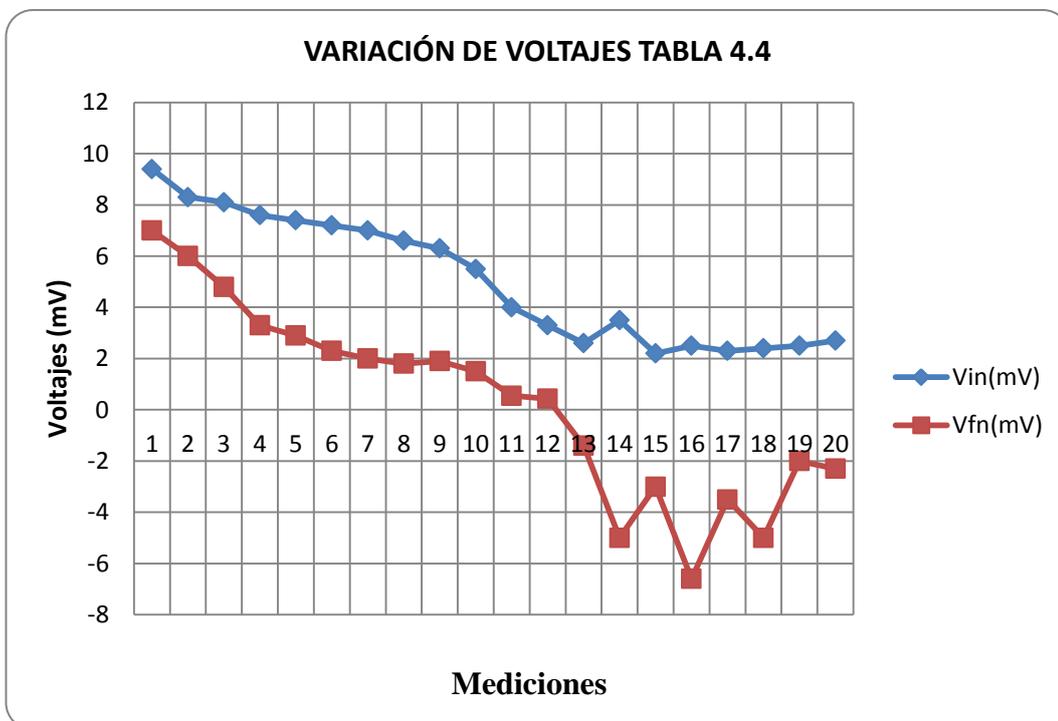
<b>N°</b>	<b>Vin (mV)</b>	<b>Vfn (mV)</b>
1	9,10	6,50
2	8,60	5,30
3	8,20	4,50
4	7,60	3,10
5	7,30	2,50
6	7,00	2,00
7	6,80	2,00
8	6,50	1,50
9	6,00	1,30
10	5,20	1,00
11	4,40	0,70
12	3,10	0,40
13	2,80	-1,60
14	3,70	-5,00
15	2,20	-3,50
16	2,30	-6,40
17	2,20	-3,50
18	2,30	-5,00
19	2,40	-4,30
20	2,70	-1,20

**Autor:** Diego Amancha.



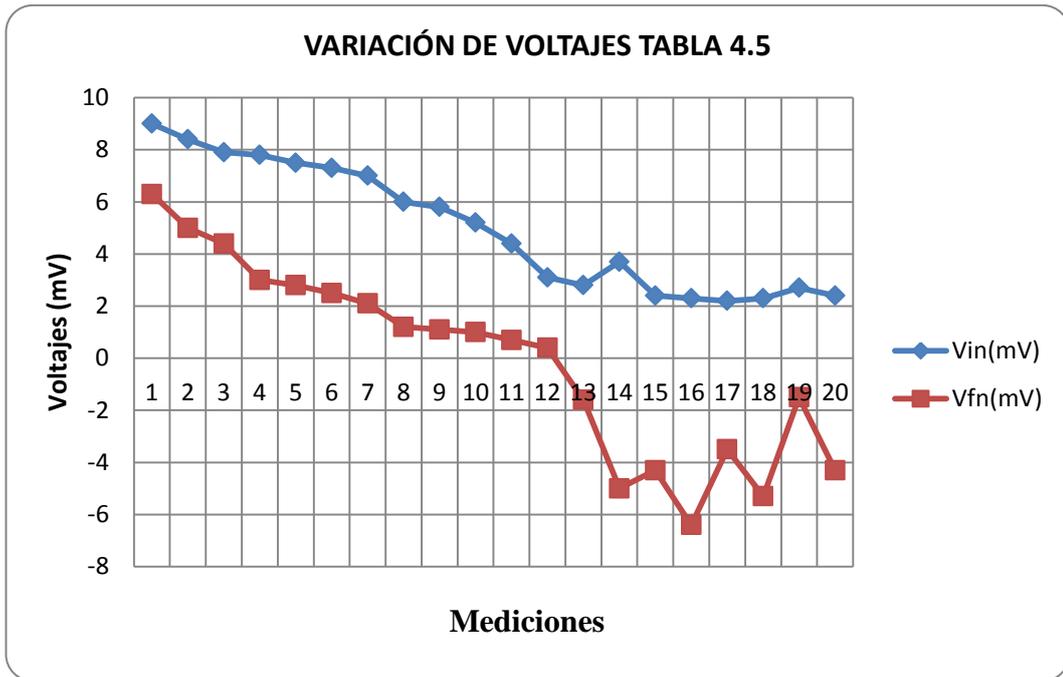
**Figura 4.7.** Curvas de voltaje, Tabla 4.3.

**Autor:** Diego Amancha.



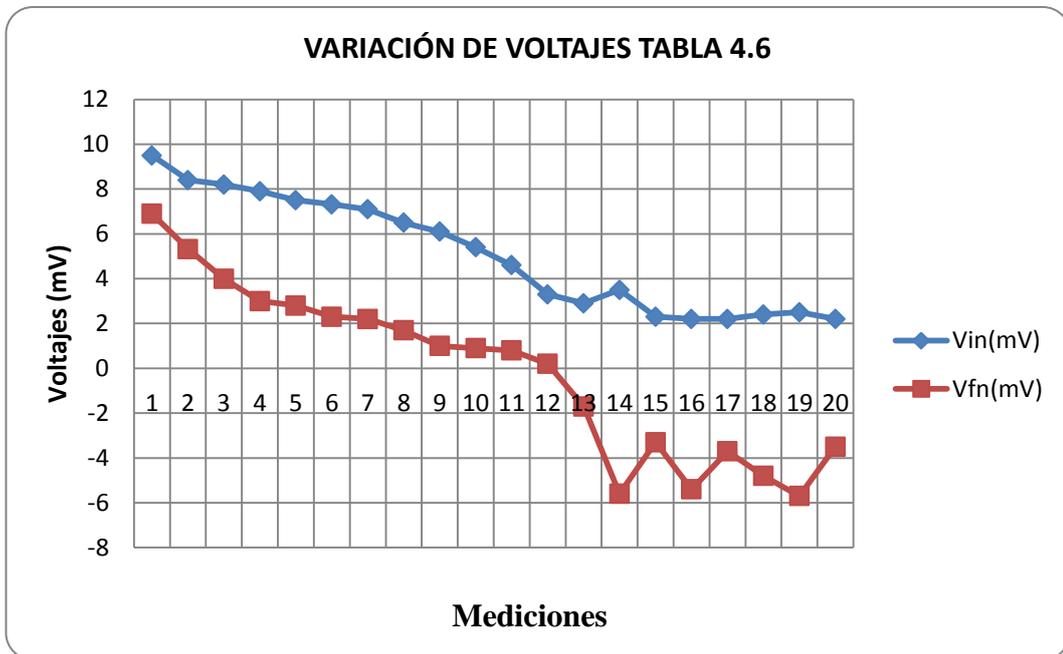
**Figura 4.8.** Curvas de voltaje, Tabla 4.4.

**Autor:** Diego Amancha.



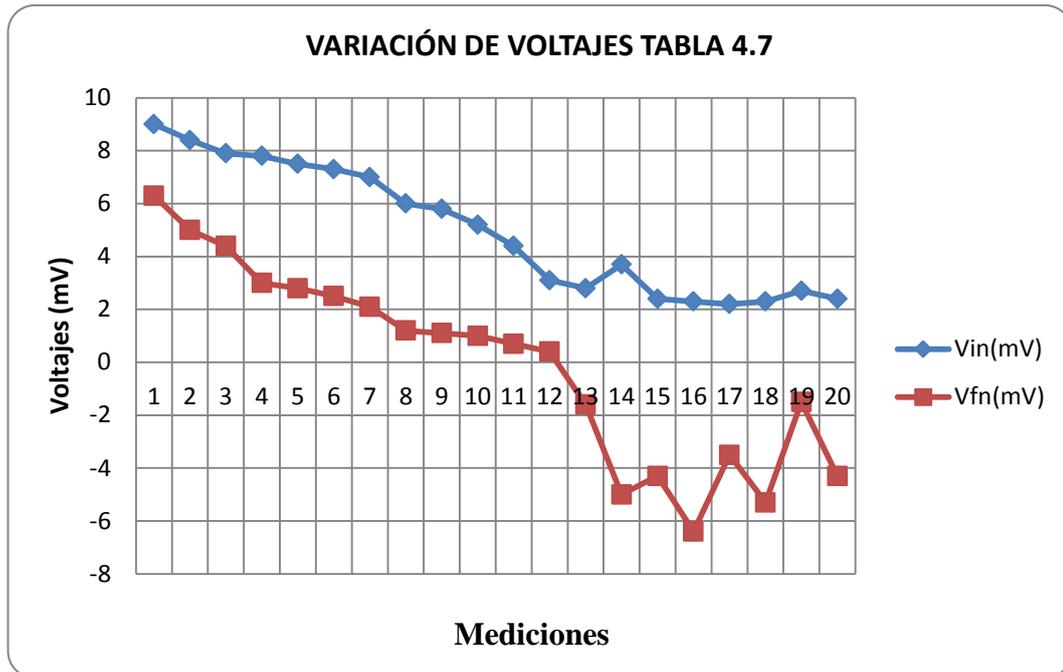
**Figura 4.9.** Curvas de voltaje, Tabla 4.5.

**Autor:** Diego Amancha.



**Figura 4.10.** Curvas de voltaje, Tabla 4.6.

**Autor:** Diego Amancha.



**Figura 4.11.** Curvas de voltaje, Tabla 4.7.

**Autor:** Diego Amancha.

## 4.2 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

De la tabla 4.1 se puede observar que se requiere de una fuerza mínima de 75000lb para pandear la columna cilíndrica de acero AISI 1018 y una máxima de 88000lb, valores relativamente altos que provocaron atascamientos en la máquina universal, sin obtener una visibilidad aceptable del efecto de la fuerza aplicada en las probetas, aparentemente no existe deflexión por pandeo.

La variación de la fuerza aplicada en cada columna es función directa de la geometría de las probetas, principalmente del paralelismo de sus bases, así como el tipo de empotramiento de la probeta.

En la tabla 4.2 los valores de la fuerza de compresión requerida son relativamente bajos respecto a la tabla 4.1, con una fuerza máxima requerida de 8100 lb y una mínima de 7500 lb. Se deben considerar estos valores para determinar el diseño de

la máquina para ensayos de compresión propuesto, así como los valores máximos del primer ensayo.

En el ensayo de compresión cinco galgas extensiométricas se han sometido a pruebas experimentales adheridas fijamente sobre las probetas de acero AISI 1018, conectándolas en la configuración de cuarto de puente de Wheatstone, *sección 2.2.4.3.a*), cuyos resultados se expresan en las tablas 4.3 a la tabla 4.7, representadas desde la figura 4.7 a la figura 4.11, en las cuales se observa claramente que no existe estabilidad en las lecturas, tanto en las cuatro galgas de acero como en la galga de aluminio, cuyos valores son muy similares, el pico más alto al inicio de las pruebas, sin carga es de 9,5V y el más bajo de 2,2V; al final de las pruebas, aplicando compresión manual, el mayor valor es de 7V y la menor lectura de -2,3V. El error aproximado sin carga es de 7,3V y con carga de 9,3V, valores demasiado altos para un ensayo que requiere la mayor exactitud posible.

### **4.3 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS**

De lo revisado en este capítulo, al realizar las diversas pruebas de compresión en probetas de acero AISI 1018 en la máquina de compresión SOIL TEST CT 769E, primero con especímenes de 1,25 pulgadas de diámetro y 12,5 pulgadas de longitud, Tabla 4.1; y luego en especímenes de 0,5 y 10 pulgadas de diámetro y longitud respectivamente, Tabla 4.2, se puede concluir que:

*El estudio de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a sirve para elaborar la guía práctica en los laboratorios de la Universidad Técnica de Ambato.*

Sin embargo se debe considerar que los equipos no cumplen satisfactoriamente las necesidades que el presente estudio demanda, en cuando a precisión en la lectura de los resultados, así como en la confiabilidad de los mismos.

## **CAPÍTULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **5.1 CONCLUSIONES**

- Se puede realizar pruebas de pandeo en la máquina SOIL TEST CT-769E, considerando que los datos de carga obtenidos son resultado de adaptaciones en las condiciones de empotramiento, ya que éste equipo no está destinado para la realización de ensayos mecánicos, sino para compresión de cilindros de concreto.
- El diseño de una máquina de compresión para pruebas de pandeo debe estar basado en el modelo de la Norma ASTM E9-89a que indica la figura 2.9, con dimensionamiento similar a la máquina de compresión SOIL TEST CT-769E de propiedad de la Universidad Técnica de Ambato y a la máquina MTS de la Escuela Politécnica Nacional que el autor revisó personalmente durante las investigaciones; cuyas características satisfacen los requerimientos técnicos que demanda el presente estudio.
- La implementación de la técnica de extensimetría en el presente estudio resulta ser una de las innovaciones más importantes dentro del campo de la Ingeniería, debido al escaso desarrollo de este tema a nivel nacional dentro de las diversas universidades, siendo una de las razones principales la ausencia de estos sensores en el mercado, y el costo que implica obtener el sistema completo, no obstante la Universidad Técnica de Ambato logrará implementar en sus laboratorios estos dispositivos a través del presente trabajo de tesis.
- Las galgas extensiométricas son los sensores de mayor precisión y sensibilidad en la determinación de carga en función de su deformación, siempre y cuando el sistema de adquisición de datos cumpla con los parámetros que indica el fabricante RS AMIDATA, *ANEXO A3*.

- El uso del adhesivo para galgas extensiométricas CYANOLUBE en comparación con la utilización de adhesivos despegables, no representó un uso indispensable en las pruebas al no variar la señal que emite el sensor, su uso representa sí, una mayor confiabilidad, pero también un elevado costo.
- La construcción de un prototipo de máquina vertical para ensayos de compresión resulta ser indispensable para los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica para la realización de ensayos prácticos de pandeo con el fin de obtener una interfaz Humano-Máquina fácil de manejar, confiabilidad en los datos adquiridos y consistencia de los resultados, debido a la poca confiabilidad que los datos de las tablas 4.2 y 4.2 describen.
- El estudio de pandeo resulta ser un tema objeto de un sinnúmero de estudios, sin embargo al relacionarlo directamente con una norma de reconocimiento mundial, el universo de estudio se limita a los parámetros que esto conlleva.
- Se logró obtener mejores resultados en las pruebas al utilizar el amplificador operacional AD 620, en reemplazo de la tarjeta RS 435-692 con amplificador para galgas extensiométricas RS 846-171, dispositivos en los cuales la variación de voltaje era mínima al colocar cargas sobre la columna UTA 001, por esta razón se pensó que era insensible. Para solucionar este problema se optó por manufacturar columnas circulares con menor diámetro (0,5 plg), debido a que al inicio de las pruebas se realizó el ensayo con probetas de 1,25 pulg. de diámetro.
- Al observar el comportamiento de las columnas con menor diámetro se logró tener una mayor sensibilidad a menor tensión, resultados que fueron confiables. Las columnas con diámetro pequeño y de gran longitud presentan un mayor rango de variación de voltaje aprovechado para un óptimo desempeño del PIC.
- Las pruebas de compresión con sensores extensiométricos demostraron que la velocidad de actualización de valores que se puede tener mediante el protocolo de comunicación USB 2.0 (200Mbps) utilizado mediante el adaptador TRENDnet, resulta suficiente para realizar la generación de señales sinusoidal, triangular, diente de sierra y cuadrada, dependiendo del tipo de gráfico que se desee visualizar en el entorno de LabView.

- Para el sistema extensiométrico desarrollado se ha configurado para una fácil manipulación, dejando abierta la posibilidad de manipular hasta dos entradas analógicas adicionales, así como la posibilidad de reprogramación del PIC, dependiendo de necesidades futuras que mejoren el alcance de este estudio.
- El sistema de control y adquisición de datos diseñado para monitoreo de compresión en probetas UTA-001 basado en extensimetría queda configurado de manera satisfactoria, para establecer la guía práctica de laboratorio para ensayos de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a.

## 5.2 RECOMENDACIONES

El equipo extensiométrico y la máquina de compresión UTA PRESS que se entregará en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica se desarrollarán satisfactoriamente y funcionando adecuadamente gracias al esfuerzo y trabajo en conjunto de profesionales en Ingeniería en Electrónica y Control e Ingeniería Mecánica. La experiencia adquirida durante la elaboración de este proyecto permitirá dar las siguientes recomendaciones:

- Desarrollar las pruebas con materiales diferentes al acero AISI 1018.
- Implementar acoples para el ensayo de probetas de diferente geometría, sin limitar el estudio a columnas de sección circular, y a la utilización de una única condición de empotramiento.
- Mejorar el diseño de la máquina de compresión, incrementando la potencia del motor y automatizando de mejor manera su funcionamiento.
- Al desarrollar la guía práctica para ensayos de pandeo, revisar la sección 2.2.3 respecto a los ítems que la guía debe cumplir.
- Para determinar el dimensionamiento de la máquina vertical para ensayos de compresión, tomar los valores máximos de carga a la que se someterá durante las prácticas, revisando los datos de la tabla 4.1 y 4.2.
- Para implementar la extensimetría en el estudio de pandeo, limitarse a los parámetros que la norma ASTM E9-89a refiere, ASTM E 83 y ASTM E 251.

- Se realice un control del estado de la máquina de compresión, especialmente del control de la lubricación de los tornillos de potencia.
- Al montar las galgas en la respectiva probeta, limpiar correctamente la zona donde se ubicará el sensor, con los productos recomendados.
- Si se utiliza el adhesivo CYANOLUBE de cyanoacrylate para pegar las galgas a la probeta, usar mascarilla y guantes, debido a la composición química de este elemento.
- Se realice un mejoramiento al sistema de control y monitoreo del equipo extensiométrico, lo cual implica:
  - Obtener sistemas de sujeción para realizar ensayos de compresión de probetas de distintas geometrías, sin limitar el estudio a columnas de sección circular.
  - Revisar la correcta alimentación de voltaje de cada componente eléctrico del sistema y mantenerlos lejos de la humedad, evitando cortocircuitos o defectos en las mediciones de cada prueba.
  - Al reemplazar o abrir cualquier dispositivo, ésta acción la realice personal altamente cualificado y solo por motivos indispensables y de cualquier modo en presencia de al menos una segunda persona que asista a este tipo de operaciones.
- Adquirir un computador que cumpla con los requerimientos mínimos del paquete computacional LabView, y que sea dedicado para uso exclusivo del sistema de control y monitoreo desarrollado en este proyecto.

Este trabajo de tesis no tiene precedente alguno en la Universidad Técnica de Ambato, por esta razón se pretende comenzar a estudiar las características y funcionamiento de las galgas extensiométricas para que en trabajos posteriores se pueda implementar el hardware al nivel de la National Instrument para el acondicionamiento de la señal y otro para elaboración de un producto final para el usuario.

## **CAPÍTULO VI**

### **PROPUESTA**

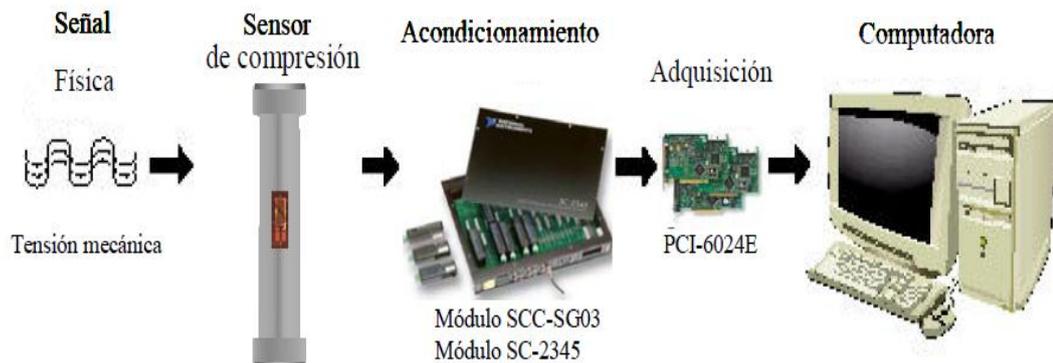
#### **6.1 DATOS INFORMATIVOS**

Para abordar el estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a, se debe considerar varios aspectos, entre los cuales se tiene; el equipo requerido, su diseño y construcción, tipos de probetas para las pruebas, materiales a ensayar, adquisición de resultados y formulación de una guía práctica.

De ahí, se convierte en prioridad el diseño y construcción de la máquina para ensayos de pandeo, siendo esta de tipo vertical, por el espacio que requiere para su ubicación en un laboratorio, la facilidad de manipulación del equipo, y a la instrumentación requerida para la adquisición de los resultados. Además se utilizará un sistema mecánico de tornillo de potencia para la aplicación de la fuerza de compresión en las probetas, incluyendo adicionalmente un acondicionamiento hidráulico en caso de interferencia o atascamiento del sistema principal de compresión, se ha incluido adicionalmente tuercas para fijar el giro de los tornillos de potencia y obtener un correcto desplazamiento vertical de la base que ejerce la fuerza de compresión.

Adicionalmente se acopla un sistema de seguridad alrededor de la zona de ubicación de las probetas, en caso de que estas salgan disparadas por la fuerza ejercida durante el ensayo, de acuerdo a las exigencias de la Norma ASTM E9-89a; se debe mencionar que este es un caso poco probable por la configuración del sistema de sujeción que tiene el equipo, pero el riesgo existe, aún cuando el ensayo trata solo de pandeo y no de deflexión total de las muestras. Para la evaluación de las pruebas se ha optado por un sistema de galgas extensiométricas,

las mismas que serán ubicadas en la zona de mayor deflexión de cada probeta, tal como indica la Norma ASTM E9-89a en los *Anexos Sección D*, transfiriendo los datos a una tarjeta de amplificación para galgas, de ahí codificando los datos por otra tarjeta de acondicionamiento de datos y de ahí al computador, en el cual se registran los datos obtenidos para su procesamiento y determinación de resultados.



**Figura 6.1.** Modelo de diagrama a bloques para mediciones de tensión con galgas extensiométricas.

**Fuente:** [www.NationalInstrument.com](http://www.NationalInstrument.com)

## 6.2 ANTECEDENTES DE LA PROPUESTA

La realización de un estudio de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a para elaborar la guía práctica en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, conlleva el considerar el costo del proyecto, la factibilidad y el beneficio estimado. Sin duda, el valor económico que implica es de los más costosos realizados a nivel de esta institución, al requerir de sistemas de alta precisión y una extensa investigación sobre estos, sin embargo las prestaciones y el desarrollo que genera todo el equipo, tanto de pruebas, adquisición y procesamiento de datos, se hace indispensable para establecer una guía de laboratorio de un alto nivel académico, apegada a los estándares de una Norma Internacional y desarrollada con equipos e instrumentación de un alto nivel tecnológico .

Se han verificado además, condiciones ambientales, materiales y procedimientos de ensayo anteriores, de los cuales la mayor cantidad de información es proporcionada por páginas web online de las empresas Tinus Olsen, National Instrument, Vishay y RS Amidata.

Referente a las pruebas realizadas, cada una de ellas están reguladas dentro de las normas ASTM que sustentan este trabajo investigativo, siendo un parámetro general la temperatura a la que se desarrolla, en promedio la temperatura ambiente es de 22°C.

### **6.3 JUSTIFICACIÓN**

Con frecuencia, el uso de la tecnología para la globalización y la reingeniería de procesos dan como resultado el desarrollo de sistemas de automatización que ayudan a una empresa a darle ventaja competitiva en el mercado, utilizándolos para desarrollar productos, servicios, procesos y capacidades que le dan una ventaja estratégica sobre las fuerzas competitivas que enfrenta. Estrategias de costo, por ejemplo, utilizando sistemas de manufactura asistidos por computadora para reducir los costos de producción, o crear sitios Web en Internet para comercio electrónico, con el fin de reducir los costos del marketing.

Evidentemente es clara la importancia de implementar sistemas de automatización y guías prácticas dentro de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato; para presentar un alto porcentaje de calidad y precisión en el desarrollo de ensayos propios de la Ingeniería Mecánica, primero por el amplio crecimiento tecnológico que experimenta la sociedad actual, y segundo, por la formación que debe tener el profesional de hoy, con conocimientos sólidos sobre la interpretación y aplicación de una Norma.

### **6.4 OBJETIVOS**

#### **6.4.1 Objetivo general**

- Establecer en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, la guía práctica de laboratorio para ensayos de pandeo bajo la norma ASTM E9-89a.

#### **6.4.2 Objetivos específicos**

- Construir una máquina vertical para ensayos de pandeo de columnas de sección circular.
- Implementar la técnica extensiométrica en el estudio de pandeo de columnas de sección circular de acero AISI 1018.

### **6.5 ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD**

#### **6.5.1 Tecnológico-Económico**

En este trabajo la factibilidad del recurso tecnológico es primordial, debido al poco desarrollo del país respecto a este factor; hay que referir este aspecto a la obtención del sistema de adquisición de datos con la técnica de extensometría, que requiere dispositivos de alta precisión, así como al equipo requerido para el procesamiento de la información obtenida con este método, y también a las partes y materiales para la fabricación de la máquina de ensayo de compresión, la cual no presenta ninguna dificultad en cuanto a su diseño y construcción.

Las galgas extensiométricas, las tarjetas de acondicionamiento y adquisición de datos, deben ser importadas, bien desde México, Estados Unidos o España. Una opción accesible son el módulo de galgas extensiométricas que utiliza el bloque conector SC-2345 con el módulo de galgas SCC-SG03 de National Instrument, sin embargo su valor es sumamente costoso, bordeando los \$2500, por lo cual se ha descartado; Vishay ofrece productos similares pero el costo se mantiene.

La mejor opción asumida por el autor de este proyecto, es el ensamble de las tarjetas, tanto de acondicionamiento y adquisición de datos, importando solo las partes y basando su desarrollo en catálogos de RS AMIDATA S.A, empresa que además ofrece asistencia técnica en línea desde su página de internet (<http://es.rs-online.com>), con lo cual su costo se ha reducido en un 50%.

Adicionalmente se desarrollarán pruebas con integrados que se encuentran en el mercado nacional, como el amplificador de instrumentación AD620, PIC 16F876A, MAX 232, LM 741, LCD para visualización de resultados, relés, diodos, etc.

### 6.5.2 Ambiental

No se ha registrado ningún tipo de contaminación al medio ambiente tanto en procesos de fabricación de la máquina de ensayos, como en los sistemas electrónicos, sin embargo existen desechos que sin un tratamiento adecuado pudiesen representar un mínimo de contaminación, pero estos han sido clasificados y empacados adecuadamente. Es importante destacar que todos los componentes importados, son fabricados bajo estrictas normas internacionales, y que su principal preocupación es el medio ambiente, siendo esta también nuestra responsabilidad.



**Figura 6.2.** Logo RS AMIDATA y símbolo de empaques reciclables.

**Fuente:** Funda reciclable RS AMIDATA.

## **6.6 FUNDAMENTACIÓN**

Para el desarrollo del proyecto los parámetros bajo los cuales se trabaja son los establecidos en la norma ASTM E9-89a descritos en la *sección 2.2.3*, en donde se considera el dimensionamiento de las probetas, materiales de prueba, características del ensayo, recolección e interpretación de resultados.

Es así que para determinar el correcto dimensionamiento de las probetas de sección circular de Acero AISI 1018 y la verificación de la carga de pandeo crítica, se desarrolló el software PANDEO E9-11UTA.vi que cuenta con tres paneles principales, GOMETRÍA, RESULTADOS y GRÁFICAS DE PANDEO. Todas las secciones de cálculo se han establecido de acuerdo a lo expuesto en el capítulo 2.

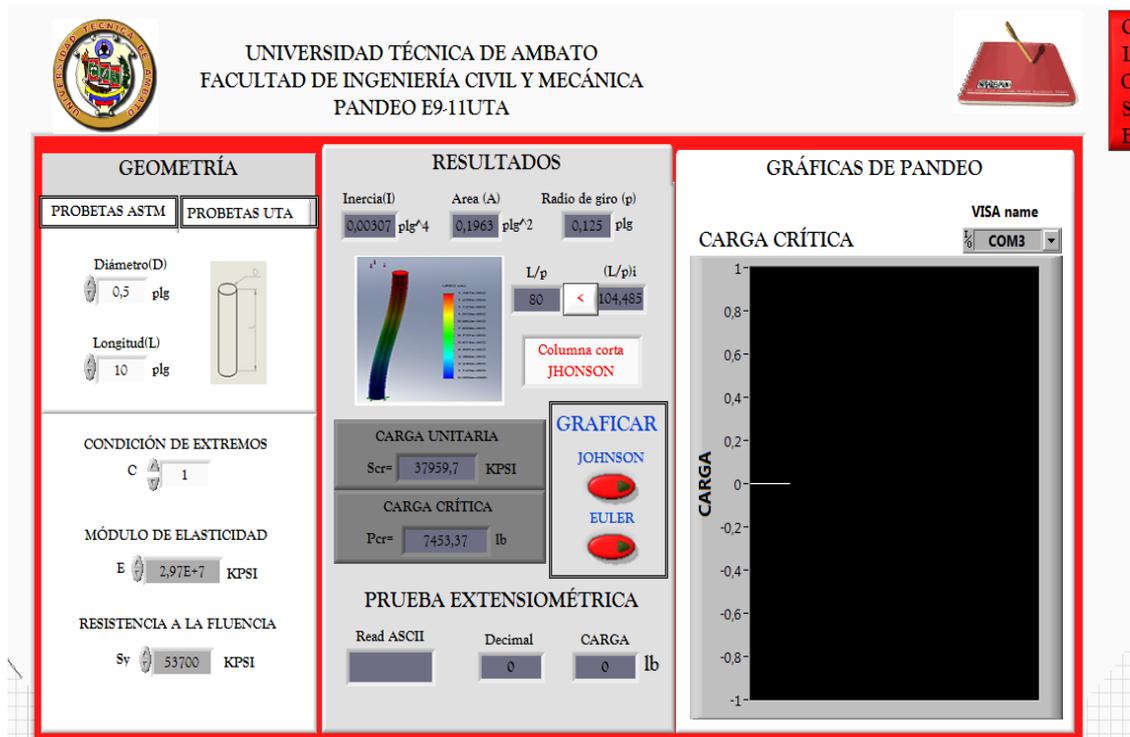
### **6.6.1 Pandeo E9-UTA**

El programa incluye la opción de comprobación de columnas con dimensionamiento diferente a las recomendadas en la Norma ASTM E9-89a para probetas de sección circular, sin embargo este software determinará si el dimensionamiento dado por el usuario bajo los parámetros que la norma indica, se considera como una columna corta o una columna larga.

El entorno de LabView consta de dos partes principales, el panel frontal y en el diagrama de bloques del entorno del software. Dentro del panel frontal se encuentran visualizados los datos de entrada y salida, así como las gráficas del comportamiento de cada columna; en el diagrama de bloques se encuentra la programación para cada cálculo desarrollado.

#### **6.6.1.1 Descripción de funcionamiento**

Diseñado para selección de dos opciones de dimensionamiento: la primera sección establecida para comprobación de columnas normalizadas, botón PROBETAS ASTM, y columnas de libre dimensionamiento, PROBETAS UTA, figura 6.3.



**Figura 6.3.** Panel frontal del software PANDEO E9-11UTA.vi.

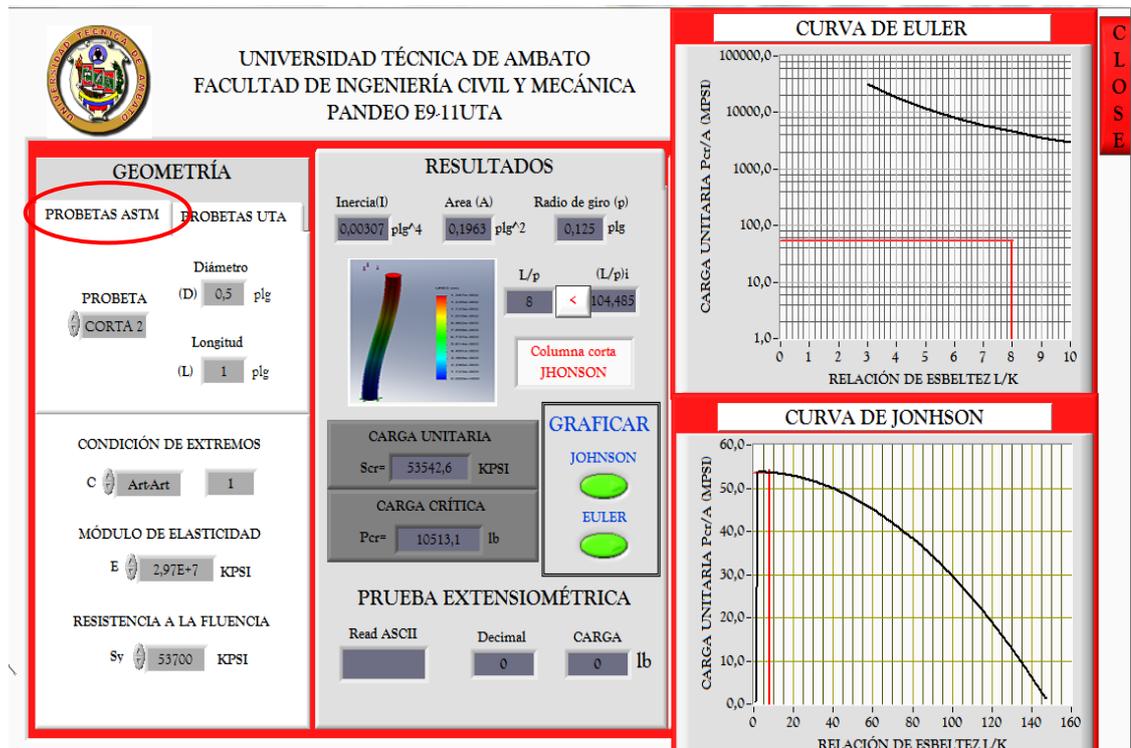
**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

Con PROBETAS ASTM seleccionar el tipo de columna con un clic en PROBETAS, elegir CONDICIÓN DE EXTREMOS, ingresar el Módulo de elasticidad y la resistencia a la fluencia en KPSI y hacer un clic en  para ejecutar el programa una sola vez, éste botón se encuentra ubicado en la parte superior del panel frontal, en la paleta de herramientas, o en  para ejecutar en modo secuencial, que se ubica junto a la opción anterior.

En GEOMETRÍA existe la posibilidad de cambio de las opciones para las diversas columnas, normalizadas o de libre dimensionamiento.

Los valores que se pueden modificar son las sub opciones: PROBETA, referente al tipo; (D) diámetro en pulgadas; (L) longitud en pulgadas; y las condiciones de extremos, Módulo de elasticidad y resistencia a la fluencia del material de la columna en KPSI. Simultáneamente se visualizarán los resultados en la parte derecha del panel frontal, en el cual se indica la condición de determinación de

columnas cortas o largas, así como el esfuerzo permisible en la columna seleccionada.

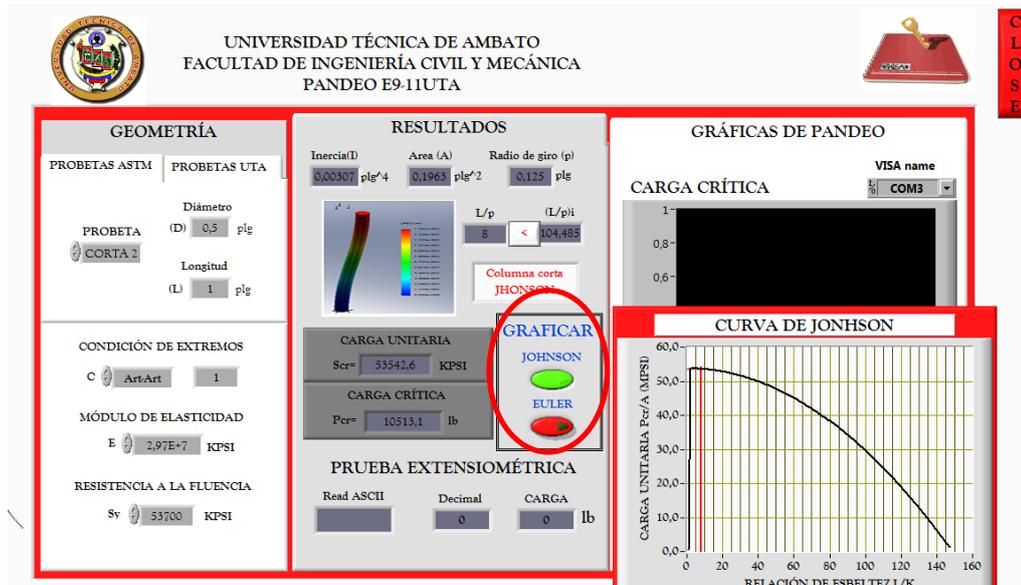


**Figura 6.4.** Desarrollo del ensayo con PROBETAS ASTM.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

En la figura 6.4 se observan los resultados de una prueba de compresión de una probeta CORTA 2, con sus respectivo dimensionamiento y la correspondiente visualización de resultados, en este caso se trata de una columna corta y los respectivos cálculos se realizan con la ecuación de J.B. JOHNSON, se puede identificar además las correspondientes curvas de la columna en las cuales se indican con línea roja el punto entre el esfuerzo crítico y la relación de esbeltez, claramente se puede observar éstas líneas intersecan en la CURVA DE JOHNSON y no en la CURVA DE EULER.

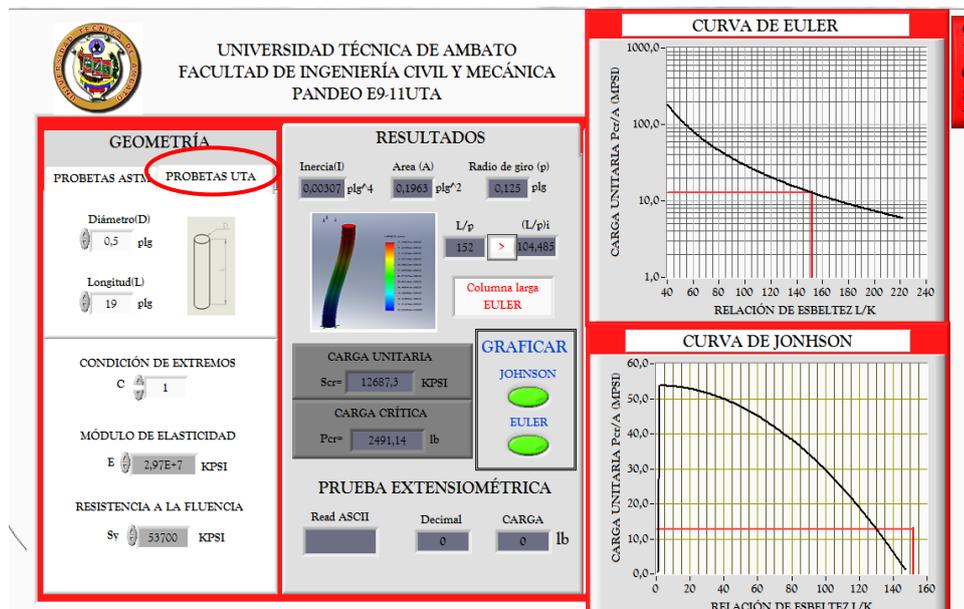
La visualización de las curvas se puede controlar con un click sobre la opción GRAFICAR, de color verde para activar y de color rojo para desactivar la visibilidad.



**Figura 6.5.** Opción para visualización de curvas.

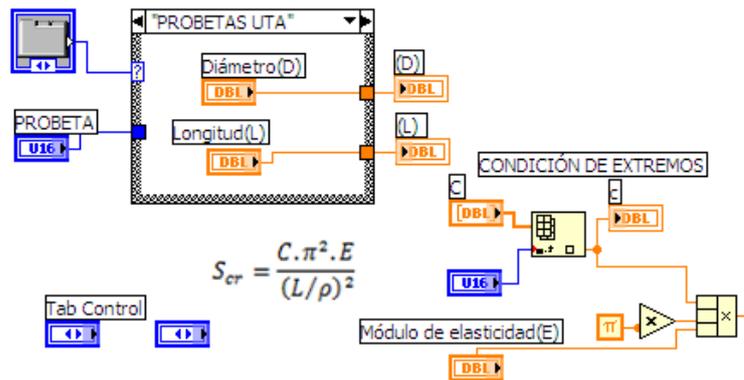
**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

Si se desea seleccionar PROBETAS UTA, revisar que la opción PROBETAS no se encuentra visible y aparecen dos nuevas opciones de ingreso de datos adicionales, valores de diámetro y longitud en pulgadas. Seguir el proceso anterior para ejecutar el programa.



**Figura 6.6.** Verificación de columnas, probetas UTA.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.



**Figura 6.7.** Programación interna de PANDEO.vi. (Fragmento)

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

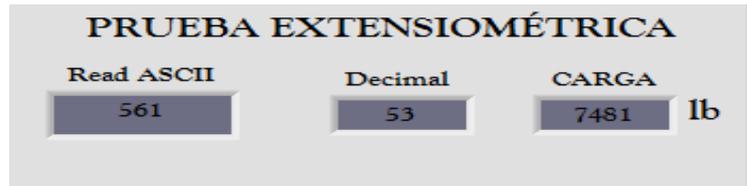
En la sección RESULTADOS se visualizan datos calculados de la probeta como la inercia, el área, radio de giro, condición de columnas cortas o largas, la carga unitaria, y la carga crítica. Se permite también la visualización de las curvas correspondientes a cada caso.



**Figura 6.8.** Visualización de RESULTADOS.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

En la parte inferior se encuentran los datos de lectura del sensor, PRUEBA EXTENSIOMÉTRICA, con el valor que recibe del módulo de acondicionamiento Read ASCII, su equivalente decimal y el valor correspondiente de carga sensada.



**Figura 6.9.** Visualización de datos del sensor extensiométrico.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

En la parte derecha del panel frontal se puede visualizar los datos de entrada del sensor en tiempo real, figura 6.10, los picos que se observan se deben a la alta sensibilidad de las galgas extensiométricas colocadas en la probeta. Se debe acotar que es necesario ingresar el puerto por donde se recepta la señal, en la opción VISA name, en este ensayo se utilizó el COM 3.



**Figura 6.10.** Curva de datos recibidos por el módulo de acondicionamiento.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha.

Para finalizar con el ensayo de debe dar click en la opción CLOSE, que se encuentra en la parte superior derecha del panel frontal.

### 6.6.2 Especificaciones de la columna

El tipo de columna debe cumplir con la condición de la ecuación 2.23 para columnas de Euler, manufacturado con acero al carbono, de transmisión, SAE-

AISI 1018, determinado su uso por experimentación y por cuanto es un material de uso común en todo tipo de aplicaciones, el cual tiene un límite de elasticidad de 205 GPa (29700 KSI). La geometría de la columna se ha verificado en la opción GEOMETRÍA del software desarrollado bajo los parámetros de la norma ASTM E9-89a y de acuerdo a lo descrito en la *sección 2.1*; el desarrollo práctico que muestra la figura 6.11 y 6.12 corresponde a probetas normalizadas, y la figura 6.13 a probetas UTA-01.

Como se mencionó, las primeras pruebas se realizaron con probetas ASTM de 1,25 pulgadas de diámetro y 12,5 pulgadas de longitud mostradas en la figura 6.11 y 6.12, dimensionamiento correspondiente a la tabla 2.5, en las cuales no se observa una deformación considerable aún cuando es la probeta de mayor longitud recomendada, figura 6.12; optando por un dimensionamiento propio que cumpla con todos los parámetros de la norma como se observa en la figura 6.13, en el cual existe una mejor apreciación del pandeo de la columna.



**Figura 6.11.** Probetas ASTM.



**Figura 6.12.** Prueba de compresión.

**Fuente:** Diego Amancha

Respecto al dimensionamiento de las probetas y calibración del equipo extensiométrico, éstas se realizaron en una máquina universal de compresión SOIL TEST CT-769E de propiedad de la Universidad Técnica de Ambato

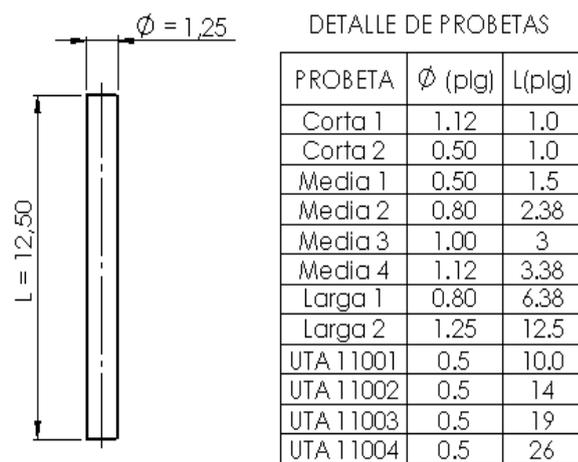
utilizada para ensayos de compresión de cilindros de concreto y adaptada para compresión de columnas de acero AISI 1018.



**Figura 6.13.** Prueba con probetas de dimensionamiento del UTA-O1.

**Autor.** Diego Amancha.

Las dimensiones de las diversas columnas se encuentran en el *ANEXO B*.



**Figura 6.14.** Dimensiones de la columnas de prueba, pulgadas.

**Autor.** Diego Amancha.

### 6.6.3 Selección de la galga extensiométrica

Una vez seleccionado el material de la columna y sus dimensiones, de acuerdo a su módulo de elasticidad, accesibilidad comercial y su correspondiente dimensionamiento se selecciona la galga que se pegará en este material. De lo descrito en el capítulo 2 se empezará por verificar las dimensiones de la galga, material y rango de temperatura de operación, como factores principales.

Considerar que para pruebas extensiométricas de compresión o tensión se recomienda longitudes menores a 13mm; en cuanto al ancho éste debe ser menor a la dimensión del diámetro de la columna, es decir menor a 12,7mm.

La temperatura de operación de las galgas para pruebas estáticas asumida es de -75 °C a 175 °C, con lo que la lámina y la base de la galga son de Cobre-níquel y Polyimide respectivamente de acuerdo a la tabla 2.8. Con los datos anteriores revisamos las mejores opciones en el Catálogo N° 3008 5.1981 de RS AMIDATA del ANEXO A4 y tenemos cuatro opciones:

- ✓ N11-FA-8-120-(11,16,23)
- ✓ N11-FA-8-350-(11,16,23)
- ✓ N11-MA-8-120-(11,16,23)
- ✓ N11-MA-8-350-(11)



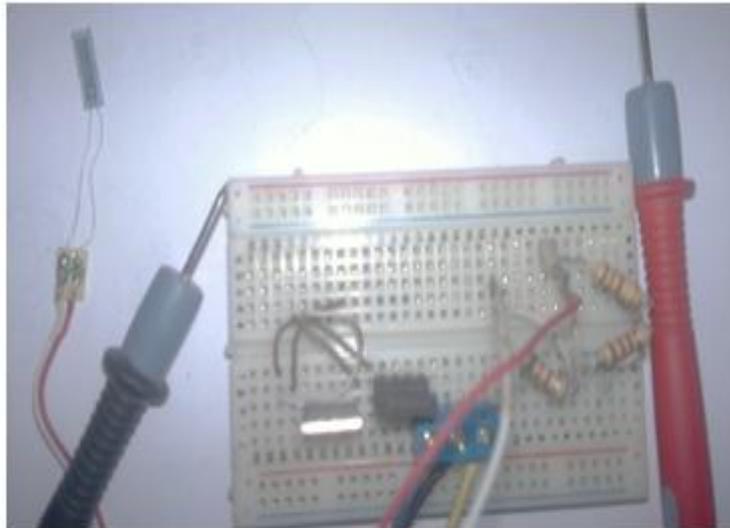
**Figura 6.15.** Galgas RS N11-FA-8-120 (23 y 11)

**Autor.** Diego Amancha

La opción 1 y 3 son las más accesibles, y de acuerdo al material base se ha establecido trabajar con la opción 1, N11-FA-8-120-(11,16, 23); de 13mm de longitud, 4mm de ancho y 120 ohms de resistencia, correspondiente al código RS 308-102 y RS 308-118 de acero dulce y aluminio respectivamente.

#### **6.6.4 Acondicionamiento del sensor con Cuarto de puente de Wheatstone**

De acuerdo a las recomendaciones del distribuidor de las galgas extensiométricas RS AMIDATA y en cumplimiento del Data Pack E-RS Data Sheet 232-5957 del ANEXO A3, se procedió a ensamblar el cuarto de puente con valores de resistencias iguales a la resistencia de la galga, es decir de 120 ohms como se indica en la figura 6.16.



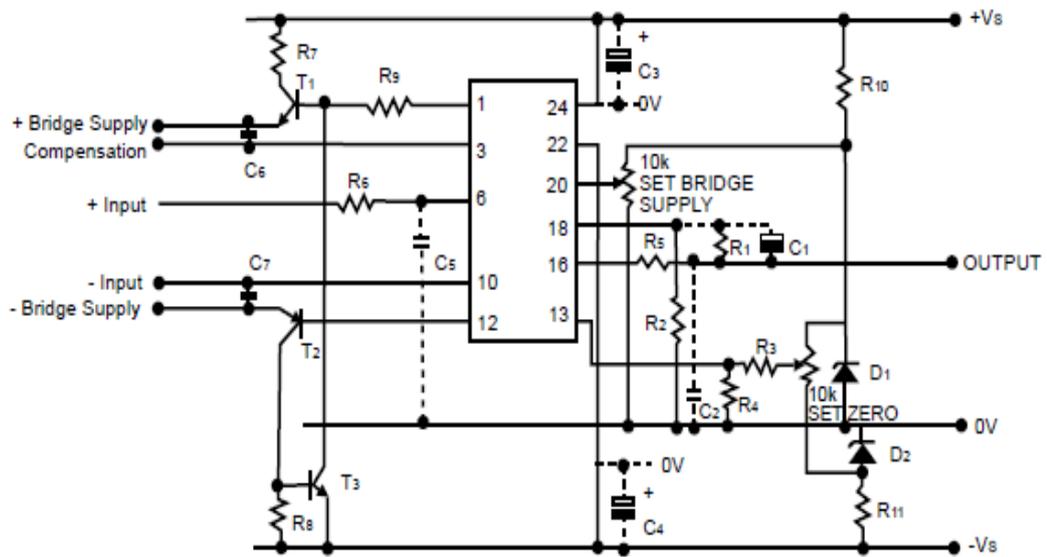
**Figura 6.16.** Acondicionamiento de cuarto de puente.

**Autor.** Diego Amancha

#### **6.6.4.1 Acondicionamiento de pruebas con sistema extensiométrico 435-692**

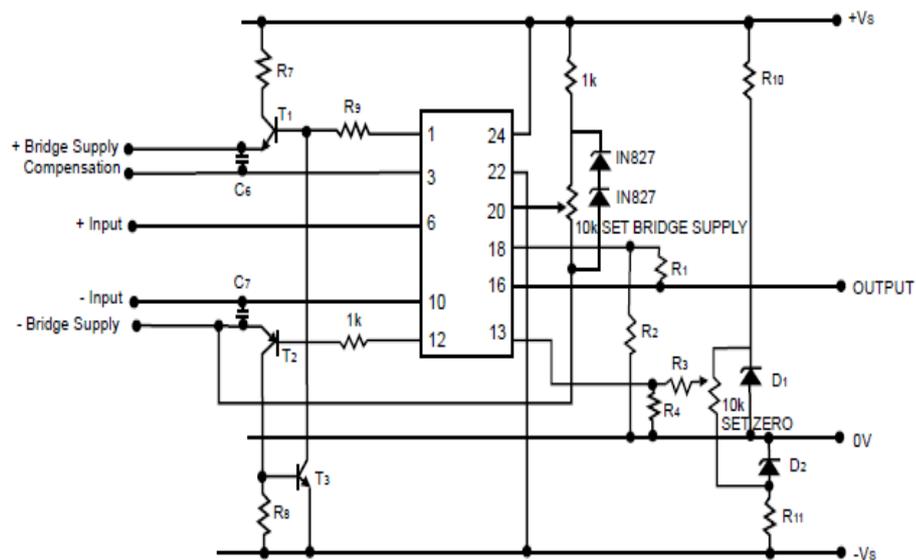
Una vez seleccionado el tipo de sensor extensiométrico, se requiere obtener una amplificación en la señal de salida de las galgas conectadas en las probetas, la figura 6.17 y 6.18 se describen circuitos de amplificación, el primero fabricado por AMIDATA S.A que prevé la utilización de cables de conexión de más de 10 metros, y el segundo es un diagrama para construcción de acuerdo a los

requerimientos del usuario para pruebas de laboratorio con cables de conexión menores a 10 metros.



**Figura 6.17.** Circuito básico para el tablero de circuito impreso RS stock no. 435-692 (ganancia de aprox. 1000).

**Fuente.** ANEXO A3.



**Figura 6.18.** Circuito para indicadores de semiconductores y transductores.

**Fuente.** ANEXO A3.

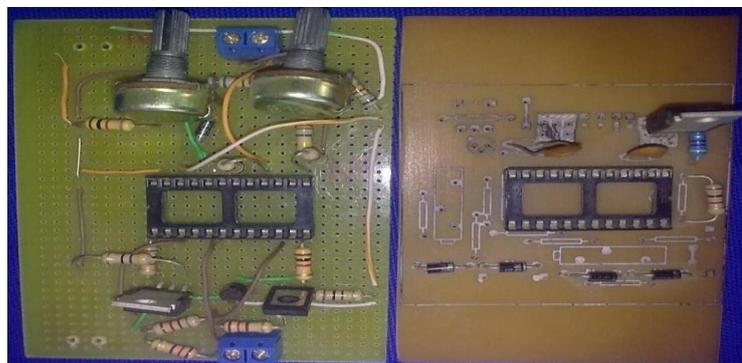
Por menor costo las primeras pruebas fueron realizadas en base a la figura 6.18, los primeros inconvenientes se presentaron al no tener estabilidad en la señal de salida, recalentamiento de los transistores y poca facilidad de calibración del sistema por el uso de la protoboard, figura 6.19, consecuentemente la desconexión de determinados cables y la difícil manipulación de los elementos electrónicos más frágiles.

Posteriormente al ensamblar el circuito en una baquelita perforada y luego en una baquelita impresa, la calibración de la señal de salida resultó muy compleja por la falta de precisión de los potenciómetros comunes.



**Figura 6.19.** Circuito armado en una Protoboard.

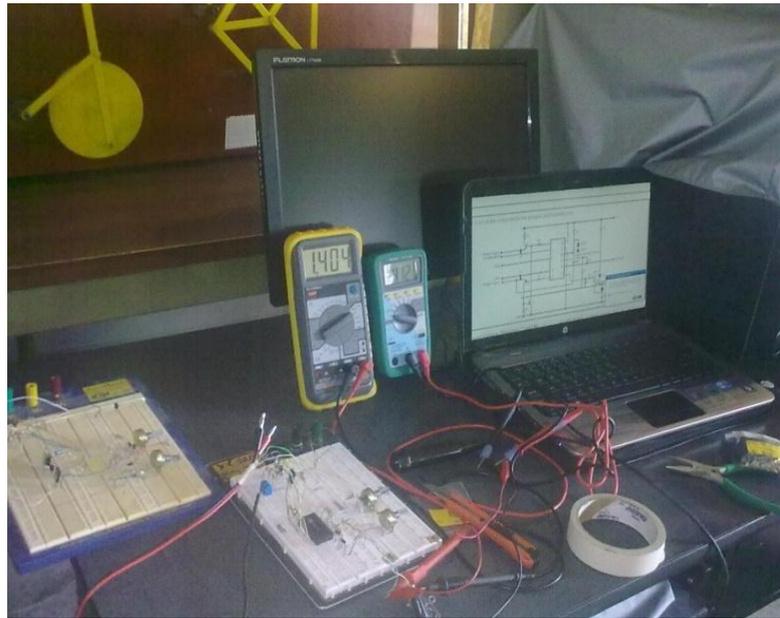
**Autor.** Diego Amancha



**Figura 6.20.** Circuito armado en baquelita perforada y baquelita impresa.

**Autor.** Diego Amancha

Todos los circuitos armados se revisaron y se determinó que el problema general era el tiempo de carga de los condensadores y el voltaje de entrada, y no la forma de ensamblar el circuito. Una vez calibrado el sistema se procedió a realizar las primeras pruebas con la galga para medir la variación de voltaje en función de la deflexión de este sensor, obteniendo resultados poco satisfactorios por la falta de precisión y voltaje de salida demasiado bajo, determinándose que la ganancia era insuficiente.



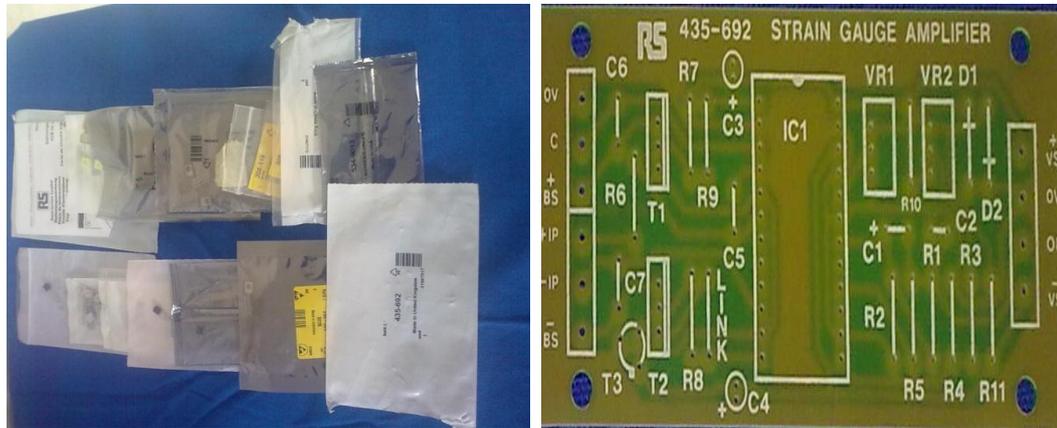
**Figura 6.21.** Pruebas de laboratorio, protoboard.

**Autor.** Diego Amancha

Por la poca información existente sobre el funcionamiento del amplificador para galgas extensiométricas RS 846-171 y de las galgas extensiométricas de RS AMIDATA, y a pesar del costo se optó por conseguir el equipo completo, figura 6.22, desde resistencias hasta herramientas, y placas impresas para un nuevo ensamble de la tarjeta de adquisición de datos.

Con el equipo completo se procedió a ensamblar una nueva tarjeta de adquisición de datos para una nueva serie de pruebas, obteniendo mejor estabilidad y facilidad de calibración, sin embargo el voltaje de salida aún no era satisfactorio por lo que

se procedió a revisar las hojas de datos y la correcta funcionalidad del puente de Wheatstone utilizado, en este caso el de cuarto de puente (Quarter bridge), según el catálogo RS 232-5957 del ANEXO A3.



**Figura 6.22.** Elementos y herramientas para ensamble de sistemas extensiométricos.

**Autor.** Diego Amancha.

El tipo de sensor utilizado en el presente trabajo de tesis, galga extensiométrica, requiere la utilización del puente de Wheatstone, configurado en cuarto de puente, figura 2.17, al utilizar una sola galga en la medición de la fuerza de compresión en probetas cilíndricas que provocan el pandeo de éstas, debido principalmente a la facilidad de obtención de este tipo de sensores en el mercado nacional.

El primer sistema para el acondicionamiento de la señal de las galgas extensiométricas se ha equipado con un amplificador RS 846-171, el cual requiere un circuito RS 435-692 con los respectivos componentes que AMIDATA S.A provee bajo pedido, cabe mencionar que todo el conjunto ha sido probado por el fabricante, es así que el equipo se ha calibrado bajo los parámetros experimentales del catálogo DATA PACK E 232 5957 del ANEXO A3, sin embargo los resultados de las pruebas realizadas con este sistema extensiométrico no satisfacen los requerimientos técnicos de un estudio que requiere la mayor precisión, fiabilidad y estabilidad en la adquisición de datos.

**Tabla 6.1.** Voltajes medidos, sistema extensiométrico RS AMIDATA.

Nº	V <sub>in</sub> (mV)	V <sub>fn</sub> (mV)	ΔV
1	3,5	3,44	0,06
2	3,0	2,96	0,04
3	2,5	2,483	0,017
4	2	1,987	0,013
5	1,5	1,489	0,011

**Autor:** Diego Amancha.

Revisadas todas las posibles causas de la poca amplificación generada por el sistema adquirido, de 0.06 a 0.011 voltios, de acuerdo a los datos recolectados en cada prueba, tabla 6.1, se optó por reemplazar el amplificador RS 846-171 por el amplificador de instrumentación AD620, obteniendo una amplificación promedio al inicio de las pruebas, con la galga completamente estática de 8,161V y aplicando carga es de 2,3975V, con un rango de 5,7635V, siendo la mejor opción para la construcción de la tarjeta de adquisición de datos, estos valores pueden ser procesados con mayor facilidad para su transmisión como datos analógicos a un microprocesador y posteriormente a un computador.

Posterior a la medición, el acondicionamiento se ha establecido de acuerdo a lo descrito en la sección 2.5 y con el apoyo del programa desarrollado en Labview, ACONDIONAMIENTO.vi, llegando a obtener los siguientes resultados para una señal de salida de 0 a 5V con una R2 asumida.

**Tabla 6.2.** Resistencias requeridas,  $V_i = 3,5V$  y  $V_f = 3,44V$ ,  $\Delta V = 0,06V$

<b>R1(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3(K<math>\Omega</math>)</b>
0,15	10	0,5
1,5	100	5,1
3	200	10
4,5	300	15
6	400	20,4
7,5	500	25,6

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 6.3.** Resistencias requeridas,  $V_i = 3V$  y  $V_f = 2,96V$ ,  $\Delta V = 0,04$

<b>R1(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3(K<math>\Omega</math>)</b>
0,1	10	0,4
1	100	3,9
2	200	7,9
3	300	11,9
4	400	15,9
5	500	19,9

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 6.4.** Resistencias requeridas,  $V_i = 2,5V$  y  $V_f = 2,483V$ ,  $\Delta V = 0,017$

<b>R1(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3(K<math>\Omega</math>)</b>
0,04	10	0,2
0,4	100	2
0,85	200	4
1,27	300	6,1
1,7	400	8,1
2,1	500	10,2

**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 6.5.** Resistencias requeridas,  $V_i = 2V$ ,  $V_f = 1,987V$ ,  $\Delta V = 0,013V$

<b>R1(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3(K<math>\Omega</math>)</b>
0,03	10	0,19
0,33	100	1,95
0,65	200	3,9
0,97	300	5,8
1,3	400	7,8
1,6	500	9,7

**Autor:** Diego Amancha.

En la siguiente tabla se puede observar que el valor de variación de voltaje es bastante pequeño y además los valores de resistencia requeridos se vuelven más difíciles de conseguir, por lo que una solución sería la utilización de potenciómetros de precisión, sin embargo el costo que esto implica no justifica su adquisición.

**Tabla 6.6.** Resistencias requeridas,  $V_i = 1,5V$  y  $V_f = 1,489V$ ,  $\Delta V = 0,011V$

<b>R1(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R2(K<math>\Omega</math>)</b>	<b>R3(K<math>\Omega</math>)</b>
0,02	10	0,22
0,28	100	2,2
0,55	200	4,4
0,83	300	6,6
1,1	400	8,78
1,38	500	10,97

**Autor.** Diego Amancha.

### **6.6.5 Acondicionamiento con amplificador operacional**

El acondicionamiento de la señal de la galga extensiométrica se realizó mediante el amplificador de instrumentación AD620, para el acondicionamiento del voltaje de salida que el sensor extensiométrico genera desde el cuarto de puente de Wheatstone, cuyo diseño hace referencia de la utilidad de este integrado en la figura del *ANEXO A6*, recopilada en la figura 6.23, cuyo esquema es la base para el diseño del sistema extensiométrico utilizado en el presente trabajo de tesis.

La ganancia  $G=1000$  se ha establecido mediante experimentación, resultando ser éste valor como el que más se ajusta a la sensibilidad de la galga extensiométrica; por tanto  $R_G$  calculada es:

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G - 1}$$

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{1000 - 1}$$

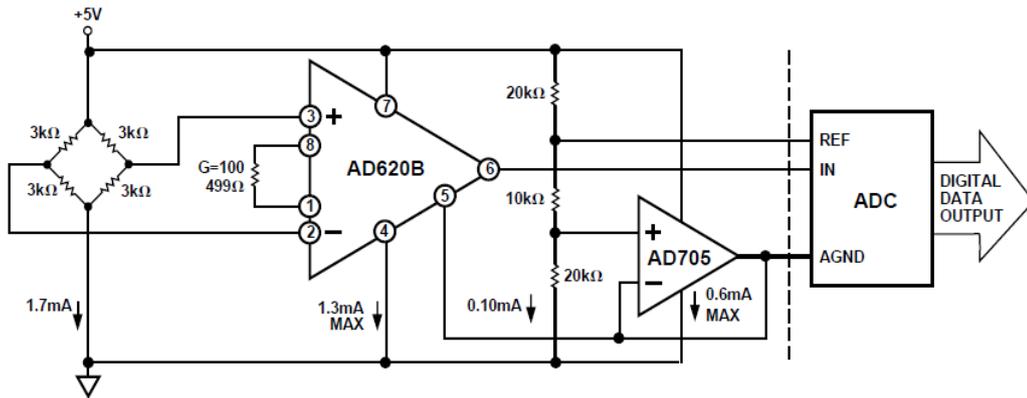
$$R_G = 0.04945k\Omega = 49.5\Omega \cong 50\Omega$$

**Tabla 6.7.** Voltaje de salida, amplificador de instrumentación AD 620.

Nº	V <sub>in</sub> (V)	V <sub>fn</sub> (V)
1	8,16	2,88
2	8,16	2,76
3	8,16	2,55
4	8,16	2,24
5	8,16	2,55
6	8,17	2,48
7	8,16	2,33
8	8,17	2,80
9	8,16	2,61
10	8,16	2,23
11	8,16	2,00
12	8,16	2,42
13	8,16	2,32
14	8,16	2,11
15	8,16	2,43
16	8,16	2,18
17	8,16	2,34
18	8,16	2,08
19	8,16	2,34
20	8,16	2,30

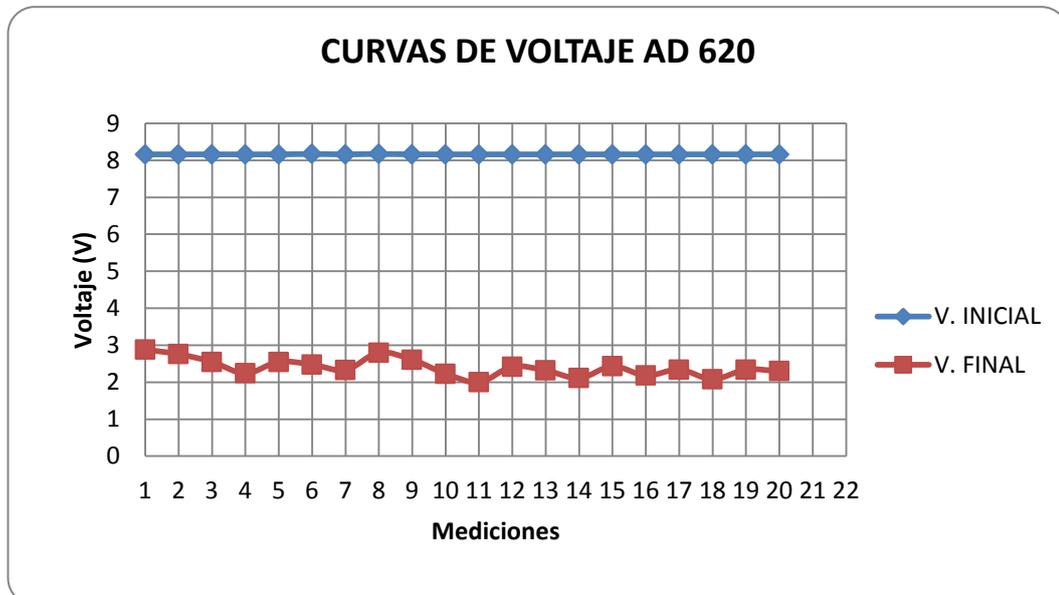
**Autor:** Diego Amancha.

El valor de ganancia del amplificador de instrumentación AD 620 debe conectarse entre los pines 1 y 8, figura 6.23, de acuerdo a la figura 2.28, alimentado con  $\pm 9V$ , obteniendo una variación de voltaje de 3.5 a 4.8 voltios, valores que se pueden transmitir sin mayores inconvenientes a un computador siguiendo el diagrama de la figura 2.23, los resultados de éstas pruebas se indican en la tabla 6.7 y la linealización de estos valores se resume en la figura 6.24.



**Figura 6.23.** Circuito de monitor de presión que opera sobre una fuente de +5 V único. ANEXO A6.

**Autor.** Diego Amancha.



**Figura 6.24.** Curvas de voltaje, amplificador de instrumentación AD 620.

**Autor:** Diego Amancha.

### 6.6.6 Acondicionamiento de voltaje de salida, operacional LM 741

Tal como se describe en la sección de acondicionadores del capítulo 2 y de acuerdo a las especificaciones del ANEXO A6-1, mediante este acondicionador se buscó regular el voltaje de salida del amplificador de instrumentación AD 620, del pin 1 y 6; hasta un voltaje inicial sin carga ( $V_{in}$ ) de 5V, y un voltaje final ( $V_{fn}$ ) de 0V, valores que pueden ser transmitidos como datos analógicos hacia un computador. Los requerimientos para la evaluación y los resultados son:

**Tabla 6.8.** Requerimientos del amplificador operacional LM 741.

V. alimentación	R1(K $\Omega$ )	R2(K $\Omega$ )	R3(K $\Omega$ )
12V	50	200	100

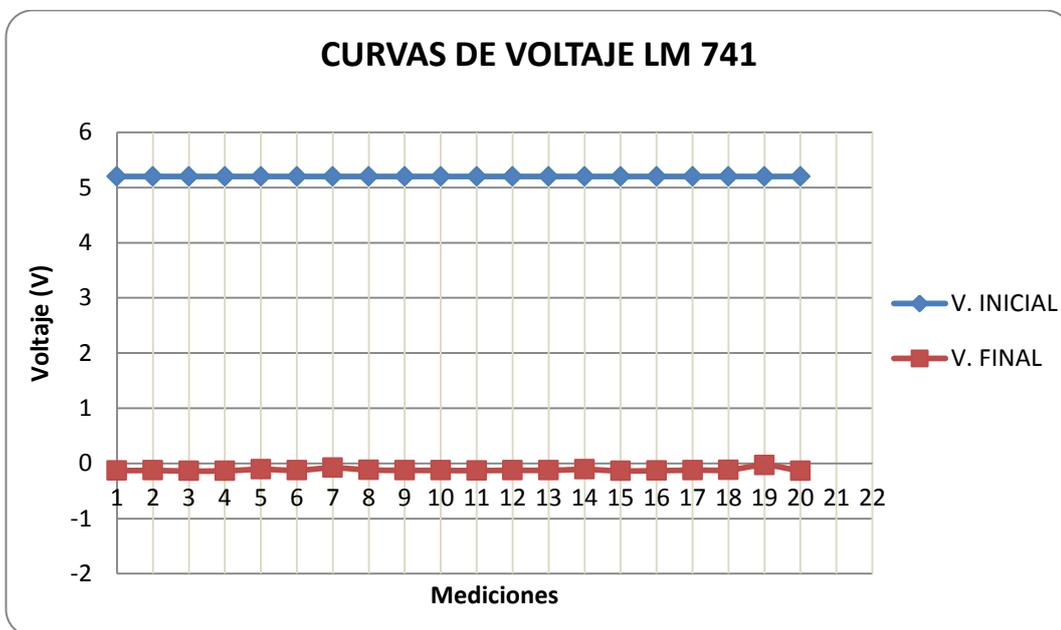
**Autor:** Diego Amancha.

**Tabla 6.9.** Voltaje de salida, amplificador operacional LM 741.

Nº	$V_{in}$ (V)	$V_{fn}$ (V)
1	5,20	-0,132
2	5,20	-0,128
3	5,20	-0,133
4	5,20	-0,135
5	5,20	-0,124
6	5,20	-0,126
7	5,20	-0,127
8	5,20	-0,123
9	5,20	-0,126
10	5,20	-0,128

N°	Vin (V)	Vfn (V)
11	5,20	-0,131
12	5,20	-0,125
13	5,20	-0,127
14	5,20	-0,129
15	5,20	-0,133
16	5,20	-0,132
17	5,20	-0,123
18	5,20	-0,125
19	5,20	-0,132
20	5,20	-0,133

**Autor:** Diego Amancha.



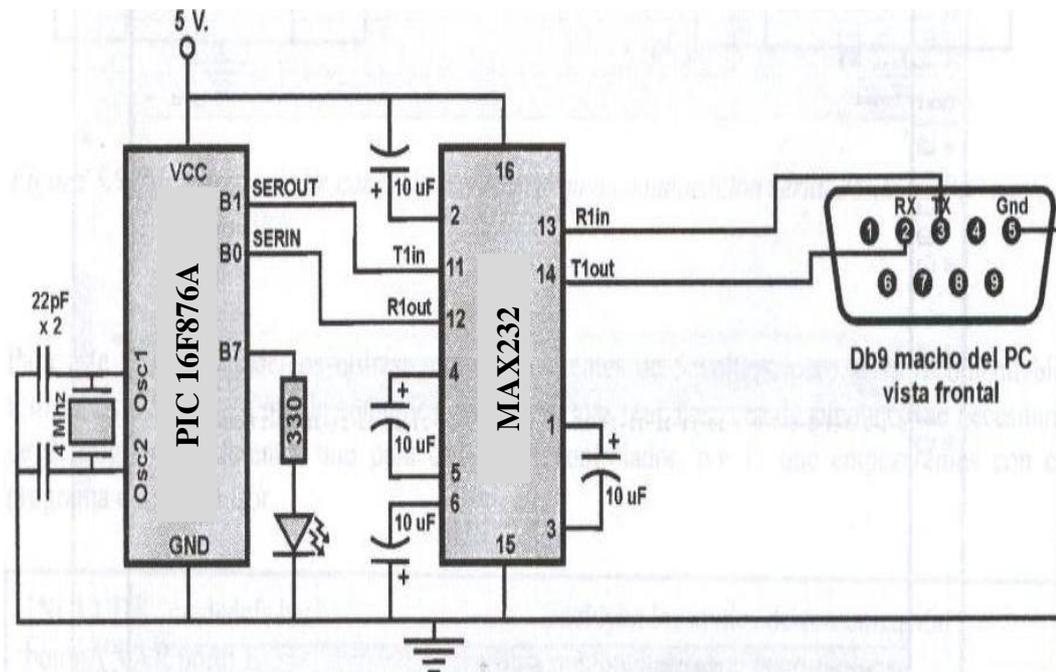
**Figura 6.25.** Curvas de voltaje, amplificador operacional LM 741.

**Autor:** Diego Amancha.

### 6.6.7 Adquisición de datos

De acuerdo a la figura 2.13 la adquisición de datos se realiza con una tarjeta PCI 6024E que transmite la información al computador para su procesamiento en el programa de instrumentación virtual LabView, sin embargo el costo elevado de este equipo, disponible en la página oficial de National Instruments por 1450 dólares, ha sido el factor para la utilización de un equipo de menor costo pero con características similares; es así que se ha establecido la utilización de un microcontrolador programable, el PIC 16F876A. Revisar ANEXO A7 y A8.

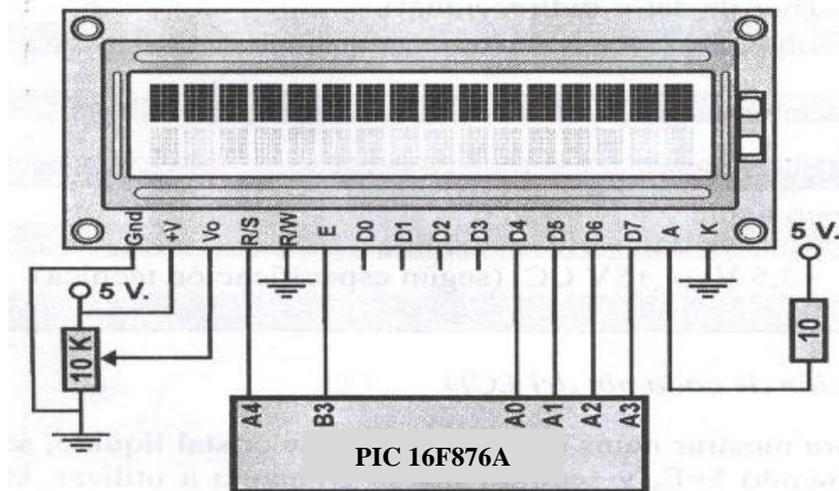
La utilización de este integrado se ha fundamentado en base a la figura 6.24, donde se detallan los parámetros de conexión para enviar y recibir datos entre el PIC y la PC, incluyendo comunicación serial mediante el integrado MAX232 que es una solución cuando se quiere transmitir datos a mayor distancia, conectados mediante el conector DB9.



**Figura 6.26.** Diagrama de conexión del PIC y del CI. MAX232 para enviar y recibir datos entre el PIC y un PC.

**Fuente.** Microcontroladores PIC Programación en Basic. Carlos A. Reyes, Ecuador 2006.

Una aplicación adicional que se ha utilizado de este microcontrolador es la de visualización de datos en una pantalla LCD de 16x2(Columnas, Filas).



**Figura 6.27.** Diagrama de conexión de un LCD al PIC.

**Fuente.** Microcontroladores PIC Programación en Basic. Carlos A. Reyes, Ecuador 2006.

### 6.6.8 Instrumentación virtual

Los datos acondicionados en el integrado AD620 son del tipo analógico, con una variación del voltaje de 0 a 5V, este voltaje es convertido en datos digitales de 0 a 255 gracias al PIC 16F876A, de acuerdo a lo descrito al ANEXO A8. Esta información es transmitida por el CI. MAX232 hacia el computador por el puerto serial para poder establecer una comunicación entre el PIC y la PC con la utilización del programa LabView.

### 6.6.9 Instrumentación virtual con LabView

Dentro de este programa se maneja la comunicación entre el sensor y la PC mediante el puerto serial, utilizando el PIC 16F876A utilizado como bus y convertor de datos de analógicos a digitales y digitales a analógicos.

La programación dentro de LabView se ha configurado para leer y escribir datos así como para su procesamiento y el manejo de la información destinada al cálculo de la fuerza de pandeo en las probetas donde se han colocado las galgas extensiométricas.

El primer parámetro a establecer es la utilización del puerto serial con LabView, para lo cual se ha utilizado la función VISA como se indica en la sección 2.2.6.3.

### 6.6.9.1 Configuración del puerto serial, VISA Configure Serial Port

Para iniciar una sesión de comunicación entre LabView y el puerto serial se debe configurar el puerto de acuerdo a la figura 6.28 mediante VISA Configure Serial Port, cuya ubicación se especifica en la figura 2.40, en cuanto a los valores a configurar en esta sección se debe observar que ya existen valores establecidos por defecto por LabView, de los cuales solo se modifican el *VISA resource name*, *baud rate* y *data bits*, de acuerdo a lo establecido por el autor del presente trabajo de tesis.

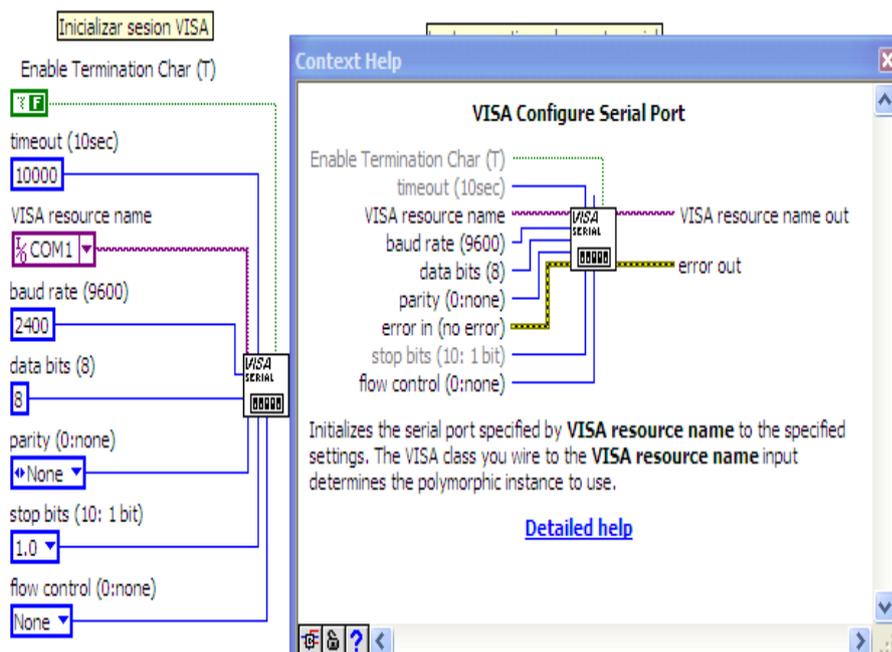
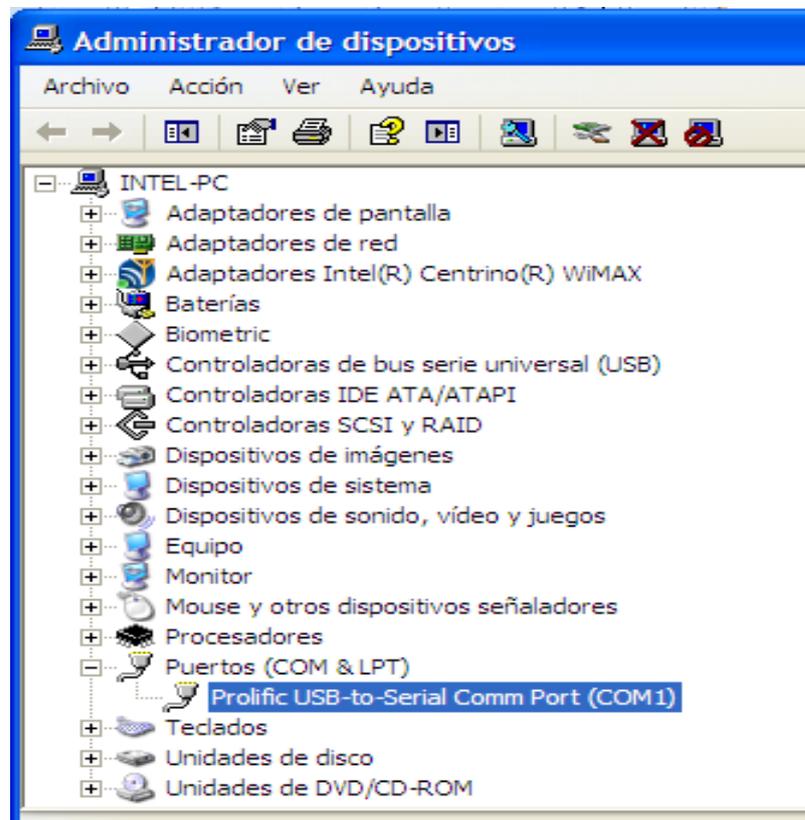


Figura 6.28. Inicializar sesión VISA.

Fuente: LabView 7.0. Autor. Diego Amancha

El *VISA resource name* , dependiendo de la dirección que el computador designe al puerto serial utilizado, por ejemplo COM1, COM2, COM3, etc.; este dato se puede obtener como indica la figura 6.29 de *INICIO /MIPC /PROPIEDADES /HARDWARE/ADMINISTRADORDEDISPOSITIVOS/ PUERTOS COMYLPT* ; si el puerto de conexión en la comunicación PIC-PC es cambiado, la dirección de este también varía, por lo que se recomienda trabajar en un mismo puerto o a su vez tener identificado la dirección de todos los puertos disponibles.

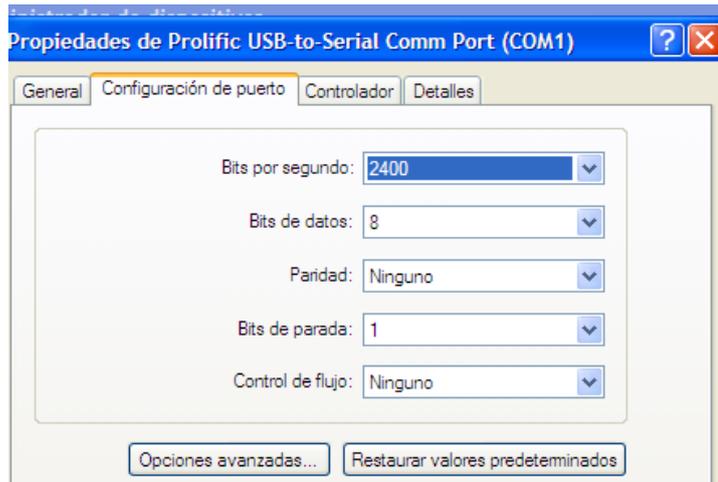
El valor del *data bits* se verifica de acuerdo al *ANEXO A7* correspondientes a número de bits que utiliza el PIC 16F876A.



**Figura 6.29.** Dirección del puerto serial.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha

El *baud rate*, velocidad de transferencia se verifica en las propiedades de puerto utilizado, figura 6.30, teniendo que verificar además la velocidad de transmisión del PIC programa previamente.



**Figura 6.30.** Configuración de transmisión por el puerto serial con el adaptador USB.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha

Se debe acotar que la mayoría de computadoras actuales no tienen conectores del tipo serial DB9 por lo que se ha utilizado un cable convertidor de USB a DB9 de la firma TRENDnet, garantizando la transmisión de datos debido a los driver que vienen con el cable.

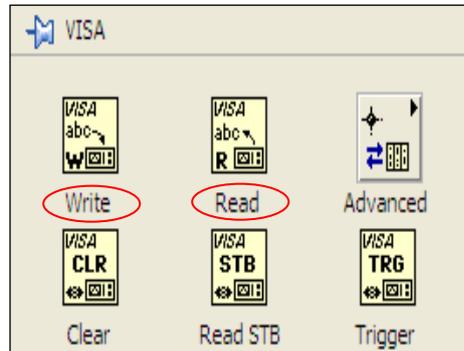


**Figura 6.31.** Instalación del adaptador USB-Serial TRENDnet.

**Fuente:** [www.trendnet.com](http://www.trendnet.com)

### 6.6.9.2 Configuración de lectura y escritura por el puerto serial

Tanto para escritura y lectura del puerto serial en LabView, después de configurar el puerto se procede de igual forma para los dos casos, solo varía la opción elegida, WRITE o READ, figura 6.32.



**Figura 6.32.** Configuración VISA WRITE-READ, escritura-lectura.

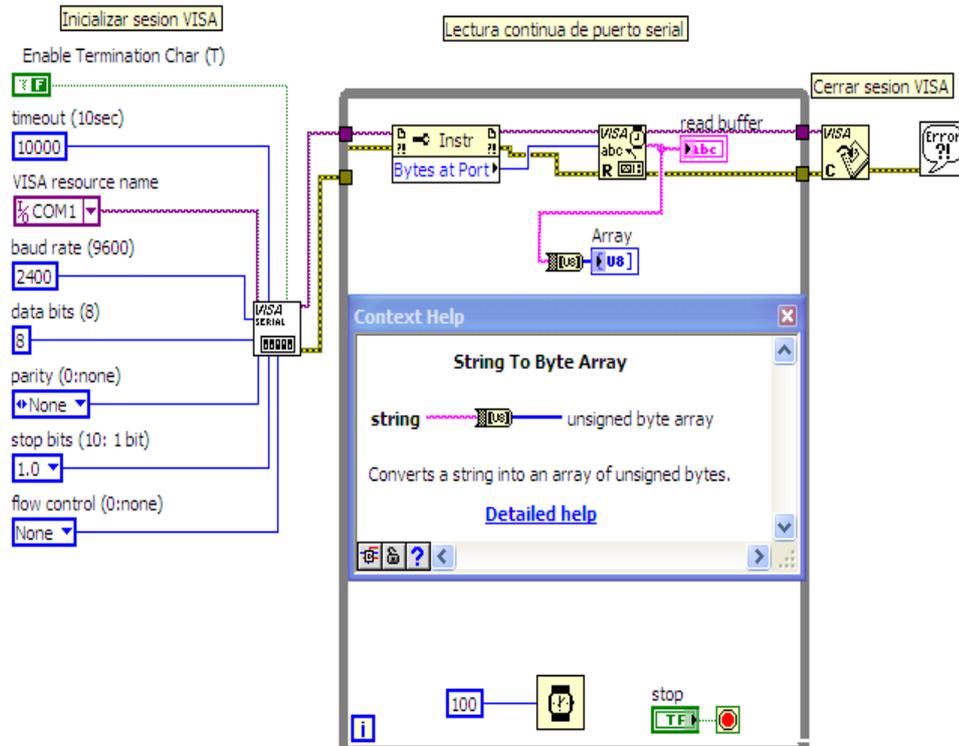
**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha

Los datos enviados desde el PIC a la PC por el cable Serial-USB TRENDnet, se leen en LabView como caracteres ASCII, *string*, por lo que se debe adecuar la lectura de datos en formato decimal para su utilización dentro del entorno de programación virtual del programa utilizado, esto es posible utilizando la opción *String To Byte Array* que convierte una cadena de texto en una serie numérica.

Además se ha incluido las opciones de cerrar sesión visa, *VISA Close*, un gestor de error, *Simple Error Handler*, y un temporizador, *WAIT*, que controla la velocidad de lectura y escritura de datos, establecida en 100 milisegundos, para que el programa funcione de manera eficiente y adecuada.

En la figura 6.33 se observa la configuración completa para la lectura de datos que envía el PIC 16F876A, mismos que emite el sensor colocado en las probetas de ACERO AISI – SAE 1018, estos datos son procesados dentro del entorno de instrumentación virtual de LabView para su comparación con los datos teóricos

que PANDEO.vi visualiza de acuerdo al procedimiento de cálculo que la Norma ASTM E9-89a establece.



**Figura 6.33.** Lectura de datos en formato ASCII y decimal.

**Fuente:** LabView 7.0. **Autor.** Diego Amancha

## 6.7 METODOLOGÍA

### 6.7.1 Probetas

De acuerdo a la norma para Métodos de Prueba Estándar de Compresión de Análisis de Materiales Metálicos a temperatura ambiente, se recomienda dos tipos de probetas para ensayos, sólido rectangular y cilíndrico, cuyas dimensiones se detallan en la tabla 2.4 y 2.5 respectivamente, de estas, las de sólidos cilíndricos son las que mayor facilidad de adquisición en el mercado tienen, así como una amplia variedad de diámetros y materiales según lo requiera el consumidor.

Se recomienda que la relación longitud-diámetro (L/D) aceptada es de 1.5 a 2 para materiales de alta resistencia a la compresión; con lo que el dimensionamiento final está a cargo del autor, considerando que el proyecto se enfoca a la verificación instrumental y visual del pandeo de columnas.

De acuerdo a la sección anterior, las probetas para la realización de pruebas de pandeo tienen un diámetro de 0.5 pulgadas y una longitud de 10 pulgadas, maquinadas en acero al carbono AISI-SAE 1018 cuyas propiedades se describen en el *ANEXO A2*.

Se ha revisado además que para la realización de cada prueba las galgas han sido instaladas sobre la superficie de cada probeta bajo los parámetros que la Norma ASTM E9-89a; limpiando la superficie con desengrasantes especiales como el utilizado en las pruebas, IMPRESOL, revisando el paralelismo de las superficies de apoyo de las probetas y verificando la fiabilidad del equipo utilizado.



**Figura 6.34.** Prueba de compresión, Máquina UTA PRESS.

**Autor.** Diego Amancha. **Lugar.** Laboratorios F.I.C.M.

**Tabla 6.10.** Pruebas de compresión UTA-01.

<b>N°</b>	<b>CARGA (lb)</b>	<b>DEFLEXIÓN (mm)</b>	<b>VOLTAJE (V)</b>
1	7897	16,00	5,127
2	7749	15,70	5,030
3	8046	16,30	5,223
4	7799	15,80	5,062
5	7897	16,00	5,127
6	7947	16,10	5,159
7	7947	16,10	5,159
8	7897	16,00	5,127
9	7799	15,80	5,062
10	7700	15,60	4,998
11	7848	15,90	5,095
12	7749	15,70	5,030
13	7996	16,20	5,191
14	7947	16,10	5,159
15	7799	15,80	5,062
16	7799	15,80	5,062
17	7799	15,80	5,062
18	7996	16,20	5,191
19	7799	15,80	5,062
20	7996	16,20	5,191
21	7848	15,9	5,095
22	7749	15,7	5,030

<b>Nº</b>	<b>CARGA (lb)</b>	<b>DEFLEXIÓN (mm)</b>	<b>VOLTAJE (V)</b>
23	7700	15,6	4,998
24	7897	16	5,127
25	7848	15,9	5,095
26	7996	16,2	5,191
27	8046	16,3	5,223
28	7848	15,9	5,095
29	7749	15,7	5,030
30	7897	16	5,127
31	7996	16,2	5,191
32	7897	16	5,127
33	7848	15,9	5,095
34	7749	15,7	5,030
35	7947	16,1	5,159
36	7848	15,9	5,095
37	7897	16	5,127
38	7996	16,2	5,191
39	7947	16,1	5,159
40	7897	16	5,127
<b>Promedio</b>	<b>7875,21</b>	<b>15,955</b>	<b>5,112</b>

**Autor:** Diego Amancha.

El valor promedio de carga máxima aplicada, 7875,21 lb, obtenido en éstas pruebas con la máquina UTA PRESS comparado al valor máximo de 8100 lb obtenido en pruebas en la máquina SOIL TEST CT-769E, tabla 4.1, demuestra la confiabilidad del equipo diseñado en el presente trabajo de tesis, tomando en

consideración que la diferencia de carga existente, 224,79 lb, se debe primeramente a la condición de empotramientos de la probeta; y segundo a la forma de lectura, es decir; en la máquina UTA PRESS la lectura de datos es de forma digital mediante un display y en la pantalla de un computador, mientras que en la máquina SOIL TEST CT-769E los datos se visualizan en un dispositivo mecánico a manera de manómetro.

En la tabla 6.10 el valor de carga que corresponde a cada estado de voltaje se establece dividiendo la voltaje promedio medida para la carga promedio,  $5,112\text{V}/7875,21\text{lb}$ , dando como resultado de  $6,49 \cdot 10^{-4}\text{V/lb}$ ; en cuanto a la deflexión, se divide el voltaje promedio para la deflexión promedio teniendo  $5,112\text{V}/15,955\text{mm}$ , cuyo resultado es de  $0,32\text{V/mm}$ . Los valores de estados corresponde al Anexo A8, determinando además que cada pulso obedece a una señal de voltaje dividiendo el voltaje promedio para el número de pulsos,  $5,112/255=0,02$ .

$$\text{Factor de carga} = 6,49 \cdot 10^{-4}\text{V/lb} = 1 \text{ estado o pulso}$$

$$\text{Factor de deflexión} = 0,32\text{V/mm} = 1 \text{ estado o pulso}$$



**Figura 6.35.** Visualización de datos. Izquierda, UTA PRESS; derecha SOIL TEST CT-769E

**Autor.** Diego Amancha. **Lugar.** Laboratorios F.I.C.M.

## 6.7.2 Máquina de compresión

La máquina UTA PRESS entregada a la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica ha sido diseñada para realizar ensayos de resistencia a la compresión en probetas de acero AISI 1018 de acuerdo a especificaciones de la Norma ASTM E9-89a. Los rangos disponibles en fuerza de compresión van desde 2.205lbf. (9.81 N) hasta 90000 lbf. (403,2 KN). De fácil manejo y con disponibilidad de 250 x 250mm (*revisar ANEXOS C*) en la base superior y en la placa de compresión para implementación de accesorios para diversas condiciones de empotramiento, la longitud máxima promedio para columnas de prueba es de 600mm, dependiendo de los requerimientos del usuario.

La máquina de compresión denominada UTAPRESS se basa en el modelo de la Norma ASTM E9-89a, figura 2.9 y a la pequeña prensa operada por tornillos de potencia de la figura 8.3 expuesta en el libro de Diseño en Ingeniería Mecánica de Joshep E. Shigley, Sexta edición, *ANEXO A9*. Se incluye a estos modelos una base para la máquina, en la cual se ubicará un variador de frecuencia con una alimentación de 220V para manipular la potencia del motor dispuesto para la aplicación de carga.

### 6.7.2.1 Fuerza de compresión

Para la determinación de la fuerza de compresión máxima para la cual se debe diseñar la máquina para pruebas de pandeo de columnas de sección circular de acero AISI 1018 de y según el *ANEXO A2*, se han considerado dos parámetros:

El primero tomando datos experimentales descritos en la tabla 4.1 donde se requiere de 88000lb para pandear una columna de acero AISI 1018 de 1,25 pulgadas de diámetro y 12,5 pulgadas de longitud y de la tabla 4.2, con 8100lb requeridas para pandear una probeta de 0,5 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud, de estas pruebas se asume la máxima carga requerida tomando en consideración que las condiciones de extremos no son totalmente exactas, siendo la máxima fuerza de compresión según la Norma ASTM E9-89a, *ANEXOS Sección D*, donde se toma un rango de compensación de 0,2%, para este caso:

$$F = 88000lb + 0,2\%(88000lb) = \mathbf{88176lb}$$

El segundo parámetro es el establecido de acuerdo a cálculo matemático según lo descrito en el capítulo 2; tomando la ecuación 2.22 y 2.23;

$$\left(\frac{L}{k}\right)_i = \left(\frac{L}{\rho}\right)_i = \left(\frac{2 \cdot \pi^2 \cdot C \cdot E}{S_y}\right)^{1/2}$$

$L/\rho > (L/\rho)_i$  Se emplea la de Euler.

$L/\rho < (L/\rho)_i$  Se emplea la de Johnson.

El valor mínimo del radio de giro descrito por la ecuación 2.8 y tomando los datos del ANEXO A1, donde para secciones circulares se deduce:

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} = \sqrt{\frac{\pi * d^4 / 64}{\pi * d^2 / 4}} = \sqrt{\frac{d^2}{16}}$$

$$r = d/4$$

En la siguiente tabla los valores del coeficiente de fijación (c), han sido tomados de la Norma ASTM E9-89a, ANEXOS Sección D, Ítem 3.2.6.

**Tabla 6.11.** Determinación de columnas cortas y largas.

DETALLE DE PROBETA	Diámetro (d) plg	Longitud (L) plg	Radio de giro (plg)	L/p	C=1	C=2	C=3,75
Corta 1	1,12	1	0,28	3,57	104,49	147,76	202,34
Corta 2	0,5	1	0,125	8	104,49	147,76	202,34
Media 1	0,5	1,5	0,125	12	104,49	147,76	202,34
Media 2	0,8	2,38	0,2	11,9	104,49	147,76	202,34

Media 3	1	3	0,25	12	104,49	147,76	202,34
Media 4	1,12	3,38	0,28	12,07	104,49	147,76	202,34
Larga 1	0,8	6,38	0,2	31,9	104,49	147,76	202,34
Larga 2	1,25	12,5	0,3125	40	104,49	147,76	202,34
UTA 11001	0,5	10	0,125	80	104,49	147,76	202,34
UTA11002	<b>0,5</b>	<b>14</b>	<b>0,125</b>	<b>112</b>	<b>104,49</b>	147,76	202,34
UTA 11003	<b>0,5</b>	<b>19</b>	<b>0,125</b>	<b>152</b>	104,49	<b>147,76</b>	202,34
UTA 11004	<b>0,5</b>	<b>26</b>	<b>0,125</b>	<b>208</b>	104,49	147,76	<b>202,34</b>

**Autor:** Diego Amancha

Por lo tanto se realiza el cálculo para las probetas de la tabla 6.11, donde se resalta con color gris los datos a calcularse con la fórmula de J.B Johnson para columnas intermedias y de color celeste los datos a calcularse con la fórmula de EULER para columnas largas.

A continuación se detalla los valores calculados del esfuerzo crítico por unidad de área y la fuerza máxima de compresión; se establece además que la ecuación para columnas largas, EULER, según la Norma ASTM E9 (ecuación 2.25), ésta es similar a las propuestas por Robert Mott y Shigley, ecuación 2.15.

$$\frac{P_{cr}}{A} = \frac{C \cdot \pi^2 \cdot E}{(L/r)^2}$$

En caso de columnas intermedias se determinó trabajar con la ecuación 2.17 de J.B. JOHNSON.

$$P_{cr} = AS_y \left[ 1 - \frac{S_y(C \cdot L/r)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot E} \right]$$

También expresada como:

$$\frac{P_{cr}}{A} = S_y - \frac{S_y^2}{4 * \pi^2 * E * C} \left(\frac{L}{r}\right)^2$$

**Tabla 6.12.** Determinación de esfuerzo de compresión, para  $C=3,75$ .

DETALLE DE PROBETA	Longitud (L) plg	Radio de giro (r) plg	(L/r)	Scr (lb/plg <sup>2</sup> )	Fcr (lb)
Corta 1	1	0,28	3,57	<b>53691,6</b>	<b>52897,2</b>
Corta 2	1	0,125	8	53658	10535,7
Media 1	1,5	0,125	12	53605,6	10525,4
Media 2	2,38	0,2	11,9	53607,1	26945,9
Media 3	3	0,25	12	53605,6	42101,7
Media 4	3,38	0,28	12,07	53604,4	52811,3
Larga 1	6,38	0,2	31,9	53032,6	26657,1
Larga 2	12,5	0,3125	40	<b>52650,6</b>	<b>64612,1</b>
UTA 11001	10	0,125	80	49502,6	9719,81
UTA 11002	14	0,125	112	45473,1	8928,62
UTA 11003	19	0,125	152	38547,4	7568,76
UTA 11004	26	0,125	208	25407,4	4988,74

**Autor:** Diego Amancha

De los datos de la tabla 6.12, la máxima fuerza de compresión requerida es de 64612,1 lb; carga que es inferior a la establecida experimentalmente, por lo que se asume el mayor valor, es decir 88176 lb.

Adicionalmente se debe considerar la carga que ejerce el peso de los diversos componentes de la máquina, estos valores se detallan en la siguiente tabla y son tomados de la sección de *ANEXOS B*.

**Tabla 6.13.** Descripción de pesos de partes de la máquina UTA PRESS.

Nº	DESCRIPCIÓN	Nº Partes	ANEXO	PESO (gr)	Peso total (gr)
1	Base inferior	1	Plano 02	27163,10	27163,10
2	Base superior	1	Plano 03	9342,17	9342,17
3	Tornillo de potencia	2	Plano 04	7790,18	15580,36
4	Placa de compresión	1	Plano 05	28026,50	28026,50
5	Bocín inferior	2	Plano 06	291,40	582,80
6	Bocín superior	2	Plano 07	1382,45	2764,90
7	Eje guía	4	Plano 08	3443,43	13773,72
8	Probeta L2	1	Plano 09	1981,90	1981,90
				Total (gr)	99215,45
				<b>Total (lb)</b>	<b>219,27</b>

**Autor:** Diego Amancha

La carga total de elementos móviles es el peso total menos el peso de la base inferior, es decir:

$$F_{EM} = 219,27lb - 60lb = 159,27lb$$

Con lo que la carga total de compresión es:

$$F_{max} = 88176lb + 159,27lb = 88335,27lb \cong \mathbf{90000lb}$$

La aproximación se hace considerando que pueden acoplarse sistemas adicionales a la máquina de compresión.

### 6.7.2.2 Base inferior y placa de compresión

Constituidas de acero estructural ASTM A36, su método de cálculo es igual solo con una diferencia de aplicación de fuerzas de 160lb respecto una carga máxima de compresión  $F_{max} \cong \mathbf{90000lb}$ , debido a que la base inferior soporta la fuerza

de compresión y el peso de los elementos de la máquina y la placa inferior solo está sometida a  $F_{max}$ , de lo cual se deduce que la variación en el cálculo es:

$$\%Error = \frac{160lb * 100}{90000lb} = 0,178\%$$

Las propiedades mecánicas de este material son: módulo de resistencia a la fluencia de  $S_y = 36KPSI(250MPa)$ ; módulo de elasticidad  $E= 290007,55 KPSI(200GPa)$ , el dimensionamiento se realizó en base a datos de máquinas existentes en la Universidad Técnica de Ambato en los laboratorios de suelos, como la Máquina Universal y la máquina SOIL TEST CT769E; además de la máquina MTS del Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional.

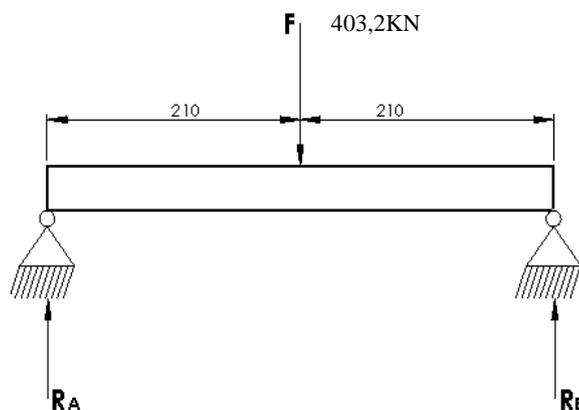
#### Datos para el diseño de la base inferior:

Placa de (L=0,42; h=0,035 y b=0,25) m ANEXO B, Plano 02

$$F = 90000lb (403200N)$$

$$S_y = 36 KPSI(250MPa)$$

$$E = 29007,55 KPSI (200GPa);$$



$$\sum M_A = 0$$

$$R_B * 0,42m - 403,2KN * 0,21m = 0$$

$$R_B = \frac{403,2KN * 0,21m}{0,42m} = 201,6KN$$

$$\sum F_Y = 0$$

$$R_A + R_B - 403,2KN = 0$$

$$R_A + 201,6KN - 403,2KN = 0$$

$$R_A = 201,6KN$$

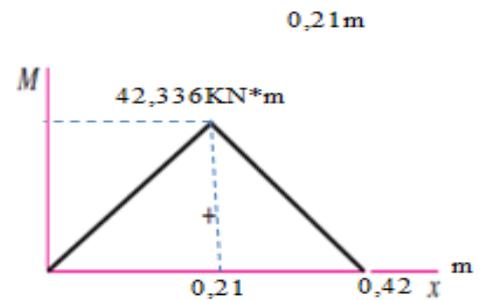
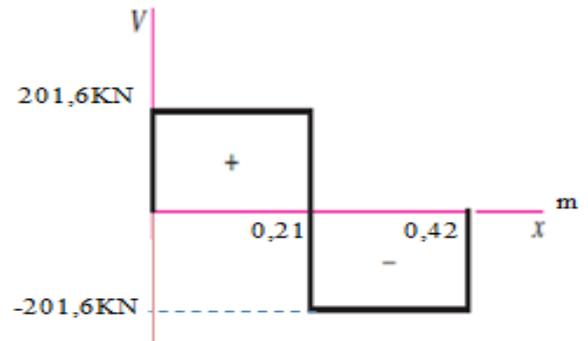
$$M = \frac{F * x}{2}$$

$$M = \frac{403,2KN * 0,21m}{2} = 42,336KN * m$$

$$I_x = \frac{b * h^3}{12} = \frac{0,25m * 0,035m^3}{12} = 8,9 * 10^{-6}m^4$$

$$\sigma_x = \frac{M * G}{I}; \quad \text{si } G = 0,5b = 0,5(0,025m) = 0,0125m$$

$$\sigma_x = \frac{42,336KN * m * 0,0125m}{8,9 * 10^{-5}m^6} = 59,46MPa$$



Según la teoría de Von Mises

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 * \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(59,46MPa)^2 + 0^2}$$

$$\sigma_{eq} = 59,46MPa$$

De esto el factor de seguridad debe cumplir:  $2 \leq n \leq 8$

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{eq}} = \frac{250MPa}{59,46MPa} = 4,2$$

$$2 \leq 4,2 \leq 8 \quad \mathbf{OK}$$

Para la placa de compresión se tiene un margen de error de 0,178% por lo que la variación en el factor de seguridad es de 0,0075, valor que no resulta significativo y por ende los dos elementos satisfacen los requerimientos de diseño.

### 6.7.2.3 Tornillo de potencia<sup>17</sup>, (Anexo A9)

Dada la  $F_{max} = 90000lb$ , la carga que debe elevar cada tornillo es  $F = 45000lb$ , asumiendo diámetro del tornillo de  $d = 1,5plg$  con un número de entradas  $n_t = 2$  con un paso  $p = 0,25plg$ .

Teniendo un avance de:

$$l = n_t * p = 4 * 0,25plg = 1plg$$

---

<sup>17</sup> **Fuente.** Diseño en Ingeniería Mecánica. Joshep E. Shigley. Sexta edición. Capítulo 8. Sección 2. Mecánica de los tornillos de transmisión de potencia.

Donde el diámetro medio:

$$d_m = d - 0,5p = 1,5plg - 0,5 * 0,25plg$$

$$d_m = 1,375plg$$

El diámetro de raíz se calcula como:

$$d_r = d - p = 1,5plg - 0,25plg$$

$$d_r = 1,25plg$$

De esto el máximo par de torsión es el establecido para subir la carga, este se calcula con la ecuación de  $T_s$  sumada la fuerza del collarín, de donde el factor  $f = 0,13$  (acero-bronce lubricado con aceite para máquinas) de acuerdo a la Tabla A, *Anexo A9* y el coeficiente  $f_c = 0,08$ , Tabla B, *Anexo A9*.

$$T_s = \frac{F * d_m}{2} \left( \frac{l + \pi * f * d_m}{\pi * d_m - f * l} \right) + \frac{F * d_c * f_c}{2}$$

$$T_s = \frac{45000lb * 1,375plg}{2} \left( \frac{1 + \pi * 0,13 * 1,375}{\pi * 1,375 - 0,13 * 1} \right) + \frac{45000lb * 3plg * 0,08}{2}$$

$$T_s = 7719lb * plg + 5400lb * plg = 13119lb * plg$$

Con una eficiencia de:

$$e = \frac{F * l}{2 * \pi * T} = \frac{90000lb * 0,5plg}{2 * \pi * 13119lb * plg}$$

$$e = 0,55$$

Y el par para bajar la carga:

$$T_s = \frac{-F * d_m (\pi * f * d_m - l)}{2} - \frac{F * d_c * f_c}{2}$$

$$T_s = \frac{45000lb * 1,375plg (\pi * 0,13 * 1,375 - 1)}{2} - \frac{45000lb * 3plg * 0,08}{2}$$

$$T_s = 434,35lb * plg - 5400lb * plg = -4965,65 lb * plg$$

Teniendo un número de revoluciones  $n = 80rpm$  establecidas en función de la sección A1.4, del capítulo 2, sobre velocidades de prueba, la potencia H requerida para subir la carga es:

$$H = \frac{T * n}{63025} HP$$

$$H = \frac{13119lb * plg * 80rpm}{63025} HP$$

$$H = 16,65HP$$

Estableciendo que la condición de auto aseguramiento se cumpla de acuerdo a:

$$\pi * f * d_m > l$$

$$\pi * 0,13 * 1,375 > 0,5$$

$$0,56 > 0,5 \text{ OK}$$

Los datos calculados han sido comprobados en el software TORNILLOS DE POTENCIA.vi como se indica en la figura 6.36, en el cual se debe ingresar los datos generales del tornillo en la parte izquierda; la visualización de los resultados se encuentran en la parte derecha del panel frontal del software.



**Figura 6.36.** Comprobación de resultados en TORNILLOS DE POTENCIA.vi.

**Autor:** Diego Amancha

Debido al alto costo de un motor de esta capacidad y a la disponibilidad del mismo se optó por mantener la fuerza máxima para el diseño de la estructura y bajar la fuerza de compresión para ensayos con probetas UTA-01 de acero AISI 1018 de 0,5 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud que requieren una carga aproximada de 10000lb. Para estas condiciones se establecen los siguientes requerimientos de acuerdo a la figura 6.37.



**Figura 6.37.** Requerimientos para F=10000lb en TORNILLOS DE POTENCIA.vi.

**Autor:** Diego Amancha

De la figura 6.37 se deduce que la potencia requerida para ensayos en probetas UTA-01 es de 1,85 HP, sin embargo no existe un motor de este valor, por lo que optó por colocar un moto de 2HP y 1800rpm con una relación de 25:1.

Se debe considerar además la colocación de un variador de frecuencia para obtener la reducción de velocidad en el motor.

#### 6.7.2.4 Ejes guías

Debido a que se tratan de elementos que no soportan una carga considerable, más bien están colocadas exclusivamente para ayudar a guiar la placa de compresión se decidió fabricarlas de acero AISI 1018 cuyo dimensionamiento se muestra en la sección de ANEXOS B, diámetro 1 pulgada y longitud 43,3 pulgadas, *plano 08*.

Sin embargo considerando que son columnas circulares la comprobación del diseño se realizó en el software PANDEO E9-11UTA, cuyos resultados se muestran en la figura 6.38. De la comprobación del diseño del eje por pandeo se puede concluir que éste puede resistir hasta 7674,5 lbf cada uno.

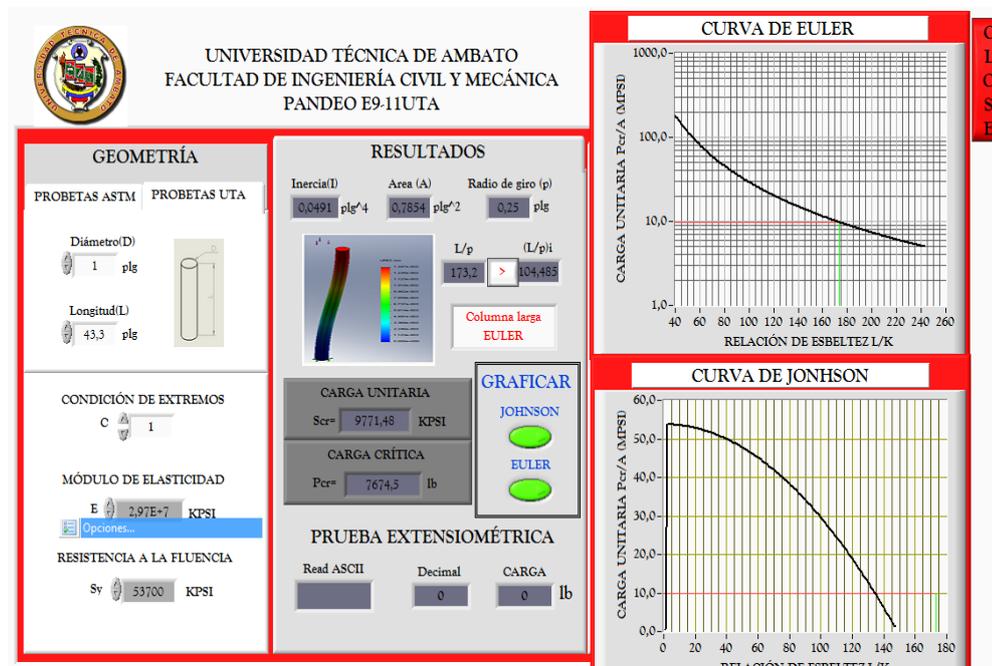


Figura 6.38. Comprobación del diseño del eje guía.

Autor: Diego Amancha.

## **6.8 ADMINISTRACIÓN**

### **6.8.1 Planeación**

Con la finalidad de anticiparse y evitar resultados incoherentes:

- Realizar el estudio previo de los parámetros, procedimientos de lo que corresponde al ensayo de pandeo bajo la Norma ASTM E9-89a.
- Controlar la geometría y el dimensionamiento de las probetas con un calibrador, así como la correcta limpieza de las mismas.
- Verificar el estado de las galgas extensiométricas para colocarlas sobre la superficie de las probetas.
- Verificar la correcta alimentación de voltaje en todos los equipos a utilizar.
- Al colocar los sensores extensiométricos evitar una continua manipulación con los dedos, para evitar daños sobre la superficie de las galgas.
- Verificar que todas las conexiones estén correctamente acopladas.
- Mantener especial atención en los cambios que tienen el sensor y la probeta durante toda la práctica de pandeo para evaluar los resultados de la mejor manera posible.

### **6.8.2 Organización**

En relación a todas las actividades descritas al realizar la práctica bajo la Norma ASTM E9-89a, los resultados al realizar las pruebas en la máquina SOIL TEST CT-769E y en la máquina UTA PRESS, se puede asegurar que se ha podido llegar a un proceso óptimo en la elaboración de una guía práctica de laboratorio (*Anexos Sección C*) referida al estudio que propone el presente trabajo de tesis.

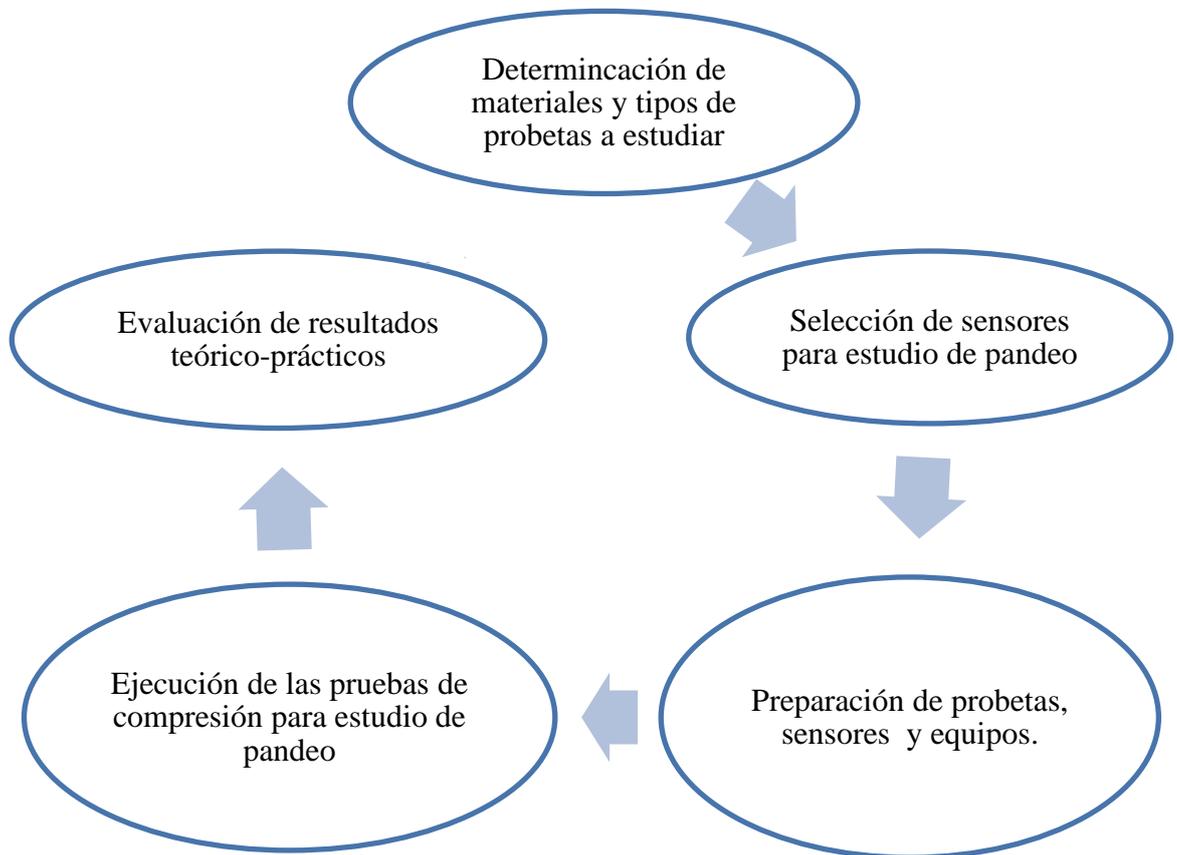
### **6.8.3 Dirección**

Mediante la dirección operacional de personal con estudios medios en extensimetría y procesos para ensayos de pandeo, se podrá realizar pruebas de compresión para estudio de pandeo de ejes de acero AISI 1018.

#### 6.8.4 Control

Es de suma importancia tomar en consideración todos los parámetros, datos teóricos y experimentales, así como la investigación y el desarrollo de los cálculos descritos para cada prueba realizada con el fin de mejorar el alcance del presente estudio y tener una mejor apreciación de la aplicabilidad de la electrónica de precisión dentro de la Ingeniería Mecánica.

A continuación se describe un diagrama del ciclo operacional que rige éste estudio.



#### 6.8.5 Análisis económico

Los valores que conlleva este estudio se detalla en las siguientes tablas que son elaboradas en su totalidad por el autor del presente trabajo de tesis.

**Tabla 6.14.** Costos de probetas de acero AISI 1018.

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Valor x metro (\$)	Total (\$)
Probetas de D=1,25plg; L=12,5plg	10	5,63	18,02
Probetas de D=1plg; L=3plg	5	4,5	2,25
Probetas de D=0,5plg; L=10plg	60	2,25	36,00
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 56,27</b>

**Tabla 6.15.** Costos de partes de la máquina para ensayos de compresión.

DESCRIPCIÓN	DETALLE	Cantidad	VALOR \$
Placa para base inferior	425x255x38 mm	1	120
Placa para base superior	425x255x10 mm	1	25
Placa de compresión	425x255x38 mm	1	120
Eje, tornillo de potencia SAE 1018	D= 50,8mm; L= 1000mm	2	45,12
Ejes laterales SAE 1018	D= 25,4mm; L= 1100mm	4	81,4
Ejes para bocín, Bronce	D= 76,2; L= 100mm	2	21,34
Eje contratuerca, SAE 1018	D= 76,2; L= 100mm	2	8,4
Catalina		2	15
Cadena de transmisión		1	10
Moto reductor	1 HP, 1750 rpm	1	230
Pernos varios			10
Tuercas varias			10
INPRESOL	Desengrasante especial	1	4
Lubricante para tornillos de potencia		1	56
Perfil para base		1	14
Sistema de compresión	Gato hidráulico	1	60
Elementos varios			100
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 930,26</b>

**Tabla 6.16.** Costos de fabricación del sistema de acondicionamiento y adquisición de datos.

DESCRIPCIÓN	DETALLE	VALOR \$
Resistencias	Valores varios	30
Condensadores	Valores varios	20
Transistores	Valores varios	30
Diodos	Valores varios	30
Galgas extensiométricas (120Ω)	Aluminio y acero	320
Amplificador para galga extensiométrica	RS 846-171	250
Adhesivo para galgas extensiométricas, CYANOACRYLATE	RS 665-4824	102
Potenciómetros de precisión	De 10 kΩ	40
Integrados de prueba	LM 741, 7805, 7905, etc.	50
Protoboard	Pruebas de laboratorio	30
Amplificador de instrumentación	AD 620	60
Baquelita y placas de prueba		50
Transformadores de prueba		18
Fuente de alimentación	De 600 W	25
Cables y conectores		25
Multímetro		35
Instrumentación para ensamble		100
Varios		100
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 1315</b>

**Tabla 6.17.** Costos de procesos de construcción de la máquina de compresión UTA PRESS.

DESCRIPCIÓN	Cantidad	VALOR \$
Rectificado de bases	3	160
Roscado de tornillos de potencia	2	70

Torneado de chaveteros		30
Fresado de bases	6	100
Perforación de bases		30
Roscado de bases	8	50
Rectificado de ejes laterales	4	50
Maquinado de bocines	4	30
Calibración de tornillos de potencia		40
Ensamble		100
Pintado		30
Varios		100
	<b>TOTAL</b>	<b>790</b>

**Tabla 6.18.** Costos adicionales del estudio.

DESCRIPCIÓN	DETALLE	VALOR \$
Asistencia técnica RS AMIDATA		159
Asistencia externa y viajes	Universidades varias	200
IVA España, portes y envío	Importación de partes	100
Investigación bibliográfica e internet		100
Imprevistos		50
	<b>TOTAL</b>	<b>\$ 609</b>

**Autor.** Diego Amancha

El costo total del estudio es de \$ 3700.53, valor que representa un 30% del valor real de un equipo similar que bordea los \$ 13000 en el mercado internacional, aun cuando se trata la construcción de un prototipo funcional para prácticas de laboratorio.

Se debe considerar que este valor no puede someterse a cálculos financieros como TMAR (Tasa mínima aceptable de retorno), VAN (Valor actual neto) y TIR (Tasa interna de retorno) puesto que no se trata de un activo fijo destinado a la

recuperación de la inversión, debe tomarse como un aporte a los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica para fomentar el estudio práctico del pandeo de columnas de acero bajo la Norma ASTM E9-89a.

## **6.9 PREVISIÓN DE LA EVALUACIÓN**

Ya contemplados los equipo y materiales requeridos en el presente estudio y realizadas las pruebas requeridas, según el criterio del autor y en concordancia con lo dispuesto en la Norma ASTM E9-89a, y por cuanto el objetivo principal es exponer a detalle la metodología del ensayo de pandeo por extensimetría se prevea dictar criterios sobre las mejoras que se le pueden realizar al estudio, desarrollo de software y hardware, registro y presentación de resultados de cada ensayo y finalmente exponer los procedimientos mediante una guía práctica para ensayos de pandeo.

### **➤ Mejoras de la propuesta**

Entre los trabajos que se pueden realizar tomando como base el desarrollo actual de este estudio son:

- Realizar un modelado matemático de la respuesta obtenida en los sensores, para inferir con mayor exactitud en las cargas desconocidas. Además, se puede realizar un estudio estadístico de los resultados para poder predecir con mayor fiabilidad las cargas medidas.
- Implementar la parte electrónica para el acondicionamiento de señales de galgas extensiométricas. Este hardware acondicionador de galgas se propone que tenga una ganancia mayor de 1000 y ajuste a cero por hardware. En la parte mecánica se utilizará los sensores ya fabricados y se podrán realizar comparaciones con los resultados obtenidos en este trabajo de tesis.
- Estudiar cómo funcionan las básculas comerciales, para trabajar en un sistema que utilice los sensores fabricados y el hardware implementado para el acondicionamiento de galgas y se pueda generar con esto un producto final.

- En el área de diseño se propone la manufactura de estructuras metálicas para el estudio de tensión y compresión. Estas estructuras no deben presentar fricción para el caso de compresión y para el caso de tensión no deben provocar momentos en las estructuras.
- Se propone estudiar el comportamiento de las estructuras tipo viga. Para este estudio puede utilizarse el banco de pruebas integrado al software desarrollado en este trabajo de tesis.

## BIBLIOGRAFÍA

1. CEKIT S.A. (2004). Curso de Electrónica Básica. Distribuidora Continental. Uruguay.
2. GENEVRO G, HEINEMAN S. (1994). Manual de Máquinas Herramientas, Tomo I. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. México.
3. HANROCK BERNARD J. (1999). Elementos de Máquinas. Editorial Mc. Graw Hill. México.
4. JAMES W. NILSON. (2005). Circuitos Eléctricos. Pearson Education. México.
5. LUIS HERRERA, ARMANDO MEDINA, GALO NARANJO. (2004). Tutoría de la Investigación Científica. ISBN. Ecuador.
6. MIGUEL A. PÉREZ. (2004). Instrumentación Electrónica. Thomson. España.
7. PAJÓN JAVIER. (1997). Teoría de Estructuras, Cálculo Estructural. Pearson Education. México.
8. REYES C. (2006). Microcontroladores PIC, Programación en Basic. Rispergraf. Ecuador.
9. ROBERT L. MOTT. (2006). Diseño de Elementos de Máquinas, Cuarta Edición. Pearson Education. México.
10. SHIGLEY J, MICHELL L. (1989). Manual de Diseño Mecánico, Tercera Edición, Tomo II. Editorial Mc. Graw Hill. México.
11. SHIGLEY J. (1989). Diseño en Ingeniería Mecánica, Tercera Edición, Tomo II. Editorial Mc. Graw Hill. México.

## LINKOGRAFÍA

1. [es.wikipedia.org/wiki/CAD](http://es.wikipedia.org/wiki/CAD)
2. <http://cdigital.dgb.uanl.mx/te/1020074698.pdf>
3. <http://es.rs-online.com/web/>
4. [http://labrm.mecaest.etsii.upm.es/alumnos/Galga\\_extensometrica.pdf](http://labrm.mecaest.etsii.upm.es/alumnos/Galga_extensometrica.pdf)
5. <http://materias.fi.uba.ar/6413/6416/07-AET-Clase%2007-2011.pdf>

6. <http://ocw.usal.es/enseñanzas-tecnicas/resistencia-de-materiales-ingeniero-tecnico-en-obras-publicas/contenidos/Tema10-Pandeo.pdf>
7. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Pandeo-De-Columnas/900672.html>
8. <http://www.fceia.unr.edu.ar/secyt/monografias/mono7/tornounif.pdf>
9. <http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/compmecmat/material/pandeo.pdf>
10. [http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/proceso/apuntes/Strain\\_Gages\\_1.pdf](http://www.ing.unlp.edu.ar/electrotecnia/proceso/apuntes/Strain_Gages_1.pdf)
11. <http://www.madrimasd.org/revista/revista18/tribuna/tribuna1.asp>
12. <http://www.slideshare.net/wlopezalmazarza/acero-estructural-pandeo>
13. <http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201018.pdf>
14. <http://www.youtube.com/watch?v=Yfu99LjP1R4>
15. [www.conozcasuhardware.com/diccio/](http://www.conozcasuhardware.com/diccio/)
16. [www.crtlcmascrtlv.blogspot.com](http://www.crtlcmascrtlv.blogspot.com)
17. [www.fdc.org.co/glosario/glosario2.html](http://www.fdc.org.co/glosario/glosario2.html)
18. [www.imac.unavarra.es/web\\_imac/pages/docencia/asignaturas/DyCDM/-DyCDM\\_Cap7.pdf](http://www.imac.unavarra.es/web_imac/pages/docencia/asignaturas/DyCDM/-DyCDM_Cap7.pdf)

## **ANEXOS SECCIÓN A**

**A1. PROPIEDADES DE SECCIONES**

**A2. PROPIEDADES DEL ACERO ASISI-SAE 1018**

**A3. DATA PACK E-RS DATA SHEET 232-5957**

**A4. CATÁLOGO PARA SELECCIÓN DE GALGAS**

**A5. CARACTERÍSTICAS DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS**

**A6. AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTACIÓN AD 620**

**A6.1 AMPLIFICADOR OPERACIONAL LM 741**

**A7. CARACTERÍSTICAS DEL PIC 16F876A**

**A8. COMUNICACIÓN PIC 16F876A, MAC 232, PC**

**A9. MECÁNICA DE TORNILLOS DE FUERZA O POTENCIA**

## ANEXO A1. PROPIEDADES DE SECCIONES

### Parte 1 Propiedades de las secciones

$A$  = área

$G$  = ubicación del centroide

$I_x = \int x^2 dA$  = segundo momento de área respecto al eje  $x$

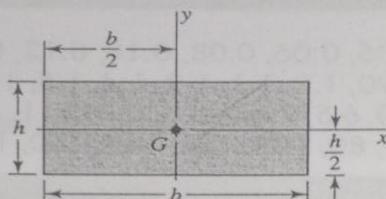
$I_{xy} = \int xy dA$  = momento mixto de área respecto a los ejes  $x$  y  $y$

$J_G = \int r^2 dA = \int (x^2 + y^2) dA = I_x + I_y$

= segundo momento polar de área respecto al eje que pase por  $G$

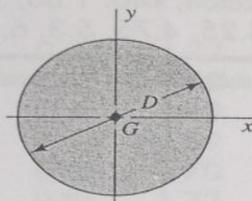
$k_x^2 = I_x/A$  = radio de giro al cuadrado respecto al eje  $x$

Rectángulo



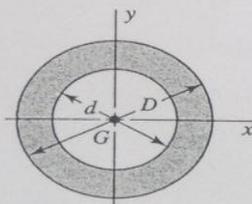
$$A = bh \quad I_x = \frac{bh^3}{12} \quad I_y = \frac{b^3h}{12} \quad I_{xy} = 0$$

Círculo



$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad I_x = I_y = \frac{\pi D^4}{64} \quad I_{xy} = 0$$

Corona circular



$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad I_x = I_y = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4) \quad I_{xy} = 0$$

## ANEXO A2. PROPIEDADES DEL ACERO AISI-SAE 1018

### ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180)

**1. Descripción:** este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

**2. Normas involucradas:** ASTM A 108

**3. Propiedades mecánicas:** Dureza 126 HB (71 HRb)  
Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)  
Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)  
Elongación máxima 15% (en 50 mm)  
Reducción de área 40%  
Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)  
Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.87 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

**5. Propiedades químicas:** 0.15 – 0.20 % C  
0.60 – 0.90 % Mn  
0.04 % P máx  
0.05 % S máx

**6. Usos:** se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina.

<http://www.sumiteccr.com/Aplicaciones/Articulos/pdfs/AISI%201018.pdf>

**ANEXO A3. DATA PACK E-RS DATA SHEET 232-5957**

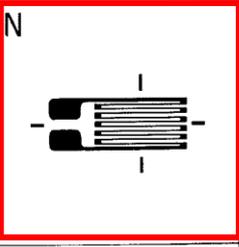
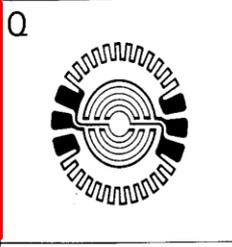
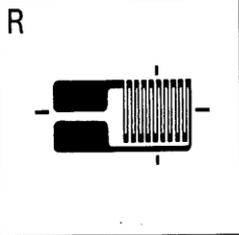
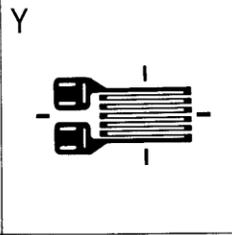
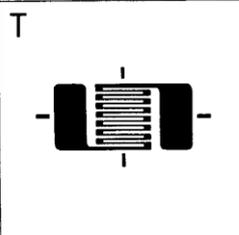
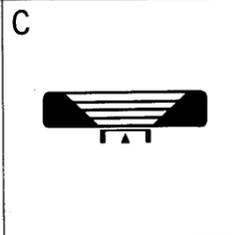
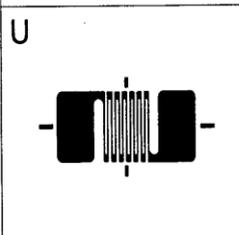
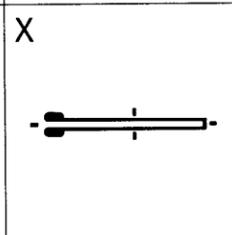
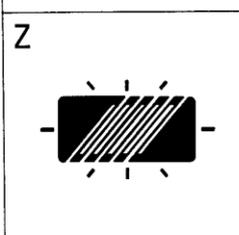
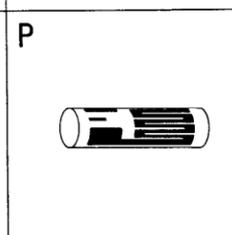
## ANEXO A4. CATÁLOGO PARA SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS RS 0900766b80077de6

RS 632-124 N11-MA2-120-11 2mm  
 RS 632-145 N11-MA2-120-23 2mm  
 RS 632-168 N11-MA5-120-11 5mm  
 RS 632-180 N11-MA5-120-23 5mm

RS 308-102 N11-FA8-120-11 8mm  
 RS 308-118 N11-FA8-120-23 8mm

## FOIL STRAIN GAUGES AND ACCESSORIES (TERMINALS/CEMENT)

### CODES FOR BASIC PATTERNS

<b>N</b> 	<b>Q</b> 
<b>R</b> 	<b>Y</b> 
<b>T</b> 	<b>C</b> 
<b>U</b> 	<b>X</b> 
<b>Z</b> 	<b>P</b> 

### CODES

#### FOR BASIC PATTERN COMBINATIONS

11 —	21 L	31 /		51 
	22 +	32 *		
	23 			
	24 T	34 △	44 ◎	
		35 Y		

#### Y: Yielding type.

For measurement of large strains ranging to plastic sphere. Designed not to cause stress concentration at the point where leads are soldered.

#### C: For crack analysis.

Gauge grids are arranged in parallel. Gauge resistance increases in the form of stairs when a crack takes place somewhere within the grids.

#### X: For crack propagation detection.

With the lengthy grid of this gauge, cracks propagating extensively can be sensed.

#### P: For application to internal surface of pipes or threaded holes where gauges are difficult to install.

The test object is perforated for installation of this gauge inside. Note however that application is considerably critical as the gauge is likely to be damaged when installed or its performance is affected by air bubbles introduced during installation.

#### \*W: Waterproof Moulded Type Strain Gauge

Vinyl cable (2 parallel wires of 1 mm. in external dia., resp.) is being connected with strain gauge and the gauge is moulded with special Epoxy resins. No special protection for waterproofing is necessary after its having been installed on the test object. This feature can be applied to all versions in Nxx-FA Series, except N34, N35 and N51.

**FEATURES :**

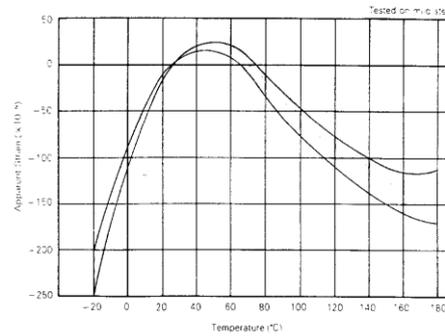
- \* Almost no effect on test object.
- \* Distant and multi-points measurements are possible.
- \* Applicable to both static and dynamic strains.
- \* Both surfaces being completely laminated, the gauge grids are entirely protected.
- \* The gauges, being fitted with leads, are easy to handle.

**STANDARD SPECIFICATIONS :**

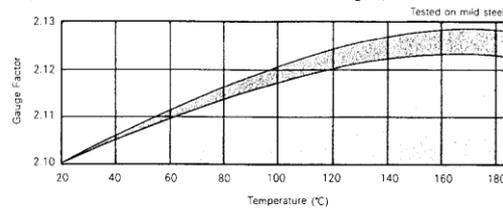
Gauge Length	0.3 mm. min. to 60 mm. max.
Measurable Strain	2 to 4% maximum. Up to 10% with foil yielding strain gauges.
Temperature Range	FA (Polyester Backing) -30°C to +80°C MA (Polyimide Backing) -30°C to +180°C
Thermal Output (See Fig. 1)	FA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At room temperature up to +80°C) MA: Within $\pm 2\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At room temperature up to +160°C) Within $\pm 5\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ (At +160°C up to +180°C)
Gauge Factor Change with Temperature (See Fig. 2)	Within $\pm 0.015\%/^\circ\text{C}$
Gauge Resistance Tolerance	Within $\pm 0.5\%$ of the nominal resistance.
Gauge Factor	2.00 (Nominal)
Gauge Factor Tolerance	Within $\pm 1\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 5 mm. to 60 mm. Within $\pm 2\%$ of the value indicated on individual gauge packet for gauge lengths of 0.3 mm. to 3 mm.
Fatigue Life	More than $10^5$ reversals at $1000 \times 10^{-6}$ strain.

**GENERAL PERFORMANCES OF TYPE N11-MA-5-120-11 STRAIN GAUGE**

Thermal Output Characteristics (Fig.1)

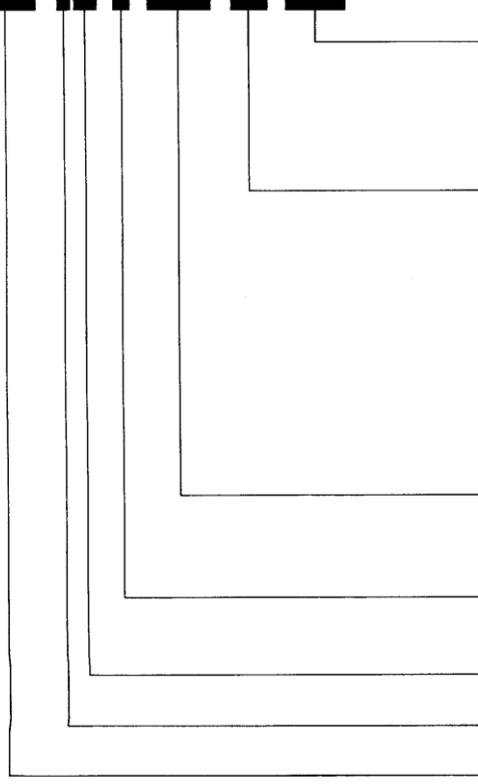


Gauge Factor variation with temperature (Fig. 2)



**CONFIGURATIONS :**

**N11-FA-5-350-16-L03**



- Optional Specifications  
03 Length of Leads  
L Resin Clad Copper Wire (Up to 0.3m)  
W Waterproof Moulded Type\* (See page 1)  
P Optional Pattern Type  
(Subject to special quotations)
- Linear Expansion Factor of Material against which Strain Gauge is self-temperature compensated and its base colour classification

Base Colour	Materials against which strain gauge is self-temperature compensated	Linear expansion factor of materials	Codes
Red	Mild steel	$10.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	11
Orange	Stainless steel	$16.2 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	16
Blue	Aluminium alloy	$23.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$	23

Remarks : Base colour classifications are made in FA Series only. Code of "11" for mild steel can be deleted.

- Gauge Resistance  
Expressing strain gauge nominal resistance in the unit of  $\Omega$ . Can be deleted when nominal resistance is  $120\Omega$ .
- Gauge Length  
Expressing grid effective length in figures in the unit of mm.
- Foil Material  
A: Cu-Ni Alloy
- Base Material  
F: Polyester, M: Polyimide
- Basic Pattern and its Combinations



## ANEXO A5. CARACTERÍSTICAS DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

➤ **Galga extensiométrica acero dulce, 8mm rojo.**

Galgas Extensiométricas Laminares con Placas Terminales Autoadhesivas. Galgas extensiométricas de lámina para uso general, con soporte de poliéster. Disponibles con compensación de temperatura para acero (tipo 11) o aluminio (tipo 23). Cada galga lleva incorporados cables de conexión de 30mm. Se suministra con dos placas terminales autoadhesivas, para facilitar su conexión a la galga sin riesgo de dañarla por aplicar excesivo calor o tensión mecánica al conectar los cables de medida al dispositivo. Ancho. 4mm, Longitud. 13mm

Longitud de la galga	8mm
Tensión medible	del 3 al 4% máx
Temperatura de funcionamiento	de -30°C a +80°C
Resistencia de la galga	120Ω ±0,5%
Factor de galga	2,1 ±1% (coef. de temp. <5%/100°C)
Prueba de fatiga	>10 <sup>6</sup> contracciones con tensión de 1.000μ
Material de la lámina	Aleación de cobre -níquel
Material de la base	Poliéster
Factor de expansión lineal	
Tipo 11 de acero dulce	10,8×10 <sup>-5</sup> /°C
Tipo 23 de aluminio	23,4×10 <sup>-5</sup> /°C
Color del soporte	Tipo 11 Rojo
	Tipo 23 Azul

➤ **Galga extensiométrica aluminio, 8mm azul.**

Galgas extensiométricas de lámina para uso general, con soporte de poliéster. Disponibles con compensación de temperatura para acero (tipo 11) o aluminio (tipo 23). Cada galga lleva incorporados cables de conexión de 30mm. Se suministra con dos placas terminales autoadhesivas, para facilitar su conexión a la galga sin riesgo de dañarla por aplicar excesivo calor o tensión mecánica al conectar los cables de medida al dispositivo. Ancho. 4mm, Longitud. 13mm.

Longitud de la galga	8mm	
Tensión medible	del 3 al 4% máx	
Temperatura de funcionamiento	de -30°C a +80°C	
Resistencia de la galga	120Ω ±0,5%	
Factor de galga	2,1 ±1% (coef. de temp. <5%/100°C)	
Prueba de fatiga	>10 <sup>6</sup> contracciones con tensión de 1.000μ	
Material de la lámina	Aleación de cobre -níquel	
Material de la base	Poliéster	
Factor de expansión lineal		
Tipo 11 de acero dulce	10,8×10 <sup>-5</sup> /°C	
Tipo 23 de aluminio	23,4×10 <sup>-5</sup> /°C	
Color del soporte	Tipo 11 Rojo	
	Tipo 23 Azul	
tipo	código RS	
11 acero dulce	308-102	
23 aluminio	308-118	

## ANEXO A7. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PIC 16F876A

### Devices Included in this Data Sheet:

- PIC16F873A
- PIC16F876A
- PIC16F874A
- PIC16F877A

### High-Performance RISC CPU:

- Only 35 single-word instructions to learn
- All single-cycle instructions except for program branches, which are two-cycle
- Operating speed: DC – 20 MHz clock input  
DC – 200 ns instruction cycle
- Up to 8K x 14 words of Flash Program Memory,  
Up to 368 x 8 bytes of Data Memory (RAM),  
Up to 256 x 8 bytes of EEPROM Data Memory
- Pinout compatible to other 28-pin or 40/44-pin  
PIC16CXXX and PIC16FXXX microcontrollers

### Peripheral Features:

- Timer0: 8-bit timer/counter with 8-bit prescaler
- Timer1: 16-bit timer/counter with prescaler,  
can be incremented during Sleep via external  
crystal/clock
- Timer2: 8-bit timer/counter with 8-bit period  
register, prescaler and postscaler
- Two Capture, Compare, PWM modules
  - Capture is 16-bit, max. resolution is 12.5 ns
  - Compare is 16-bit, max. resolution is 200 ns
  - PWM max. resolution is 10-bit
- Synchronous Serial Port (SSP) with SPI™  
(Master mode) and I<sup>2</sup>C™ (Master/Slave)
- Universal Synchronous Asynchronous Receiver  
Transmitter (USART/SCI) with 9-bit address  
detection
- Parallel Slave Port (PSP) – 8 bits wide with  
external  $\overline{RD}$ ,  $\overline{WR}$  and  $\overline{CS}$  controls (40/44-pin only)
- Brown-out detection circuitry for  
Brown-out Reset (BOR)

### Analog Features:

- 10-bit, up to 8-channel Analog-to-Digital  
Converter (A/D)
- Brown-out Reset (BOR)
- Analog Comparator module with:
  - Two analog comparators
  - Programmable on-chip voltage reference  
(VREF) module
  - Programmable input multiplexing from device  
inputs and internal voltage reference
  - Comparator outputs are externally accessible

### Special Microcontroller Features:

- 100,000 erase/write cycle Enhanced Flash  
program memory typical
- 1,000,000 erase/write cycle Data EEPROM  
memory typical
- Data EEPROM Retention > 40 years
- Self-reprogrammable under software control
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)  
via two pins
- Single-supply 5V In-Circuit Serial Programming
- Watchdog Timer (WDT) with its own on-chip RC  
oscillator for reliable operation
- Programmable code protection
- Power saving Sleep mode
- Selectable oscillator options
- In-Circuit Debug (ICD) via two pins

### CMOS Technology:

- Low-power, high-speed Flash/EEPROM  
technology
- Fully static design
- Wide operating voltage range (2.0V to 5.5V)
- Commercial and Industrial temperature ranges
- Low-power consumption

Device	Program Memory		Data SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)	I/O	10-bit A/D (ch)	CCP (PWM)	MSSP		USART	Timers 8/16-bit	Comparators
	Bytes	# Single Word Instructions						SPI	Master I <sup>2</sup> C			
PIC16F873A	7.2K	4096	192	128	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F874A	7.2K	4096	192	128	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F876A	14.3K	8192	368	256	22	5	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2
PIC16F877A	14.3K	8192	368	256	33	8	2	Yes	Yes	Yes	2/1	2



## ANEXO A9. MECÁNICA DE TORNILLOS DE FUERZA O POTENCIA<sup>1</sup>

Los tornillos de fuerza son dispositivos que se utilizan en las maquinarias usadas para convertir un movimiento angular en movimiento lineal y transmitir así generalmente, fuerza o potencia. Casi siempre se emplean para husillos o tornillos de avance de tornos, y para tornillos de bancos, prensas y gatos.

En la figura 8-3 se ilustra una aplicación de tornillos de potencia en una prensa mecánica con motor eléctrico. Al funcionar se aplica un par de torsión  $T$  a

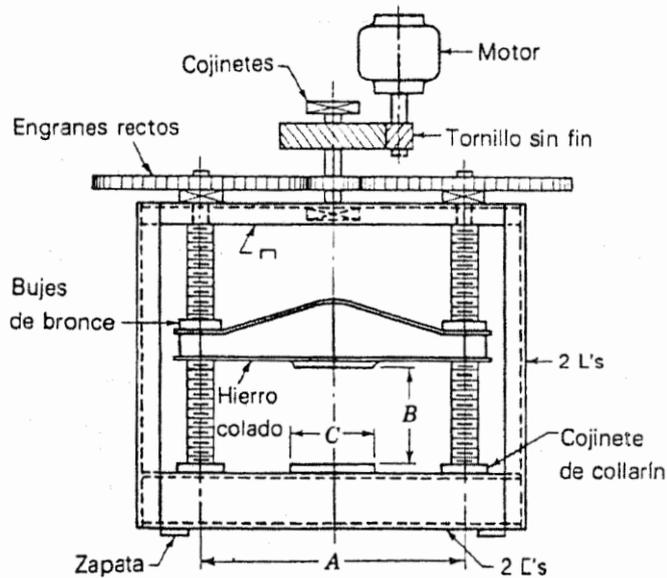


FIGURA 8-3 Pequeña prensa operada por tornillos de potencia.

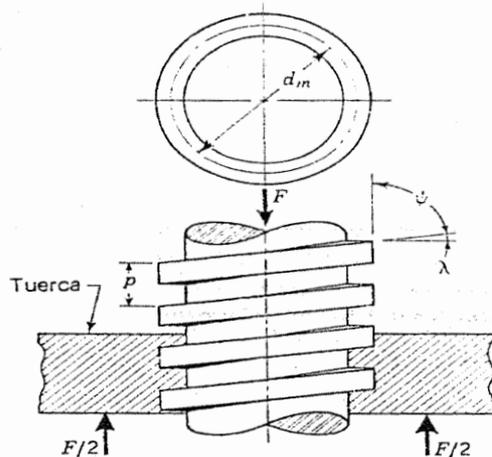


FIGURA 8-4 Tornillo de fuerza o potencia.

<sup>1</sup> Fuente. Diseño en Ingeniería Mecánica. Joshep E. Shigley. Sexta edición.

**Tabla A.** Coeficiente de fricción  $f$  para pares roscados.

Material del tornillo	Material de la tuerca			Fundición de hierro
	Acero	Bronce	Latón	
Acero, seco	0.15-0.25	0.15-0.23	0.15-0.19	0.15-0.25
Acero, aceite	0.11-0.17	0.10-0.16	0.10-0.15	0.11-0.17
para máquina				
Bronce	0.08-0.12	0.04-0.06	—	0.06-0.09

**Fuente.** Diseño en Ingeniería Mecánica. Joshep E. Shigley. Sexta edición.

**Tabla B.** Coeficiente de fricción del collarín.

Combinación	Operando	Arrancando
Acero suave sobre fundición de hierro	0.12	0.17
Acero duro sobre fundición de hierro	0.09	0.15
Acero suave sobre bronce	0.08	0.10
Acero duro sobre bronce	0.06	0.08

**Fuente.** Diseño en Ingeniería Mecánica. Joshep E. Shigley. Sexta edición.

## **SECCIÓN B**

### **PLANOS DE LA MÁQUINA DE COMPRESIÓN UTAPRESS**

**PLANO 01.** Descripción de partes UTAPRESS

**PLANO 02.** Base inferior

**PLANO 03.** Placa de compresión

**PLANO 04.** Tornillo de potencia

**PLANO 05.** Base superior

**PLANO 06.** Bocín inferior

**PLANO 07.** Bocín superior

**PLANO 08.** Eje guía

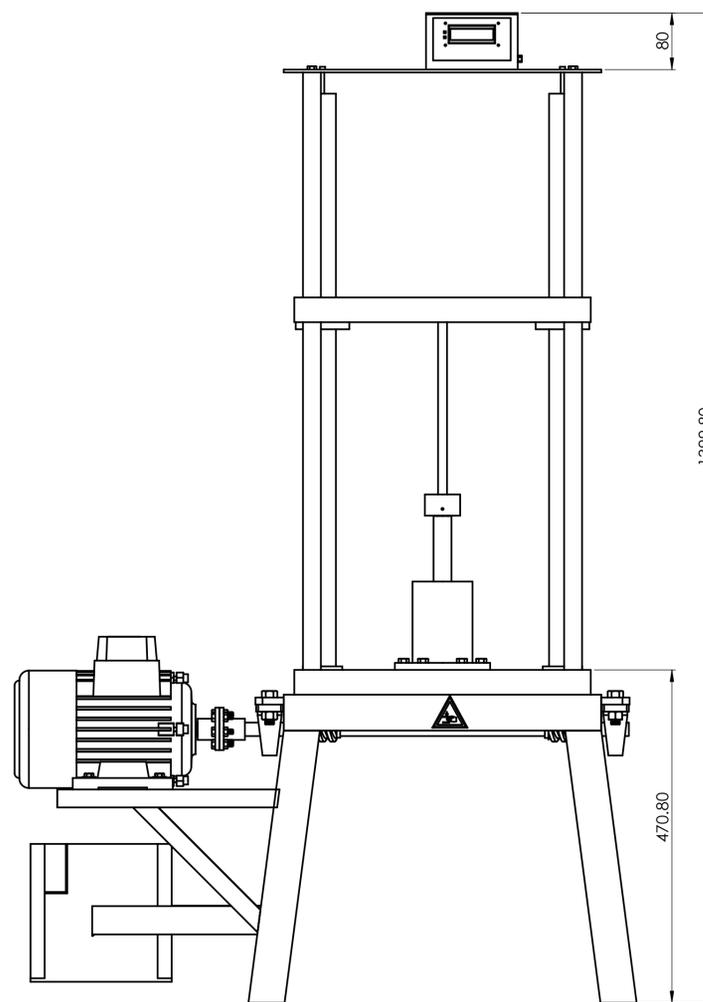
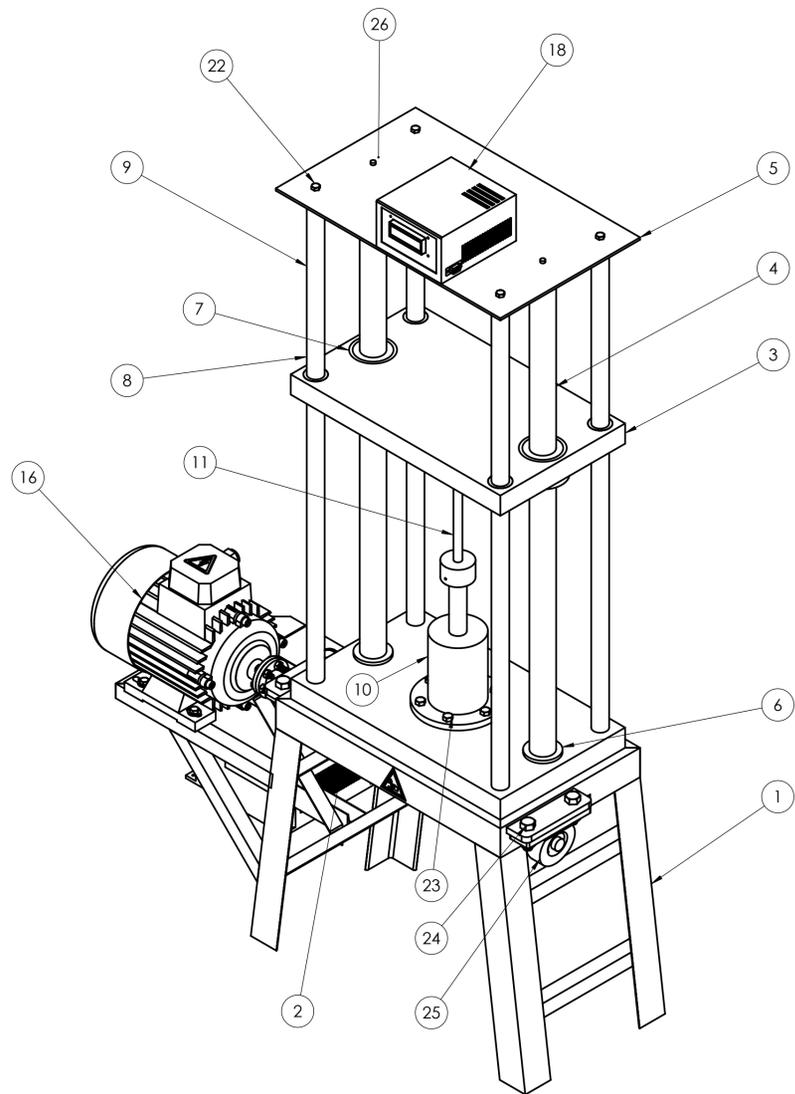
**PLANO 09.** Bocín guía

**PLANO 10.** Base de compresión

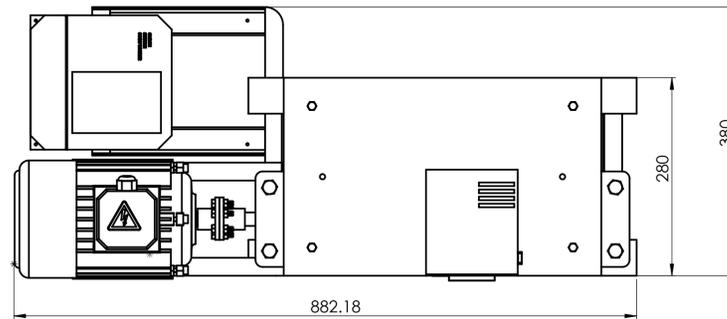
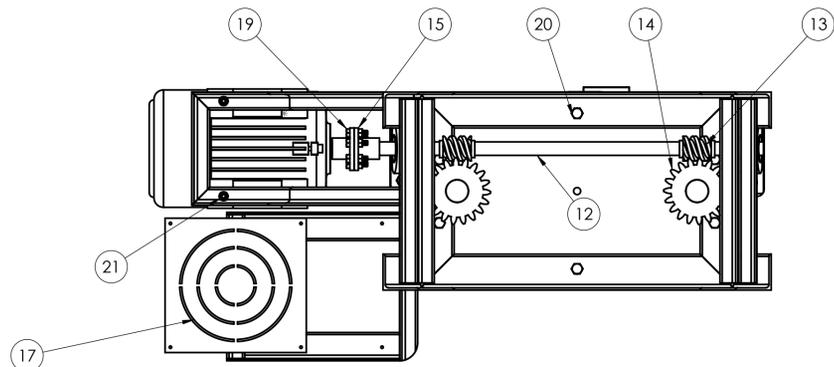
**PLANO 11.** Base UTAPRESS

**PLANO 12.** Probetas

VISTA ISOMÉTRICA

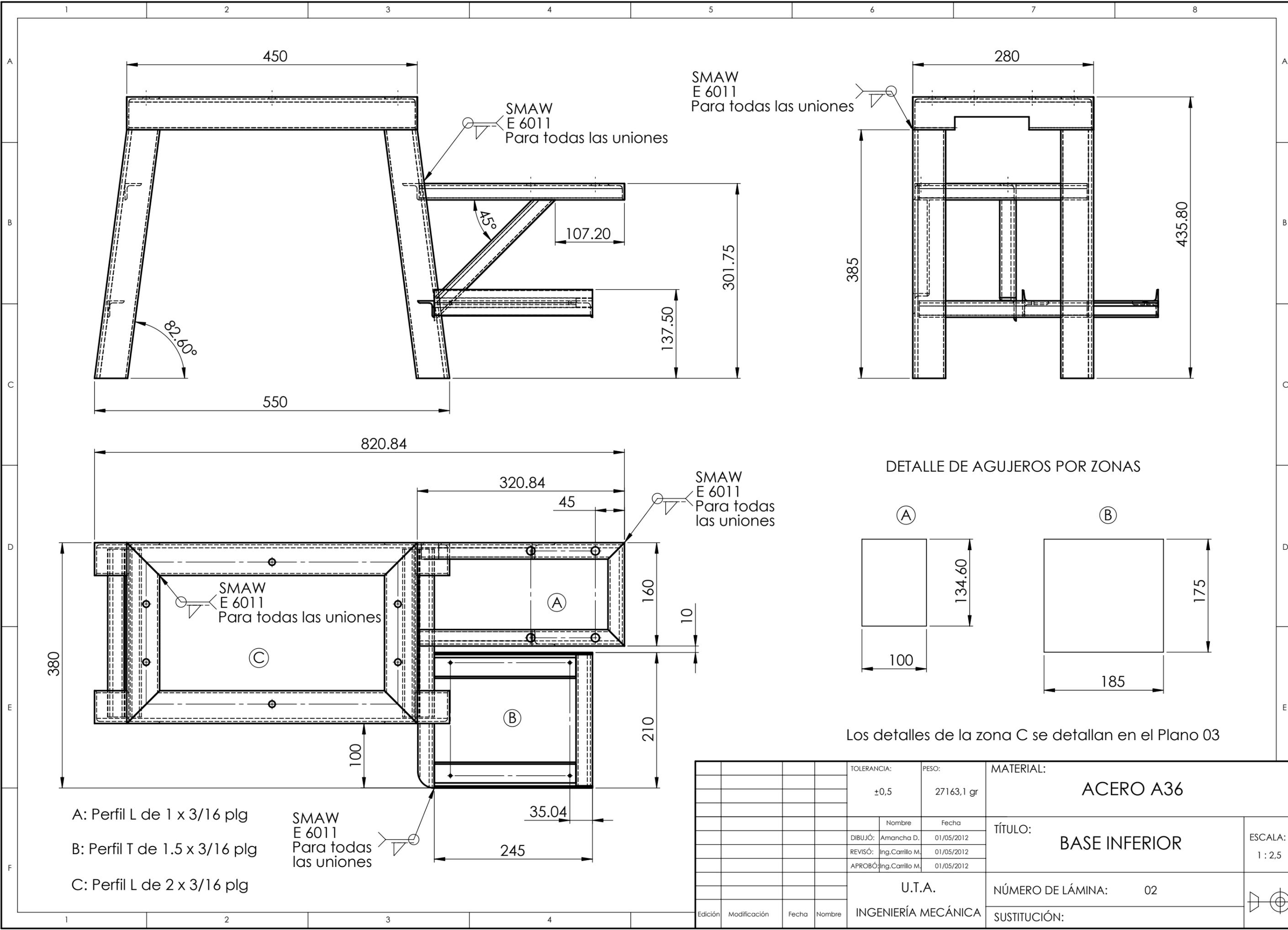


VISTA INFERIOR  
DETALLES

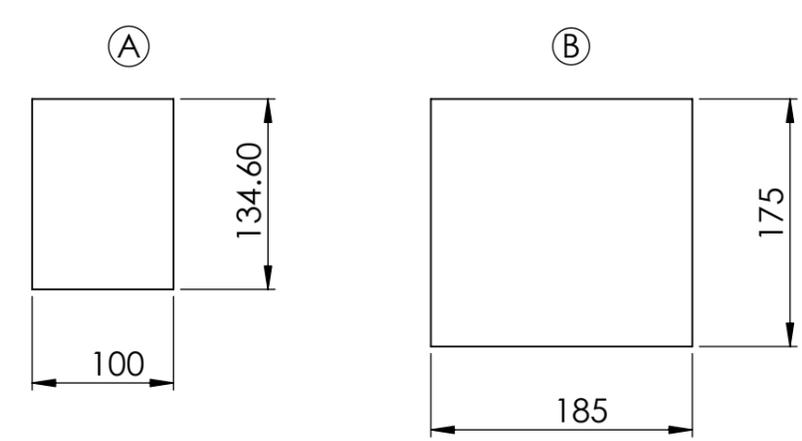


No. de pieza	DENOMINACIÓN	No. DE DIBUJO	MATERIAL	No. DE ORDEN	CANTIDAD	OBSERVACIONES
26	Pin de apoyo		AI SI 1018		2	1/4 x 2
25	Chumacera de piso				2	3/4 NBR P204
24	Perno-Tuerca F		ACERO		4	1/2 - 20x2 UNF
23	Perno E		ACERO		6	5/16 - 24x1 UNF
22	Perno D		ACERO		4	1/4 - 20x0.75 UNF
21	Perno-Tuerca C		ACERO		4	1/4 - 20x1.5 UNF
20	Perno B		ACERO		6	1/4 - 20x1 UNF
19	Perno-Tuerca A		ACERO		6	5/16 - 24x1.5 UNF
18	Módulo Extensiométrico				1	110V
17	Variador de frecuencia				1	2.2HP-330V
16	Motor				1	2HP - 220V
15	Acople del motor	12	AI SI 1018		2	
14	Engrane, N=40, p=0,5		ACERO 1040		2	ADQUIRIDO
13	Sin fin		AI SI 1018		2	ADQUIRIDO
12	Eje de sin fin		AI SI 1018		2	Ø 0.75 x 20 plg
11	Probeta	11	AI SI 1018		1	
10	Gato hidráulico		ACERO 1040		2	ADQUIRIDO
9	Eje guía	10	AI SI 1018		1	TORNEADO
8	Bocín guía	9	Bronce		4	TORNEADO
7	Bocín superior	8	Bronce		2	TORNEADO
6	Bocín inferior	7	Bronce		2	TORNEADO
5	Base superior	6	ACERO A36		1	FRESADO
4	Tornillo de potencia	5	AI SI 1018		2	ROSCADO
3	Placa de compresión	4	ACERO A36		1	FRESADO
2	Base inferior	3	ACERO A36		1	FRESADO
1	Base UTAPRESS	2	ACERO A36			

TOLERANCIA: ± 1		PESO:	MATERIAL: VARIOS	
NOMBRE:		FECHA:		TÍTULO: UTA PRESS
DIBUJO: Amancha D.		01/05/2012		ESCALA: 1:5
REVISÓ: Ing. Corallo M.		01/05/2012		
APROBÓ: Ing. Corallo M.		01/05/2012		
U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA: 01		
INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:		

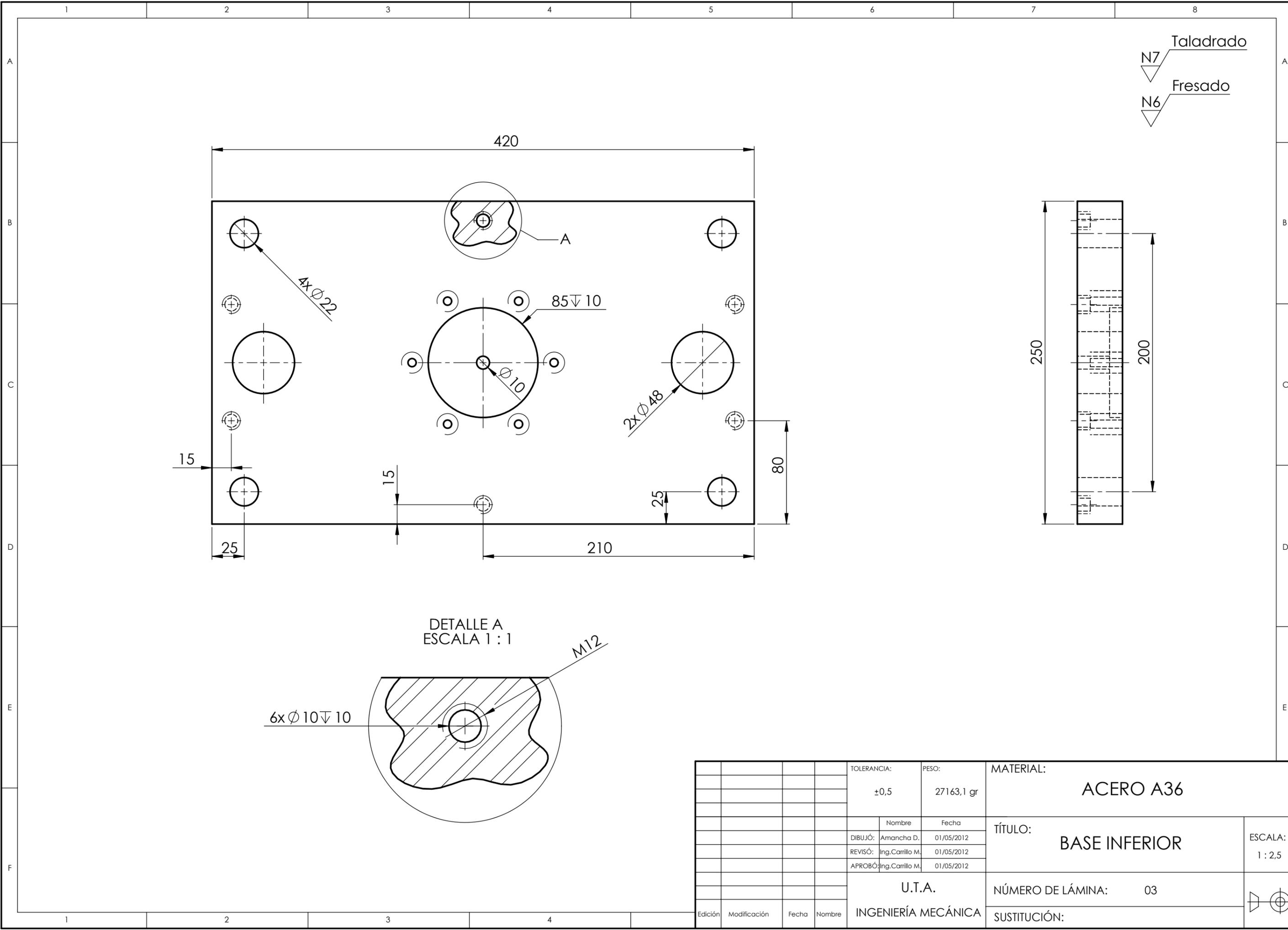


DETALLE DE AGUJEROS POR ZONAS

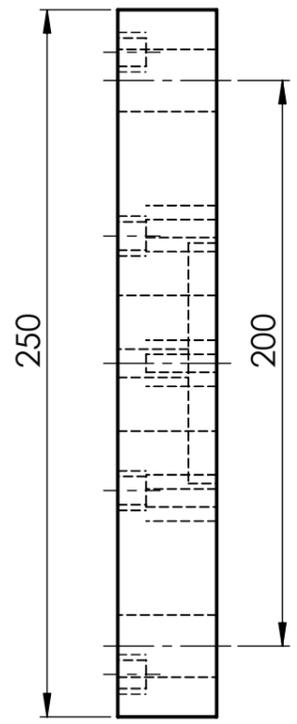
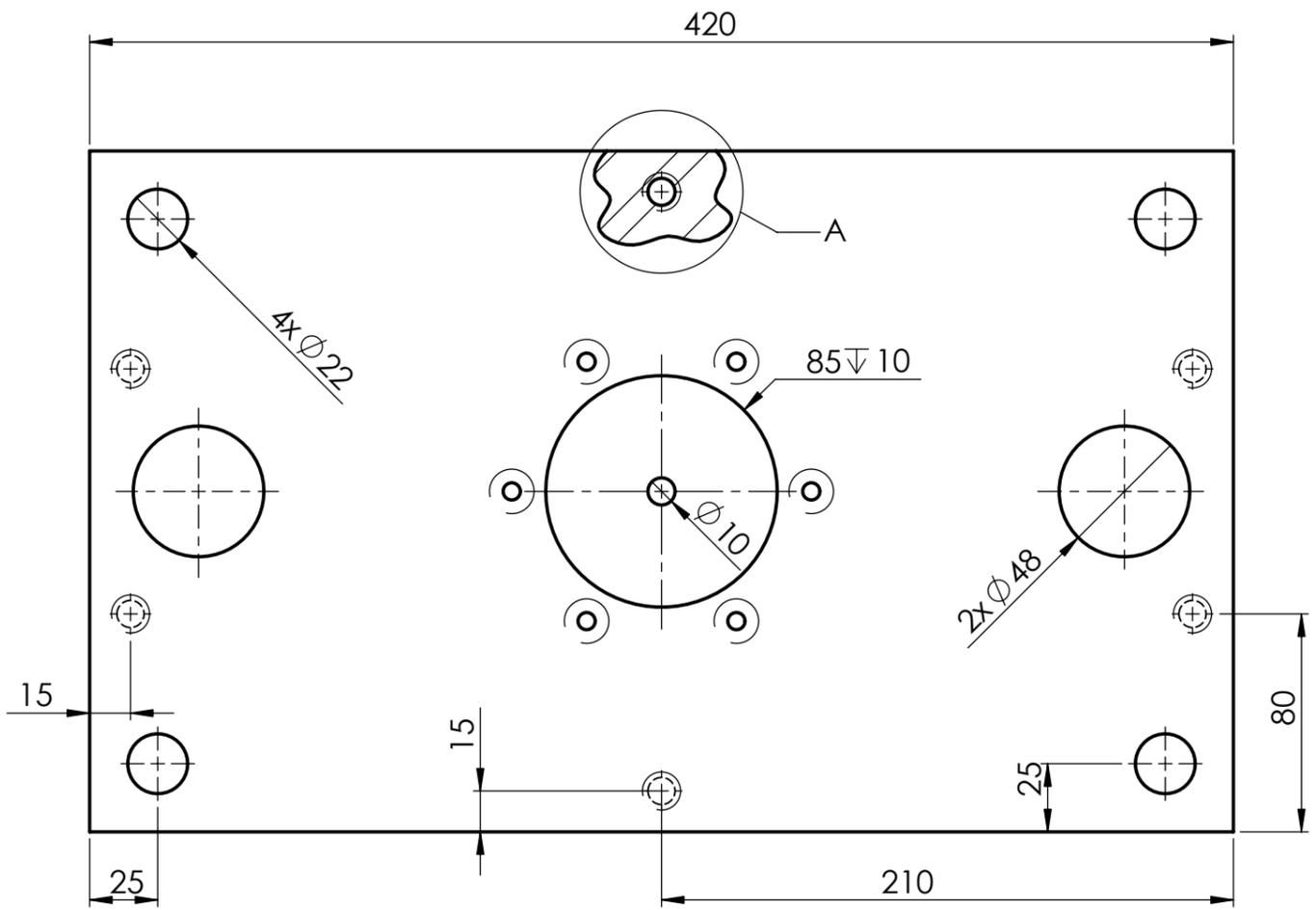


Los detalles de la zona C se detallan en el Plano 03

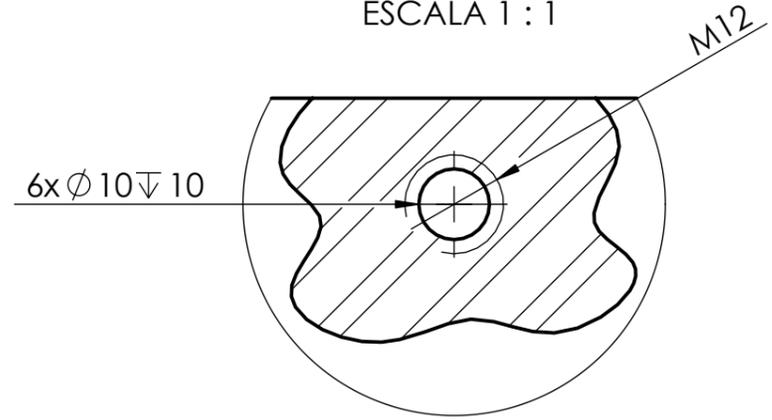
				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±0,5	27163,1 gr	ACERO A36	
				Nombre	Fecha	TÍTULO:	
				DIBUJÓ: Amancha D.	01/05/2012	BASE INFERIOR	
				REVISÓ: Ing.Carrillo M.	01/05/2012	ESCALA:	
				APROBÓ: Ing.Carrillo M.	01/05/2012	1 : 2,5	
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	02
				INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				



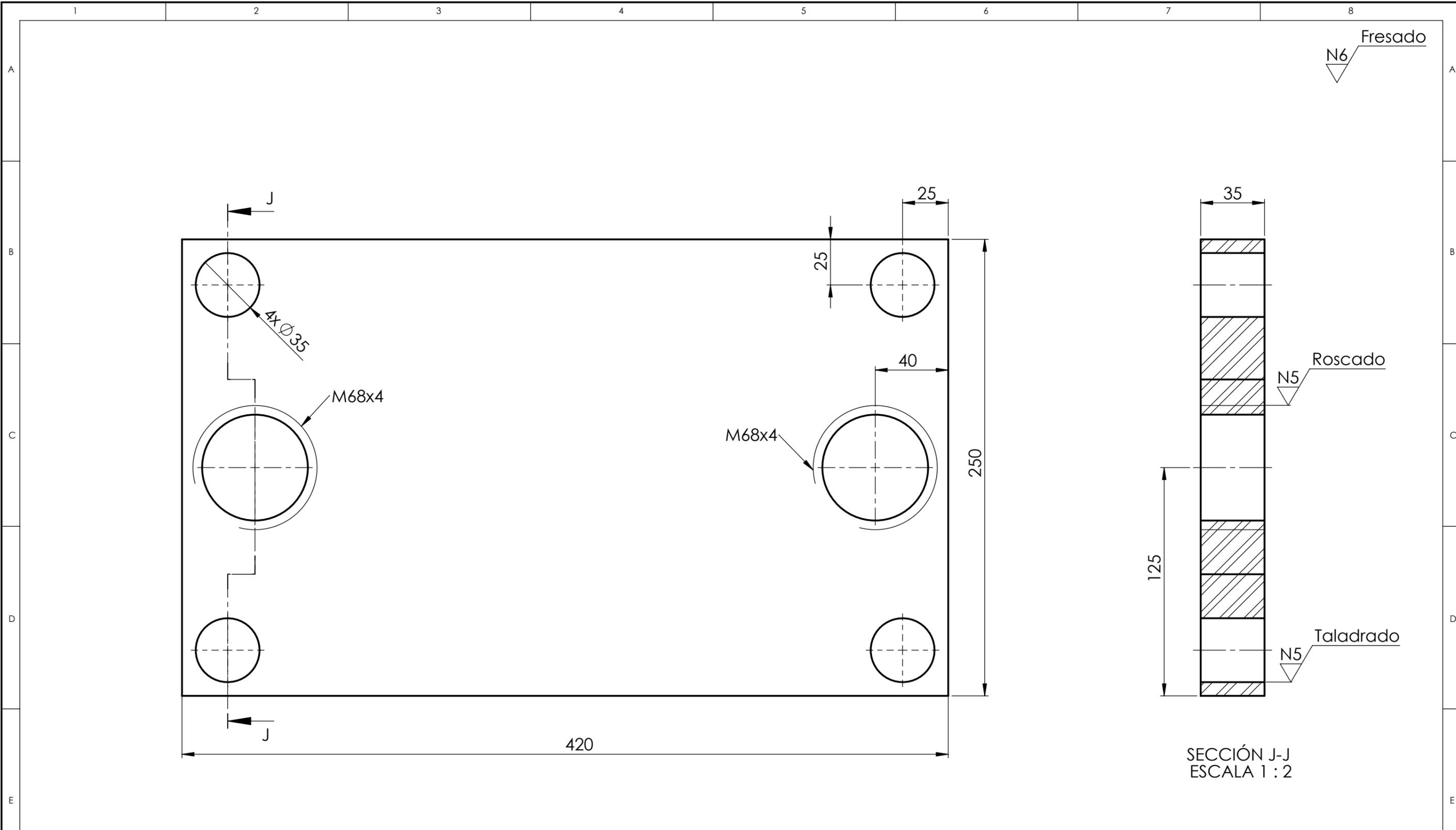
Taladrado  
N7  
Fresado  
N6



DETALLE A  
ESCALA 1 : 1

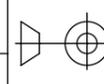


				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±0,5	27163,1 gr	ACERO A36		
					Nombre	Fecha	TÍTULO: BASE INFERIOR	
				DIBUJÓ:	Amancha D.	01/05/2012		
				REVISÓ:	Ing.Carrillo M.	01/05/2012		
				APROBÓ:	Ing.Carrillo M.	01/05/2012	ESCALA: 1 : 2,5	
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	03	
				INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

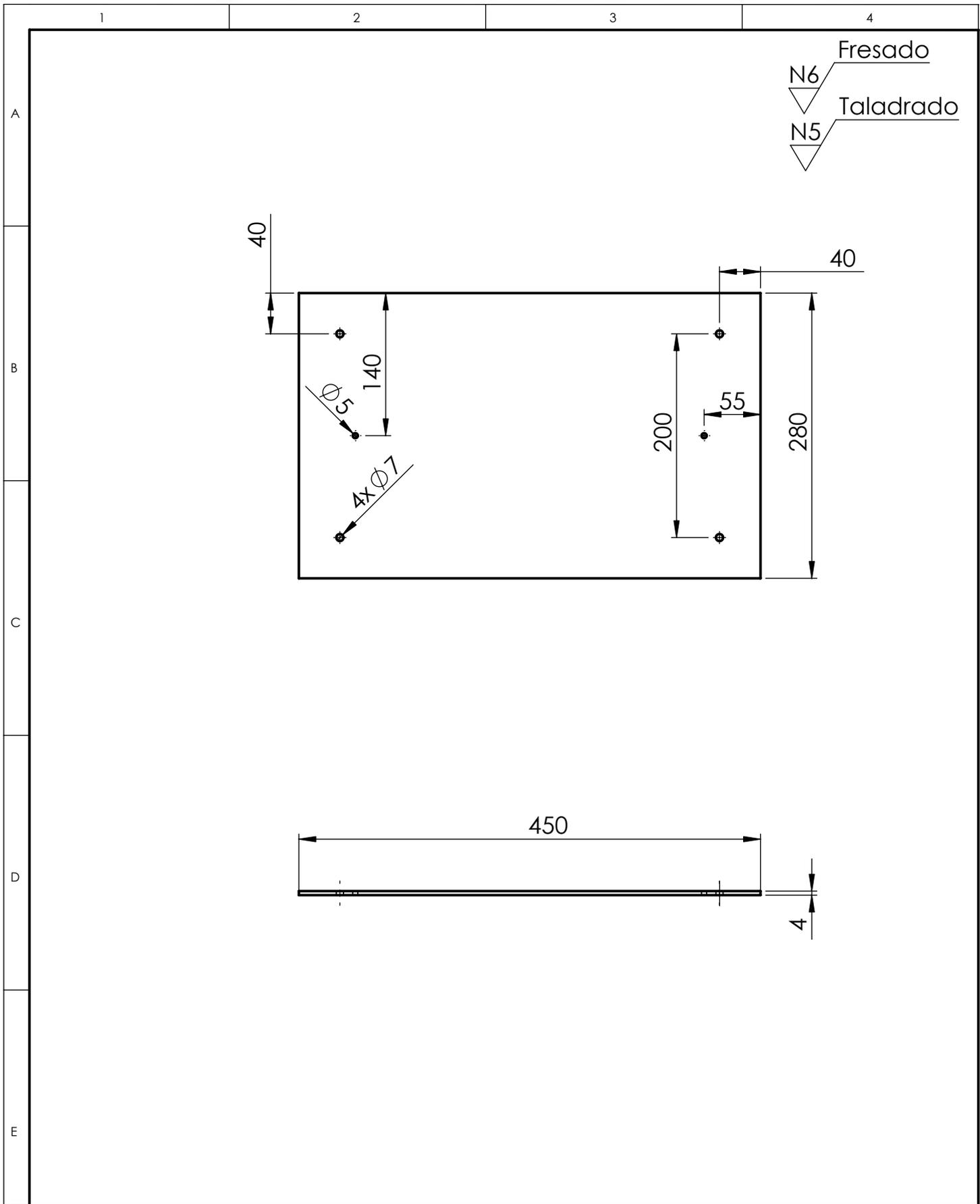


SECCIÓN J-J  
ESCALA 1 : 2

				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:		
				±0,1	28026,5 gr	ACERO A36		
					NOMBRE	FECHA	TÍTULO:	
				DIBUJÓ:	Amancha D.	01/05/2012	PLACA DE COMPRESIÓN	
				REVISÓ:	Ing.Carrillo M.	01/05/2012		
				APROBÓ:	Ing.Carrillo M.	01/05/2012		
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	04	
				INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:		
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					ESCALA: 1:5







				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±0,5	9342,17 gr	ACERO ASTM A36	
						TÍTULO:	ESCALA:
						BASE SUPERIOR	1 : 5
				NOMBRE	FECHA		
				DIBUJÓ: Amancha D.	01/05/2012		
				REVISÓ: Ing. Carrillo	01/05/2012		
				APROBÓ: Ing. Carrillo	01/05/2012		
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	06
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:	



1

2

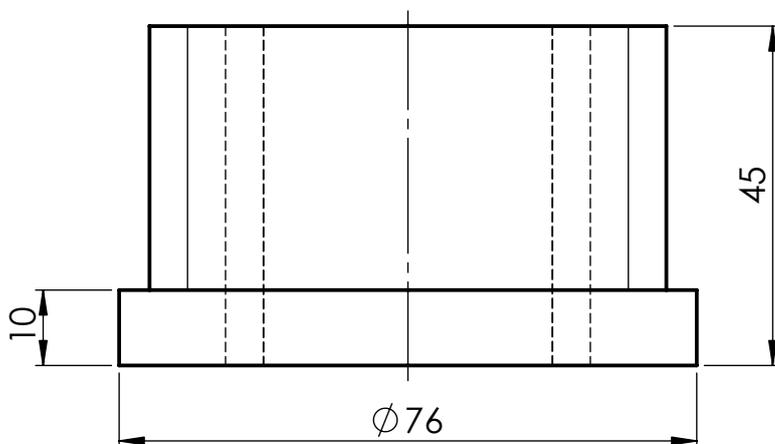
3

4

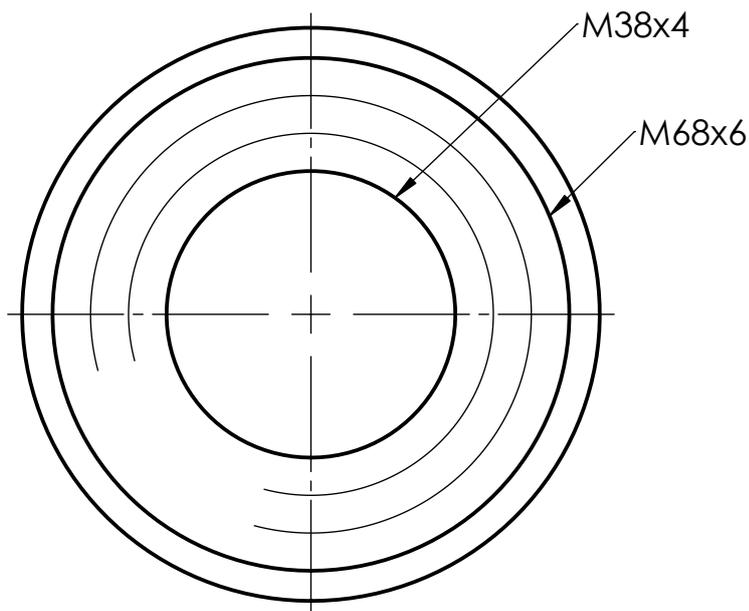
A

N5 TORNEADO

B



C



D

E

				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±0,1	1382,45 gr	BRONCE	
					NOMBRE	FECHA	TÍTULO: BOCÍN SUPERIOR
				DIBUJO:	Amancha D.	01/05/2012	
				REVISÓ:	Ing. Carrillo	01/05/2012	
				APROBÓ:	Ing. Carrillo	01/05/2012	ESCALA: 1:1
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	08
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:	

1

2

3

4

N5 TORNEADO

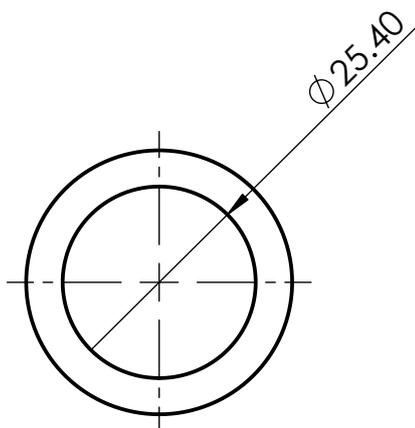
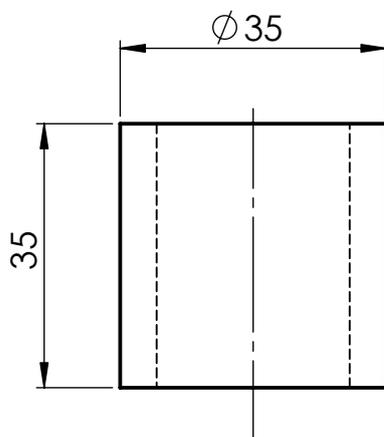
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO:	MATERIAL:	
				±0,1	1382,45 gr	BRONCE	
					NOMBRE	FECHA	TÍTULO: BOCÍN GUÍA
				DIBUJÓ:	Amancha D.	01/05/2012	
				REVISÓ:	Ing. Carrillo	01/05/2012	
				APROBÓ:	Ing. Carrillo	01/05/2012	ESCALA: 1:1
				U.T.A.		NÚMERO DE LÁMINA:	09
Edición	Modificación	Fecha	Nombre	INGENIERÍA MECÁNICA		SUSTITUCIÓN:	



1

2

3

4

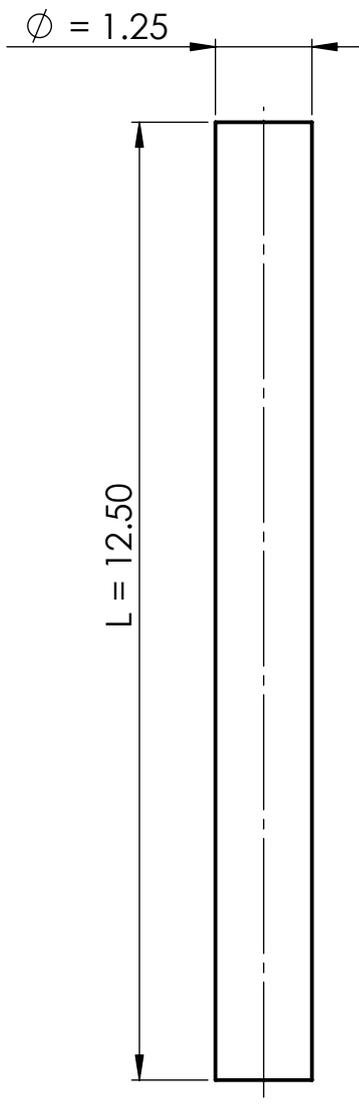
A

B

C

D

E



## DETALLE DE PROBETAS

PROBETA	$\phi$ (plg)	L(plg)
Corta 1	1.12	1.0
Corta 2	0.50	1.0
Media 1	0.50	1.5
Media 2	0.80	2.38
Media 3	1.00	3
Media 4	1.12	3.38
Larga 1	0.80	6.38
Larga 2	1.25	12.5
UTA 11001	0.5	10.0
UTA 11002	0.5	14
UTA 11003	0.5	19
UTA 11004	0.5	26

TOLERANCIA:

PESO:

MATERIAL:

 $\pm 0,2$ 

1981,9 gr

ACERO AISI 1018

NOMBRE

FECHA

TÍTULO:

ESCALA:

DIBUJÓ: Amancha D. 01/05/2012

PROBETAS

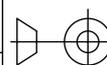
1 : 2.5

REVISÓ: Ing. Carrillo 01/05/2012

APROBÓ: Ing. Carrillo 01/05/2012

U.T.A.

NUMERO DE LAMINA: 11



Edición Modificación Fecha Nombre

INGENIERÍA MECÁNICA

SUSTITUCIÓN:

1

2

3

4

A

B

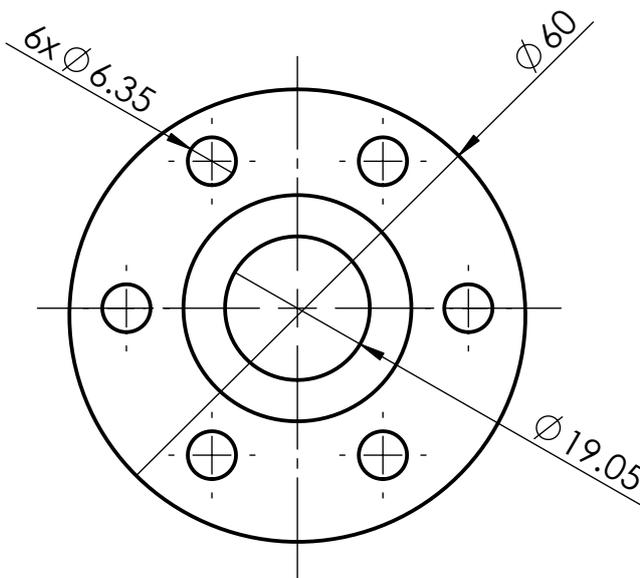
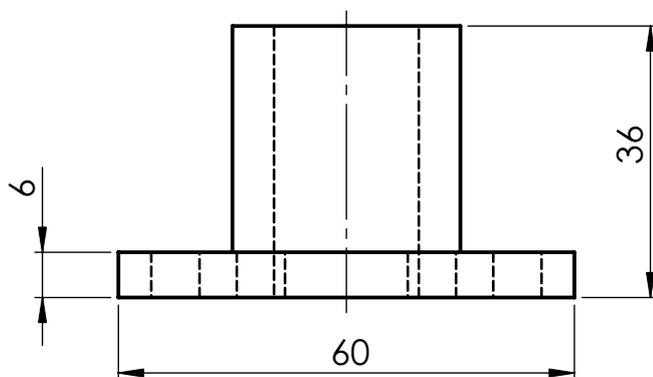
C

D

E

TORNEADO  
N5

TALADRADO  
N5



				TOLERANCIA: $\pm 0,2$	PESO: 1571,6 gr	MATERIAL: <b>ACERO AISI 1018</b>	
						TÍTULO: <b>ACOPLE DEL MOTOR</b>	ESCALA: 1 : 1
				DIBUJÓ: Amancha D.	FECHA 01/05/2012		
				REVISÓ: Ing. Carrillo	01/05/2012		
				APROBÓ: Ing. Carrillo	01/05/2012		
				U.T.A. INGENIERÍA MECÁNICA		NÚMERO DE LÁMINA: 12	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			SUSTITUCIÓN:	

**SECCIÓN C**

**GUÍA PRÁCTICA DE LABORATORIO E9-11UTA**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**GUÍA PRÁCTICA E9-11UTA PARA ENSAYOS DE PANDEO**

**PRÁCTICA N° 001-FICM**

**Supervisado por:**

**Cátedra/ Nivel:**

**Norma:** ASTM E9-89a

**1. TEMA:**

ENSAYO DE PANDEO POR EXTENSIOMETRÍA.

**2. OBJETIVO:**

**2.1. General:**

- Determinar la fuerza de pandeo máxima en probetas cilíndricas mediante sensores extensiométricos.

**2.2. Específico:**

- Aprender a realizar el procedimiento de análisis extensiométrico en el pandeo de probetas cilíndricas.
- Interpretar y ejecutar prácticas de laboratorio bajo normas.
- Demostrar la relación entre datos científicos con datos empíricos.
- Interpretar las lecturas de una galga extensiométrica.
- Observar y registrar los datos del ensayo de pandeo por extensimetría.

- Familiarizar al usuario el uso de la electrónica en aplicaciones mecánicas.

### **3. MATERIALES Y EQUIPOS:**

#### **3.1. Materiales:**

- Probeta de acero AISI SAE 1018.
- Lija fina. 600.
- Paño de seda o pedazo de tela, libre de pelusa.
- Marcador permanente.
- Cintas adhesivas, color oscuro y transparente.
- Calibrador y flexómetro.
- Desarmadores varios.
- Estilete.
- Desengrasante para limpieza de las probetas, INPRESOL.
- Adhesivo para galgas, CYANOACRYLATE.
- Galga extensiométrica de acero dulce, RS N11-FA-8-120-11
- Cable UTP.
- Cable USB-DB9 TRENDnet.
- Cable paralelo fino.

#### **3.2. Equipos:**

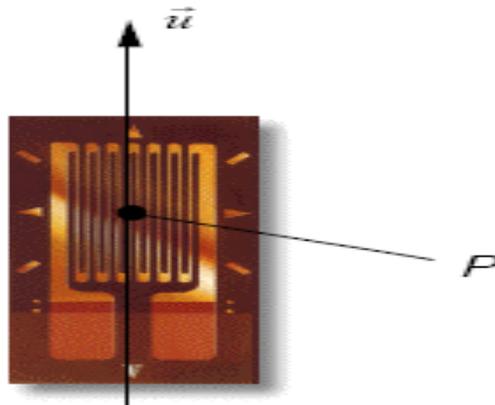
- Módulo de adquisición de datos GE-011UTA.
- Computador.
- Máquina de ensayos UTAPRESS

### **4. FUNDAMENTO TEÓRICO:**

La galga extensiométrica es básicamente una resistencia eléctrica. El parámetro variable y sujeto a medida es la resistencia de dicha galga. Esta variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga.

Una galga extensiométrica consiste en una fina película metálica en forma de hilo plegado depositada sobre una lámina de plástico aislante de algunas micras de espesor.

Se parte de la hipótesis inicial de que el sensor experimenta las mismas deformaciones que la superficie sobre la cual está pegada. El sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino, de forma que la mayor parte de su longitud está distribuido paralelamente a una dirección determinada



En las galgas de hilo la resistencia está formada por un hilo dispuesto en forma de zigzag sobre un soporte elástico, con una longitud preferente ( $L$ ) a lo largo de la cual se encuentra la mayor cantidad de hilo. Al deformarse la galga en la dirección preferente, se produce un alargamiento del hilo y una disminución de su sección y, por tanto, una variación en su resistencia. Para poder medir variaciones de resistencia significativas, la galga debe tener una resistencia alta 100 y 1000  $\Omega$ , y funcionar con un consumo muy bajo, para evitar que el efecto Joule provoque variaciones importantes de la resistencia por calentamiento

Se basa en que la resistencia eléctrica de un cuerpo depende de la geometría del mismo. En el caso de un conductor de longitud “L” y sección uniforme “A”, la resistencia eléctrica “R” viene dada por:

$$R = \rho \cdot L/A$$

### **$\rho$ : Resistividad Eléctrica**

Los materiales que suelen utilizarse para fabricar galgas son aleaciones de cobre y níquel, platino y silicio.

Las galgas extensiométricas están disponibles comercialmente con valores nominales de resistencia desde 30 hasta 3000  $\Omega$ , siendo 120, 350 y 1000  $\Omega$  los valores más frecuentes

El parámetro que define la sensibilidad de una galga se conoce como factor de galga GF, y es definido como el cociente entre el cambio fraccional de la resistencia eléctrica y la tensión  $\varepsilon$ . En la figura se aprecia el cálculo del factor de galga. El factor de galga al igual que la tensión  $\varepsilon$  es adimensional.

### **FACTOR DE GALGA (GF):**

$$GF = (\Delta R/R_0)/(\Delta L/L_0)$$

Donde “ $\Delta L/L_0$ ” es la deformación unitaria “ $\varepsilon$ ”.

$$GF = (\Delta R/R_0)/\varepsilon$$

### **Valores comunes de GF:**

Conductores: 1,5 a 2.

Semiconductores: 50 a 200 (Valor más común 125)

### **Ventajas y Desventajas**

Su principal ventaja es su linealidad; también presentan una baja impedancia de salida. Su principal desventaja es su dependencia de la temperatura, lo que provoca que, a veces, haya que diseñar circuitos electrónicos para compensar esa dependencia.

**Usos:** Suelen aplicarse a la medida de fuerzas, de pares de energía mecánica, deformaciones y tensiones. Esto se logra adhiriendo la galga al material o estructura a estudiar y aplicando cargas que producen una deformación. Conocido el módulo de elasticidad del material de la estructura, mediante un ensayo de tracción, es posible determinar, a partir de la deformación medida por la galga, las tensiones que se producen.

### **Existen dos tipos de galgas básicos:**

**De hilo conductor o lámina conductora.** El sensor está constituido básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino. Las terminaciones del hilo acaban en dos terminales a los cuales se conecta el transductor.

**Semiconductor.** Las galgas semiconductoras son similares a las anteriores. En este tipo de galgas se sustituye el hilo metálico por un material semiconductor. La principal diferencia constructiva de estas galgas respecto a las anteriores se encuentra en el tamaño; las galgas semiconductoras tienen un tamaño más reducido.

**Entre otras se tiene:** De hilo metálico, laminas metálicas, de metal depositado, Semiconductores.

### **Características de los materiales para galgas:**

- Factor de galga elevado.
- Bajo coeficiente de temperatura.
- Alta resistividad.
- Elevada resistencia mecánica.
- Mínimo potencial termoeléctrico.

### **Materiales comúnmente utilizados:**

- Constantan (Níquel-Cobre).
- Chromel (Níquel-Cromo).
- Aleaciones (Hierro-Cromo-Aluminio).
- Semiconductores (Silicio).

### **Desventajas de los semiconductores:**

- Muy sensibles a la temperatura.
- Muy frágiles, permiten poca deformación.

### **CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR.**

Las principales características de las galgas son las siguientes:

#### **Dimensiones de la galga (2,5 x 6 mm)**

Anchura y Longitud: Dichos parámetros proporcionan las características constructivas de la galga. Permite escoger el tamaño del sensor que más se adecúe a nuestras necesidades.

#### **Peso de la galga (1 g).**

Esta característica nos define el peso de la galga. Este suele ser del orden de gramos. En aplicaciones de mucha precisión el peso puede influir en la medida de la deformación.

**Tensión medible (del 2 al 4% máx.).**

Es el rango de variación de longitud de la galga, cuando ésta se somete a una deformación. Este rango viene expresado en un tanto por cien respecto a la longitud de la galga.

**Temperatura de funcionamiento (de - 30°C a +180°C).**

Es aquella temperatura para la cual el funcionamiento de la galga se encuentra dentro de los parámetros proporcionados por el fabricante.

**Resistencia de la galga ( $120 \pm 0,5\%$ ).**

Es la resistencia de la galga cuando ésta no está sometida a ninguna deformación. Es la resistencia de referencia y suele acompañarse de un porcentaje de variación.

**Factor de galga (2,00 nominal).**

Factor de galga o factor de sensibilidad de la galga es una constante K característica de cada galga. Determina la sensibilidad de ésta. Este factor es función de muchos parámetros, pero especialmente de la aleación empleada en la fabricación.

**Coefficiente de temperatura del factor de galga ( $\pm 0,015\%/^{\circ}\text{C}$ ).**

La temperatura influye notablemente en las características. A su vez, cualquier variación en estas características influye en el factor de galga. Este coeficiente se

mide en  $\%/^{\circ}\text{C}$ , que es la variación porcentual del valor nominal del factor de galga respecto al incremento de temperatura.

#### **Material de la lámina (aleación de cobre níquel).**

Esta característica nos define el material del que está hecho el hilo conductor o el material semiconductor.

#### **Material de la base (polimida).**

Esta característica nos define el material del que está constituida la base no conductora de la galga.

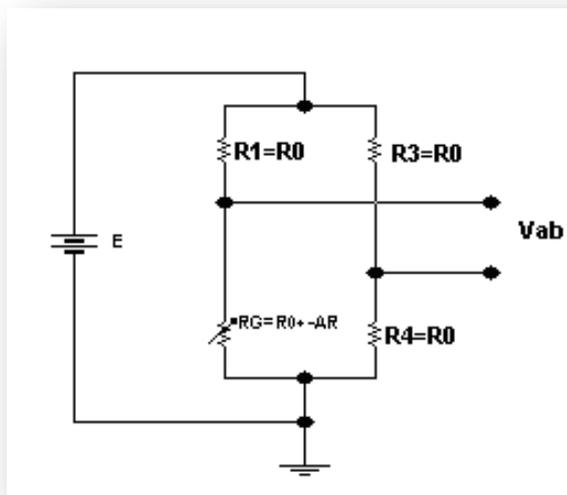
#### **Factor de expansión lineal.**

Representa un error que se produce en la magnitud de salida en ausencia de señal de entrada, es decir, en ausencia de deformación. Este error depende de la temperatura ambiente a la que está sometida la galga. Se expresa en  $\text{C}^{-1}$ .

**Aplicaciones más comunes:** Medición de deformación, Medición de esfuerzos, Medición de fuerza/Peso. El montaje más común utilizado para medir deformaciones mediante galgas es el **punte de Wheatstone**. Existen tres tipos de montajes básicos: con una, dos y cuatro galgas. La medida se suele realizar por deflexión, es decir midiendo la diferencia de tensiones existentes entre los terminales de salida del sensor.

#### **➤ UNA GALGA**

Este puente de medida se caracteriza por una baja sensibilidad. Por otro lado al solo haber una galga esta no está compensado en temperatura.



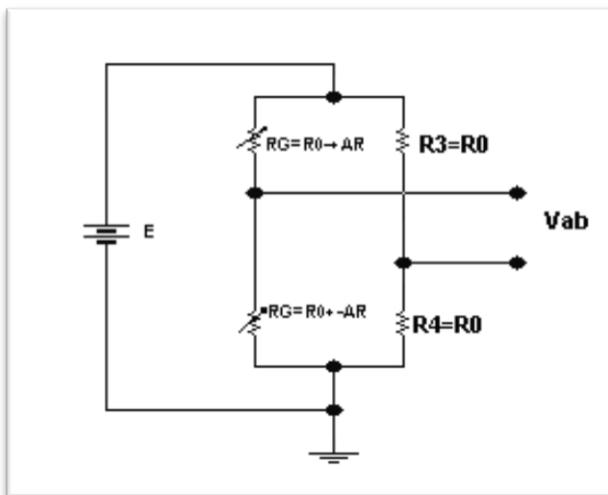
$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{R_0 \pm \Delta R}{R_0 \pm \Delta R + R_0} - \frac{1}{2}$$

$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{2R_0 \pm 2\Delta R - 2R_0 \mp \Delta R}{2(2R_0 \pm \Delta R)}$$

$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{\Delta R}{2(2R_0 \pm \Delta R)}; \Delta R \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \frac{V_{ab}}{E} = \frac{\Delta R}{4R_0}$$

### ➤ DOS GALGAS



$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{R_0 \pm \Delta R}{R_0 \pm \Delta R + R_0 \mp \Delta R} - \frac{1}{2}$$

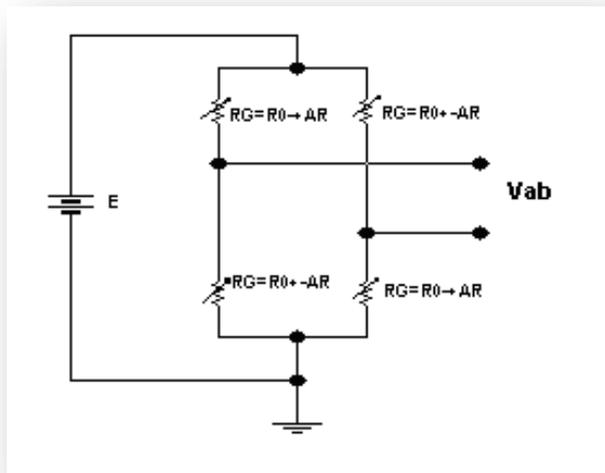
$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{2R_0 \pm 2\Delta R - 2R_0}{4R_0}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{ab}}{E} = \frac{\Delta R}{2R_0}$$

Debido a la utilización de dos galgas se consigue duplicar la sensibilidad del puente respecto al anterior. Esto permite que para una misma deformación tengamos una mayor señal de salida para una tensión de alimentación dada. La disposición de las galgas, permiten la compensación en temperatura.

### ➤ CUATRO GALGAS

La utilización de cuatro galgas cuadruplica la sensibilidad del puente respecto al puente de una sola galga. De igual forma que en el caso anterior, las galgas están compensadas en temperatura.



$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{R_0 + \Delta R}{2R_0} - \frac{R_0 - \Delta R}{2R_0}$$

$$\frac{V_{ab}}{E} = \frac{\pm 2\Delta R}{2R_0}$$

$$\Rightarrow \frac{V_{ab}}{E} = \frac{\Delta R}{R_0}$$

## 5. PROCEDIMIENTO:

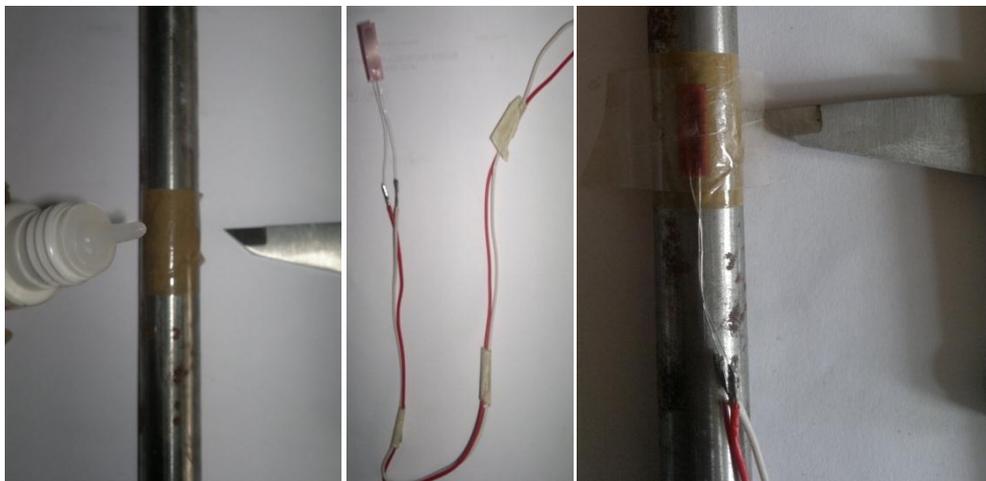
- Selección de probeta y comprobación de su geometría en el software PANDEO E9-UTA.vi; 0,5 pulgadas de diámetro y 10 pulgadas de longitud.
- Selección de galga extensiométrica, ANEXO A4.
- Revisión de especificaciones para uso de galgas extensiométricas, ASTM E83-02 y ANEXO A3.



- Señalamiento de la ubicación del sensor en la probeta, centro de la probeta a ensayar.



- Limpieza de la zona de colocación de la galga extensiométrica, lijado suave y limpieza con un paño bañado en INPRESOL.
- Colocación de adhesivo CYANOACRYLATE en la probeta.
- Colocación de cinta adhesiva oscura en la zona de ubicación de la galga.
- Colocación de la galga sobre la superficie de la cinta adhesiva transparente.
- Colocación de la galga en la probeta.
- Colocación de cable fino en las terminales de la galga extensiométrica.



- Colocación de la probeta en la máquina de ensayos UTAPRESS; verificar que la columna se encuentre en el centro de la base inferior y superior de la máquina.
- Conexión de cables terminales al Módulo UTAPRESS.
- Verificación de conexiones del módulo.

- Encendido de la máquina con pre carga, hasta que la probeta esté completamente empotrada entre la base superior e inferior de la prensa.
- Encendido del módulo de adquisición de datos GE-001UTA, desde PANDEOE9-UTA.vi.
- Aplicación de la carga de compresión.
- Recolección de datos hasta que la probeta falle por pandeo.
- Apagado de todos los equipos.
- Desconexión de cables del sensor.
- Limpieza de la máquina.
- Elaboración del informe.

## 6. RESULTADOS:

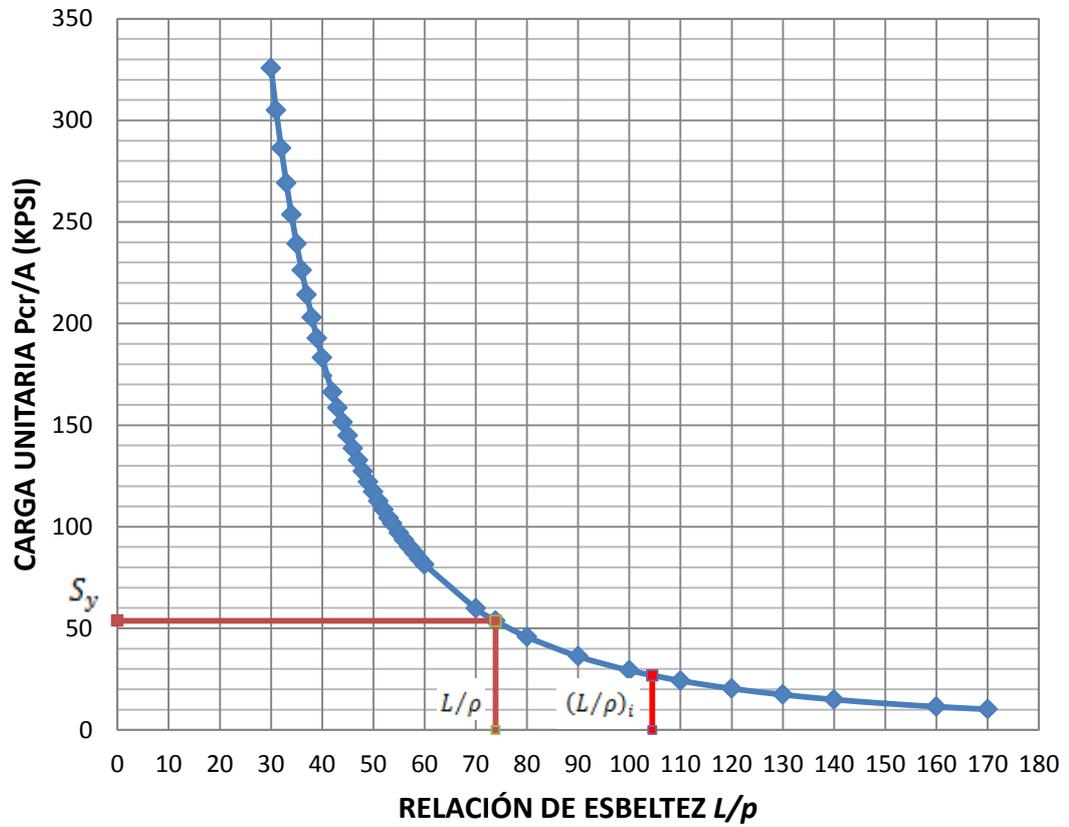
En la siguiente gráfica se describe la curva de Euler calculada en base a la ecuación 2.17, en la cual se grafican la intersección de  $L/\rho$  con el valor de la resistencia a la fluencia del acero AISI 1018, punto 73.88; 53.7, para la determinación de si una columna es corta o larga de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$L/\rho > (L/\rho)_i \text{ Ecuación de Euler, columnas largas}$$

$$L/\rho < (L/\rho)_i \text{ Ecuación de Johnson, columnas cortas.}$$

La recta correspondiente al punto 104.48; 0 representa el valor de la relación de esbeltez de transición, siendo éste punto el que determina el cumplimiento de las expresiones anteriores, en función de la geometría de las probetas a ensayar.

## CURVA DE EULER Probeta UTA 11001 ACERO AISI 1018



A continuación se muestra el resultado real obtenido del sensor extensiométrico.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA  
PANDEO E9-11UTA

C  
L  
O  
S  
E

### GEOMETRÍA

PROBETAS ASTM    PROBETAS UTA

Diámetro(D)  
0,5 plg

Longitud(L)  
10 plg

---

CONDICIÓN DE EXTREMOS  
C    1

MÓDULO DE ELASTICIDAD  
E    2,97E+7 KPSI

RESISTENCIA A LA FLUENCIA  
Sy    53700 KPSI

### RESULTADOS

Inercia(I)    Area (A)    Radio de giro (p)

0,00307 plg<sup>4</sup>    0,1963 plg<sup>2</sup>    0,125 plg

L/p    (L/p)<sub>i</sub>

80    < 104,485

Columna corta  
JHONSON

CARGA UNITARIA  
S<sub>cr</sub>= 37959,7 KPSI

CARGA CRÍTICA  
P<sub>cr</sub>= 7453,37 lb

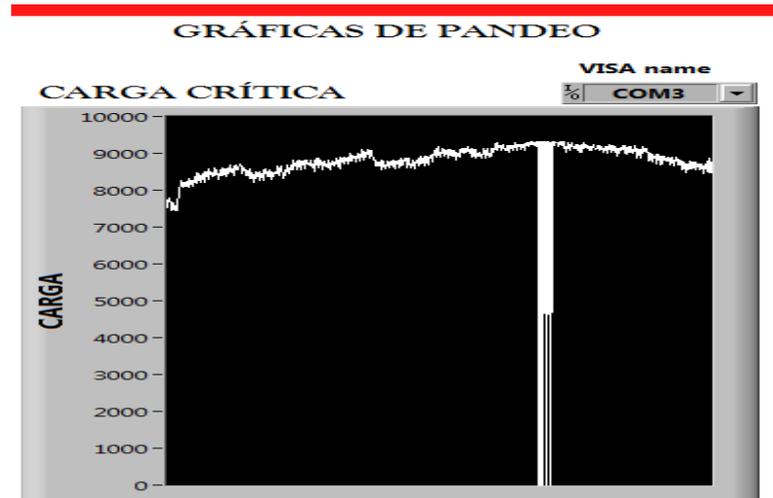
PRUEBA EXTENSIMÉTRICA

Read ASCII    Decimal    CARGA

1%    25    8470 lb

### CURVA DE EULER

### CURVA DE JONHSON



El valor de cálculo difiere del valor medido por el sensor debido a la alta sensibilidad de las galgas, además se debe acotar que no se puede tener un empotramiento exacto de las probetas, por lo cual el valor de  $C$  no es real, más bien es una aproximación teórica.

## 7. CONCLUSIONES

## 8. RECOMENDACIONES

## 9. BIBLIOGRAFÍA:

## 10. ANEXOS:

## SECCIÓN D

### NORMAS ASTM UTILIZADAS

- **ASTM E9-89a.** Métodos de prueba estándar de análisis de compresión de materiales metálicos a temperatura ambiente.
  
- **ASTM E83.** Prácticas para la clasificación y verificación de extensómetros.
  
- **ASTM E251.** Métodos de prueba para características de rendimiento metálico en condiciones de servicio de medidores de resistencia a la tensión.



# Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 9; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

## 1. Scope

1.1 These test methods cover the apparatus, specimens, and procedure for axial-load compression testing of metallic materials at room temperature (Note 1). For additional requirements pertaining to cemented carbides, see Annex A1.

NOTE 1—For compression tests at elevated temperatures, see Practice E 209.

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard. The metric equivalent values cited in the standard may be approximate.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

- B 557 Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products<sup>2</sup>
- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>3</sup>
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>3</sup>
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometer<sup>3</sup>
- E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus<sup>3</sup>
- E 171 Specification for Standard Atmospheres for Conditioning and Testing Flexible Barrier Materials<sup>4</sup>
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods<sup>5</sup>

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.04 on Uniaxial Testing.

Current edition approved March 31, 1989. Published May 1989. Originally published as E 9 – 24 T. Last previous edition E 9 – 89.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 02.02.

<sup>3</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

<sup>4</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.09.

<sup>5</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02.

E 209 Practice for Compression Tests of Metallic Materials at Elevated Temperatures with Conventional or Rapid Heating Rates and Strain Rates<sup>3</sup>

E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>3</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions:* The definitions of terms relating to compression testing and room temperature in Terminology E 6 and Specification E 171, respectively, shall apply to these test methods.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *buckling*—In addition to compressive failure by crushing of the material, compressive failure may occur by (1) elastic instability over the length of a column specimen due to nonaxiality of loading, (2) inelastic instability over the length of a column specimen, (3) a local instability, either elastic or inelastic, over a small portion of the gage length, or (4) a twisting or torsional failure in which cross sections rotate over each other about the longitudinal specimen axis. These types of failures are all termed *buckling*.

3.2.2 *column*—a compression member that is axially loaded and that may fail by buckling.

3.2.3 *radius of gyration*—the square root of the ratio of the moment of inertia of the cross section about the centroidal axis to the cross-sectional area:

$$\rho = (I/A)^{1/2} \quad (1)$$

where:

$\rho$  = radius of gyration,

$I$  = moment of inertia of the cross section about centroidal axis (for specimens without lateral support, the smaller value of  $I$  is the critical value), and

$A$  = cross-sectional area.

3.2.4 *critical stress*—the axial uniform stress that causes a column to be on the verge of buckling. The critical load is calculated by multiplying the critical stress by the cross-section area.

3.2.5 *buckling equations*—If the buckling stress is less than or equal to the proportional limit of the material its value may be calculated using the Euler equation:

$$S_{cr} = C\pi^2 E/(L/\rho)^2 \quad (2)$$

If the buckling stress is greater than the proportional limit of the material its value may be calculated from the modified Euler equation:

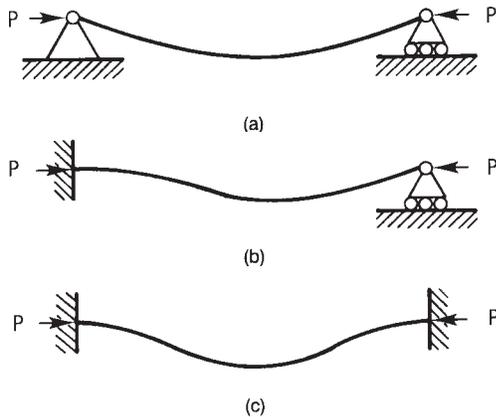
$$S_{cr} = C\pi^2 E_t/(L/\rho)^2 \quad (3)$$

where:

- $S_{cr}$  = critical buckling stress,
- $E$  = Young's modulus,
- $E_t$  = tangent modulus at the buckling stress,
- $L$  = column length, and
- $C$  = end-fixity coefficient.

Methods of calculating the critical stress using Eq 3 are given in Ref (1).<sup>6</sup>

3.2.6 *end-fixity coefficient*—There are certain ideal specimen end-fixity conditions for which theory will define the value of the constant  $C$  (see Fig. 1). These values are:



**FIG. 1 Diagrams Showing Fixity Conditions and Resulting Buckling of Deformation**

- |   |             |
|---|-------------|
| Freely rotating ends (pinned or hinged) | $C = 1$ (a) |
| One end fixed, the other free to rotate | $C = 2$ (b) |
| Both ends fixed                         | $C = 4$ (c) |

NOTE 2—For flat-end specimens tested between flat rigid anvils, it was shown in Ref (1) that a value of  $C = 3.75$  is appropriate.

3.2.7 *barreling*—restricted deformation of the end regions of a test specimen under compressive load due to friction at the specimen end sections and the resulting nonuniform transverse deformation as shown schematically and in the photograph in Fig. 2. Additional theoretical and experimental information on barreling as illustrated in Fig. 2 is given in Ref (2).

#### 4. Summary of Test Methods

4.1 The specimen is subjected to an increasing axial compressive load; both load and strain may be monitored either continuously or in finite increments, and the mechanical properties in compression determined.

#### 5. Significance and Use

5.1 *Significance*—The data obtained from a compression test may include the yield strength, the yield point, Young's modulus, the stress-strain curve, and the compressive strength (see Terminology E 6). In the case of a material that does not fail in compression by a shattering fracture, compressive strength is a value that is dependent on total strain and specimen geometry.

5.2 *Use*—Compressive properties are of interest in the analyses of structures subject to compressive or bending loads or both and in the analyses of metal working and fabrication processes that involve large compressive deformation such as forging and rolling. For brittle or nonductile metals that fracture in tension at stresses below the yield strength, compression tests offer the possibility of extending the strain range of the stress-strain data. While the compression test is not complicated by necking as is the tension test for certain metallic materials, buckling and barreling (see Section 3) can complicate results and should be minimized.

#### 6. Apparatus

6.1 *Testing Machines*—Machines used for compression testing shall conform to the requirements of Practices E 4. For universal machines with a common test space, calibration shall be performed in compression.

6.1.1 The bearing surfaces of the heads of the testing machine shall be parallel at all times with 0.0002 in./in. (m/m) unless an alignment device of the type described in 6.3 is used.

##### 6.2 Bearing Blocks:

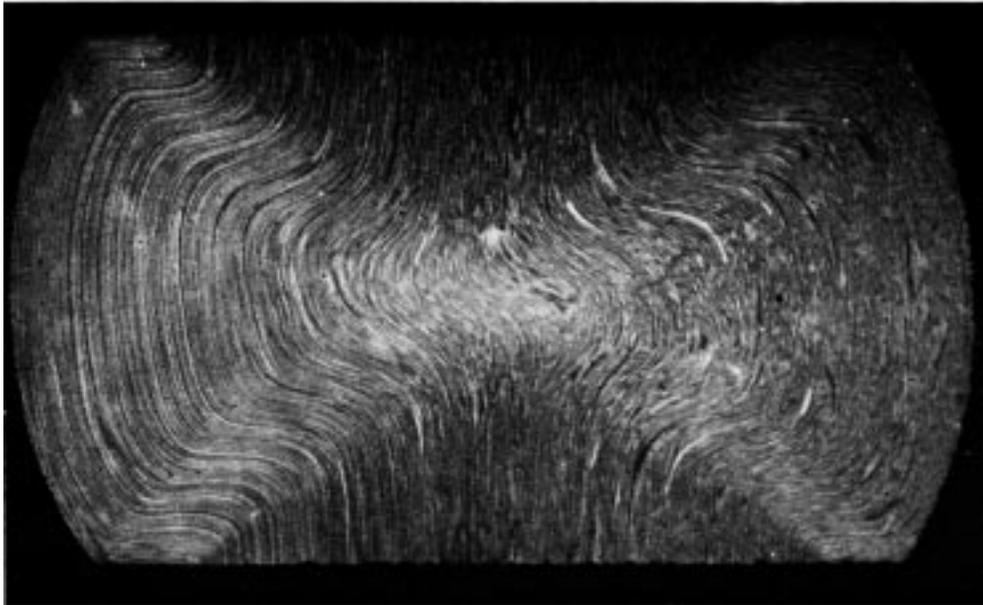
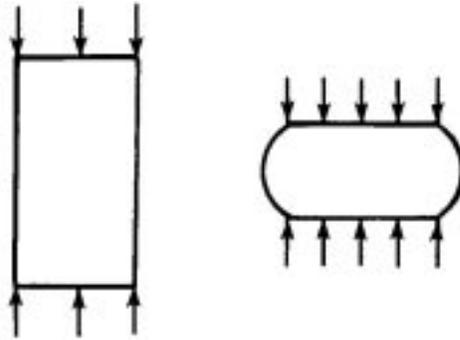
6.2.1 Both ends of the compression specimen shall bear on blocks with surfaces flat and parallel within 0.0002 in./in. (m/m). Lack of initial parallelism can be overcome by the use of adjustable bearing blocks (Note 3). The blocks shall be made of, or faced with, hard material. Current laboratory practice suggests the use of tungsten carbide when testing steel and hardened steel blocks (55 HRC or greater) and when testing nonferrous materials such as aluminum, copper, etc. The specimen must be carefully centered with respect to the testing machine heads or the subpress if used (see 6.3, Alignment Device/Subpress).

NOTE 3—It should be remembered that the object of an adjustable bearing block is to give the specimen as even a distribution of initial load as possible. An adjustable bearing block cannot be relied on to compensate for any tilting of the heads that may occur during the test.

6.2.2 The bearing faces of adjustable bearing blocks that contact the specimen shall be made parallel before the load is applied to the specimen. One type of adjustable bearing block that has proven satisfactory is illustrated in Fig. 3. Another arrangement involving the use of a spherical-seated bearing block that has been found satisfactory for testing material other than in sheet form is shown in Fig. 4. It is desirable that the spherical-seated bearing block be at the upper end of the test specimen (for specimens tested with the load axis vertical). The spherical surface of the block shall be defined by a radius having its point of origin in the flat surface that bears on the specimen.

##### 6.3 Alignment Device/Subpress:

<sup>6</sup> The boldface numbers in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.



NOTE 1—A cylindrical specimen of AISI 4340 steel (HRC = 40) was compressed 57 % (see upper diagram). The photo macrograph was made of a polished and etched cross section of the tested specimen. The highly distorted flow lines are the result of friction between the specimen ends and the loading fixture. Note the triangular regions of restricted deformation at the ends and the cross-shaped zone of severe shear.

FIG. 2 Illustration of Barreling

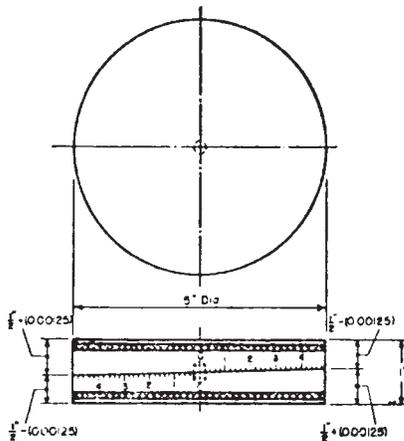


FIG. 3 Adjustable Bearing Block for Compression Testing

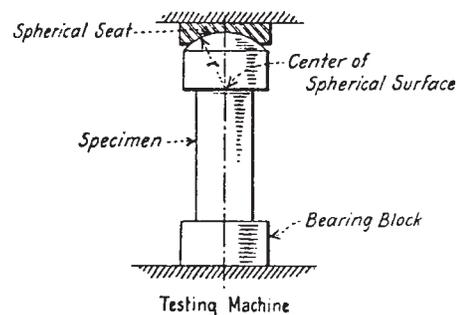


FIG. 4 Spherical-Seated Bearing Block

axial alignment. The design of the device or subpress is largely dependent on the size and strength of the specimen. It must be designed so that the ram (or other moving parts) does not jam or tilt the device or the frame of the machine as a result of loading. The bearing blocks of the device shall have the same requirements for parallelism and flatness as given in 6.2.1.

6.3.1 It is usually necessary to use an alignment device, unless the testing machine has been designed specifically for

6.3.2 The primary requirements of all alignment devices are that the load is applied axially, uniformly, and with negligible “slip-stick” friction. An alignment device that has been found suitable is shown in Fig. 5 and described in Ref. (3). Other devices of the subpress type have also been used successfully.

6.4 *Compression Testing Jigs*—In testing thin specimens, such as sheet material, some means should be adopted to prevent the specimen from buckling during loading. This may be accomplished by using a jig containing sidesupport plates that bear against the wide sides of the specimen. The jig must afford a suitable combination of lateral-support pressure and spring constant to prevent buckling, but without interfering with axial deformation of the specimen. Although suitable combinations vary somewhat with variations in specimen material and thickness, testing temperatures, and accuracy of alignment, acceptable results can be obtained with rather wide ranges of lateral-support pressure and spring constant. Generally, the higher the spring constant of the jig, the lower the lateral-support pressure that is required. Proper adjustments of these variables should be established during the qualification of the equipment (see 6.6).

6.4.1 It is not the intent of these methods to designate specific jigs for testing sheet materials, but merely to provide a few illustrations and references to jigs that have been used successfully, some of which are cited in Table 1. Other jigs are acceptable provided they prevent buckling and pass the qualification test set forth in 6.6. Compression jigs generally require

that the specimen be lubricated on the supported sides to prevent extraneous friction forces from occurring at the support points.

#### 6.5 *Strain Measurements:*

6.5.1 Mechanical or electromechanical devices used for measuring strain shall comply with the requirements for the applicable class described in Practice E 83. The device shall be verified in compression.

6.5.2 Electrical-resistance strain gages (or other single-use devices) may be used provided the measuring system has been verified and found to be accurate to the degree specified in Practice E 83. The characteristics of electrical resistance strain gages have been determined from Test Methods E 251.

6.6 *Qualification of Test Apparatus*— The complete compression-test apparatus, which consists of the testing machine and when applicable, one or more of the following; the alignment device, the jig and the strain-measurement system, shall be qualified as follows:

6.6.1 Conduct tests to establish the elastic modulus or five replicate specimens of 2024-T3 aluminum alloy sheet or 2024-T4 aluminum alloy bar in accordance with Test Method E 111. These qualification specimens shall be machined from sheet or bar in the location specified in Test Methods B 557. The thickness of the sheet or diameter of the bar may be machined to the desired thickness or diameter. It is essential that the extensometer be properly seated on the specimens when this test is performed. When the qualification specimens each provide a modulus value of  $10.7 \times 10^6$  psi (73.8 GPa)  $\pm 5\%$ , the apparatus qualifies.

6.6.2 The qualification procedure shall be performed using the thinnest rectangular specimen or smallest diameter round specimen to be tested in the apparatus.

## 7. Test Specimens

7.1 *Specimens in Solid Cylindrical Form*—It is recommended that, where feasible, compression test specimens be in the form of solid circular cylinders. Three forms of solid cylindrical test specimens for metallic materials are recognized, and designated as short, medium-length, and long (Note 4). Suggested dimensions for solid compression test specimens for general use are given in Table 2.

NOTE 4—Short specimens typically are used for compression tests of such materials as bearing metals, which in service are used in the form of thin plates to carry load perpendicular to the surface. Medium-length specimens typically are used for determining the general compressive strength properties of metallic materials. Long specimens are best adapted for determining the modulus of elasticity in compression of metallic materials. The specimen dimensions given in Table 2 have been used successfully. Specimens with a *L/D* (length/diameter ratio) of 1.5 or 2.0 are best adapted for determining the compressive strength of high-strength materials.

7.2 *Rectangular or Sheet-Type Specimens*—Test specimens shall be flat and preferably of the full thickness of the material. Where lateral support is necessary, the width and length are dependent upon the dimensions of the jig used to support the specimen. The length shall be sufficient to allow the specimen to shorten the amount required to define the yield strength, or yield point, but not long enough to permit buckling in the

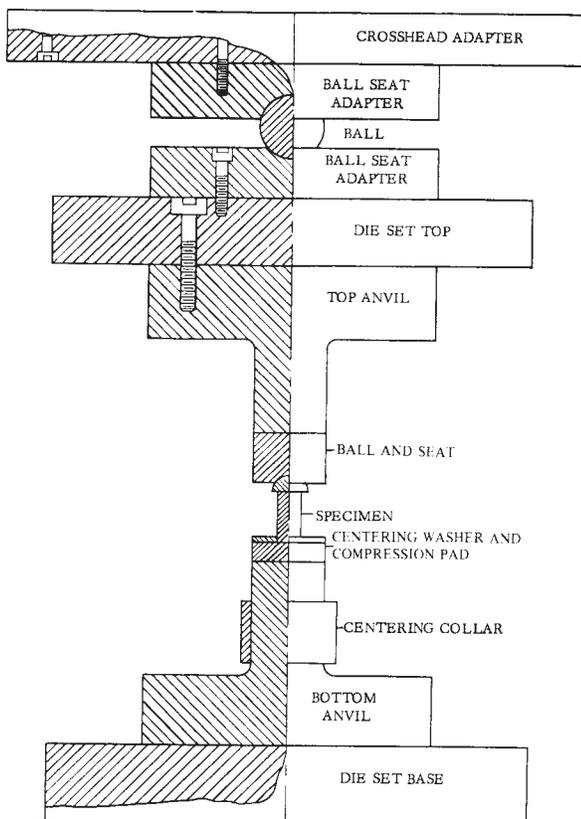


FIG. 5 Example of Compression Testing Apparatus

**TABLE 1 Representative Compression Jigs and Specimen Dimensions for Testing of Thin Sheet<sup>A</sup>**

Type of Jig	Ref	Thickness		Width		Length		Gage Length		
		in.	mm	in.	mm	in.	mm	in.	mm	
Montgomery-Templin:	<b>(4 and 5)</b>	General use	0.016 and over	0.40 and over	0.625	16.0	2.64	67.0	1	25
Magnesium alloys		0.016 and over	0.40 and over	0.750 <sup>B</sup>	20.0	2.64	67.0	1	25	
NACA (Kotanchik et al)	<b>(6)</b>	0.020 and over	0.50 and over	0.53	13.6	2.53	64.5	1	25	
Moore-McDonald	<b>(7)</b>	0.032 and over	0.80 and over	0.75 <sup>C</sup>	20.0	2.64	67.0	1	25	
LaTour-Wolford	<b>(8)</b>	0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	1.95	49.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.00	51.0	1	25	
Miller	<b>(9-11)</b>	0.006 to 0.010	0.15 to 0.25	0.48	12.2	2.22	56.5	1	25	
		0.010 to 0.020	0.25 to 0.50	0.50	12.5	2.23	56.5	1	25	
		0.020 and over	0.50 and over	0.50	12.5	2.25	57.0	1	25	
Sandorff-Dillon:	<b>(12)</b>	General use	0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	4.12	104.5	2	50
High-strength steel		0.010 and over	0.25 and over	0.50	12.5	3.10	78.5	2	50	

<sup>A</sup> See Ref. (13) for additional jigs and specimen dimensions.

<sup>B</sup> Reduced to 0.625 in. (16.0 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

<sup>C</sup> Reduced to 0.650 in. (16.5 mm) for 1.25 in. (30 mm) at the mid-length.

**TABLE 2 Suggested Solid Cylindrical Specimens<sup>A</sup>**

NOTE 1—Metric units represent converted specimen dimensions close to, but not the exact conversion from inch-pound units.

Specimens	Diameter		Length		Approx L/D Ratio
	in.	mm	in.	mm	
Short	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	0.8
	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.00 ± 0.05	25. ± 1.	2.0
Medium	0.50 ± 0.01	13.0 ± 0.2	1.50 ± 0.05	38. ± 1.	3.0
	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	2.38 ± 0.12	60. ± 3.	3.0
	1.00 ± 0.01	25.0 ± 0.2	3.00 ± 0.12	75. ± 3.	3.0
	1.12 ± 0.01	30.0 ± 0.2	3.38 ± 0.12	85. ± 3.	3.0
Long	0.80 ± 0.01	20.0 ± 0.2	6.38 ± 0.12	160. ± 3.	8.0
	1.25 ± 0.01	32.0 ± 0.2	12.50 min	320 min	10.0

<sup>A</sup> Other length-to-diameter ratios may be used when the test is for compressive yield strength.

unsupported portion. Specimen dimensions and the various types of jigs are given in Table 1.

**7.3 Preparation of Specimens**—Lateral surfaces in the gage length shall not vary in diameter, width, or thickness by more than 1 % or 0.002 in. (0.05 mm), whichever is less. (If a reduced section is used, this requirement applies only to the surface of the reduced section.) Also, the centerline of all lateral surfaces of the specimens shall be coaxial within 0.01 in. (0.25 mm).

**7.3.1 Surface Finish**—Machined surfaces of specimens shall have a surface finish of 63 μin. (1.6 μm) or better. Machined lateral surfaces to which lateral support is to be applied shall be finished to at least 40 microinches (1.0 μm) arithmetic average.

**7.3.2 Flatness and Parallelism**—The ends of a specimen shall be flat and parallel within 0.0005 in./in. (mm/mm) and perpendicular to the lateral surfaces to within 3' of arc. In most cases this requirement necessitates the machining or grinding of the ends of the specimen.

**7.3.3 Edges of Rectangular Specimens**—A width of material equal to at least the thickness of the specimen shall be machined from all sheared or stamped edges in order to remove material whose properties may have been altered. (If a reduced

section is used, this requirement applies only to the edges of the reduced section.) Specimens shall be finished so that the surfaces are free of nicks, grooves, and burrs.

**7.4 Gage Length Location**—The ends of the gage length shall not be closer to the ends of the specimen or ends of the reduced section than one half of the width or diameter of the specimen.

## 8. Procedure

**8.1 Specimen Measurement**—Measure the width and thickness, or the diameter of the specimen with a micrometer along the gage section. Specimen dimensions greater than 0.10 in. (2.5 mm) should be measured to the nearest 0.001 in. (0.02 mm), and those less than 0.10 in. (2.5 mm) should be determined to the nearest 1 % of the dimension being measured. Calculate the average cross-sectional area of the specimen gage section.

**8.2 Cleaning**—Clean the ends of the specimen and fixture bearing blocks with acetone or another suitable solvent to remove all traces of grease and oil.

**8.3 Lubrication**—Bearing surface friction can affect test results (see section 5.2 and Fig. 2). Friction has been successfully reduced by lubricating the bearing surfaces with TFE-fluorocarbon sheet, molybdenum disulfide, and other materials summarized in Ref. (3).

**8.4 Specimen Installation**—Place the specimen in the test fixture and carefully align the specimen to the fixture to ensure concentric loading. Also, check that the specimen loading/reaction surfaces mate with the respective surfaces of the fixture. If the fixture has side supports, the specimen sides should contact the support mechanism with the clamping pressure recommended by the fixture manufacturer, or as determined during the fixture verification tests. If screws are used to adjust side support pressure, it is recommended that a torque wrench be utilized to ensure consistent pressure.

**8.4.1 Transducer Attachment**—If required, attach the extensometer or other transducers, or both, to the specimen gage section. The gage length must be at least one half or preferably one diameter away from the ends of the specimen (see 7.4).

**8.5 Load-Strain Range Selection**—Set the load range of the testing machine so the maximum expected load is at least one

third of the range selected. Select the strain or deflection scale so that the elastic portion of the load-versus-strain or load-versus-deflection plot on the autographic record, is between 30° and 60° to the load axis.

**8.6 Strain Measurements**—Devices used for measuring strain shall comply with the requirements for the applicable class of extensometer described in Practice E 83. Electrical strain gages, if used, shall have performance characteristics established by the manufacturer in accordance with Test Methods E 251.

**8.7 Testing Speed**—For testing machines equipped with strain-rate pacers, set the machine to strain the specimen at a rate of 0.005 in./in.·min (m/m·min). For machine with load control or with crosshead speed control, set the rate so the specimen is tested at a rate equivalent to 0.005 in./in.·min (m/m·min) strain-rate in the elastic portion. A rate of 0.003 in./in.·min (m/m·min) can be used if the material is strain-rate sensitive.

**8.7.1** For machines without strain-pacing equipment or automatic feedback control systems, maintain a constant crosshead speed to obtain the desired average strain-rate from the start of loading to the end point of the test. The average strain-rate can be determined from a time-interval-marked load-strain record, a time-strain graph, or from the time of the start of loading to the end point of test as determined from a time-measuring device (for example, stopwatch). It should be recognized that the use of machines with constant rate of crosshead movement does not ensure constant strain rate throughout a test.

**8.7.2** It should also be noted that the free-running crosshead speed may differ from the speed under load for the same machine setting, and that specimens of different stiffnesses may also result in different rates, depending upon the test machine and fixturing. Whatever the method, the specimen should be tested at a uniform rate without reversals or sudden changes. The test rate must also be such that the rate of load change on the specimen being tested, will be within the dynamic response of the measuring systems. This is of particular importance when testing short specimens of high-modulus materials.

**8.8 Test Conduct**—After the specimen has been installed and aligned, and the strain- or deflection-measuring transducer installed, activate the recording device(s) and initiate the test at the prescribed rate. Continue the test at a uniform rate until the test has been completed as stated below.

**8.8.1 Ductile Materials**—For ductile materials, the yield strength or yield point, and sometimes the strength at a strain greater than the yield strain, can be determined. The conduct of the test to determine either the onset of yielding or the compressive strength or both is the same. Materials without sharp-kneed stress-strain diagrams will require that the strain or deflection at yield be initially estimated, and the specimen tested sufficiently beyond the initial estimation to be sure the yield stress can be determined after the test (see 9.3). For materials, exhibiting a sharp-kneed stress-strain curve or a distinctive yield point, the test can be terminated either after a sharp knee or after the drop in load is observed.

**8.8.2 Brittle Materials**—Brittle materials that fail by crushing or shattering may be tested to failure.

**8.9 Number of Specimens**—Specimen blanks shall be taken from bulk materials according to applicable specifications. The number of specimens to be tested should be sufficient to meet the requirements as determined by the test purpose, or as agreed upon between the parties involved. The larger the sample, the greater the confidence that the sample represents the total population. In most cases, between five and ten specimens should be sufficient to determine the compressive properties of a sample with reasonable confidence.

**8.10 Precautions:**

**8.10.1 Buckling**—In compression tests of relatively long, slender specimens that are not laterally supported, the specimens may buckle elastically and fly from the test setup. A protective device should be in place to prevent injury.

**8.10.2 Shattering Fracture**—Some materials may fail in a shattering manner which will cause pieces to be expelled as shrapnel. A protective device should be in place to prevent injury.

## 9. Calculations

**9.1** Determine the properties of the material from the dimensions of the specimen and the stress-strain diagram as described in the following paragraphs. For testing machines that record load units instead of stress, convert the load-versus-strain diagram to units of stress by dividing the load by the original cross-sectional area of the specimen gage section.

**9.2 Modulus of Elasticity**—Calculate the modulus of elasticity as specified in Test Method E 111. If the elastic modulus is the prime quantity to be determined, the procedure given in Test Method E 111 must be followed. Again, the calculation of the modulus shall be according to Section 7 of Test Method E 111.

**9.3 Yield Strength**—To determine the yield strength by the offset method it is necessary to secure data (autographic or numerical) from which a stress-strain diagram may be drawn. Then on the stress-strain diagram (Fig. 6) lay off  $Om$  equal to the specified value of offset (conventional offset is 0.002 in./in. (m/m)), draw  $mn$  parallel to  $OA$ , and thus locate  $r$ , the intersection of  $mn$  with the stress-strain diagram. The stress corresponding to the point  $r$  is the yield strength for the specified offset.

**9.3.1** In reporting values of yield strength obtained by these methods, the specified value of offset used should be stated in parentheses after the term yield strength. Thus:

$$\text{Yield strength (offset = 0.2 \%)} = 52.0 \text{ ksi (359 MPa)} \quad (4)$$

**9.3.2** In using these methods, a Class B-2 extensometer, as described in Practice E 83, is sufficiently sensitive for most materials.

**NOTE 5**—Automatic devices are available that determine offset yield strength without plotting a stress-strain curve. Such devices may be used if their accuracy has been demonstrated to be satisfactory.

**NOTE 6**—If the load drops before the specified offset is reached, technically the material does not have a yield strength (for that offset). In this case, the stress at the maximum load before the specified offset is reached may be reported instead of the yield strength and shall be designated as the yield point.

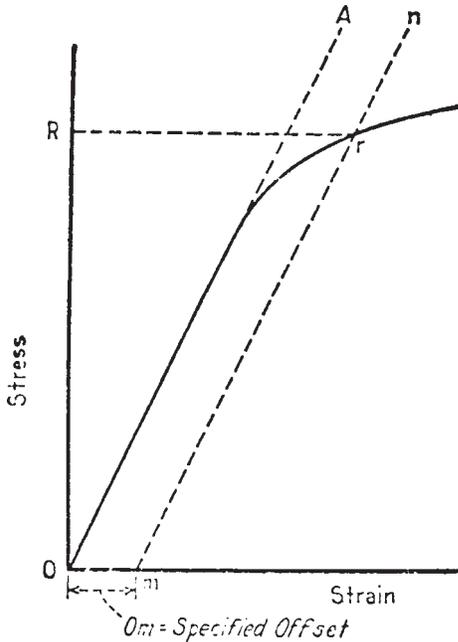


FIG. 6 Stress-Strain Diagram for Determination of Yield Strength by the Offset Method

9.4 *Yield Point*—Materials that exhibit a sharp-kneed stress-strain diagram may exhibit a distinct drop in stress with increasing strain. The yield point is the maximum stress attained just prior to the sudden drop in stress. For testing machines without strain- or deflection-recording capabilities, the yield point can be determined by noting the load at which the load dial indicator needle suddenly drops with the testing machine running at a steady rate.

9.5 *Compressive Strength*—For a material that fails in compression by crushing or fracturing, the compressive strength is the maximum stress at or before fracture, as determined by dividing the maximum load by the cross-sectional area. For ductile materials, compressive strength may be determined from the stress-strain diagram at a specified total strain. The strain at which this stress was determined must be specified.

**10. Report**

10.1 Include the following information in the test report:

10.1.1 *Specimen Material*—Describe the specimen material, alloy, heat treatment, mill batch number, grain direction, etc., as applicable.

10.1.2 *Specimen Configuration*—Include a sketch of the specimen configuration or reference to the specimen drawing.

10.1.3 *Specimen Dimensions*—State the actual measured dimensions for each specimen.

10.1.4 *Test Fixture and Lubricant*—Describe the test fixture or refer to fixture drawings, specifying lubricant used if any.

10.1.5 *Testing Machine*—Include the make, model, and load range of testing machine.

10.1.6 *Speed of Testing*—Record the test rate and mode of control.

10.1.7 *Stress-Strain Diagram*—Include, if possible, the stress-strain diagram with scales, specimen number, test data, rate, and other pertinent information.

10.1.8 *Modulus of Elasticity*—Report the modulus of elasticity when required, as determined according to 9.2.

10.1.9 *Yield Strength*—Report the yield stress or yield point when required and the method of determination, as calculated in 9.3 and 9.4.

10.1.10 *Compressive Strength*—Report the compressive strength for material exhibiting brittle failure. A compressive strength at a specified total strain may be reported for ductile materials. If so, report the strain at which the compressive stress was determined.

10.1.11 *Type of Failure*—When applicable, describe the type of specimen failure.

10.1.12 *Precision and Bias*—State the precision and accuracy of the data reported as applicable in a manner consistent with Practice E 177.

10.1.13 *Anomalies*—State any anomalies that occurred during the test that may have had an effect on the test results.

10.2 For commercial acceptance testing the following sections of 10.1 are considered sufficient: 10.1.1 and 10.1.2, and 10.1.9 and 10.1.11.

**11. Precision and Bias**

11.1 *Precision*—The following parameters are reported to impact upon the precision of the test methods: specimen buckling, loading surface friction, specimen barreling, and specimen size. The subcommittee is in the process of quantifying these effects.

11.2 *Bias*—There are no available reference standards for destructive type tests such as compression. Therefore, the bias of this test method is an unknown.

**12. Keywords**

12.1 axial compression; barreling; bearing blocks; buckling; compressometer; sheet compression jig; stress-strain diagram; sub-press; testing machine

## (Mandatory Information)

**A1. SPECIAL REQUIREMENTS IN THE DETERMINATION OF THE COMPRESSIVE STRENGTH OF CEMENTED CARBIDES**
**A1.1 Characteristics of Cemented Carbides**

A1.1.1 Cemented carbides are manufactured in a range of compositions having hardness from 81.0 to 93.0 HRA and compressive strengths from 300 to over 800 ksi (2100 to 5500 MPa). They fail by shattering fracture (see 8.7.2 and section 8.10.2).

**A1.2 Apparatus and Fixtures**

A1.2.1 *Bearing Blocks*—Cemented carbide bearing blocks shall be used. They shall be of a hardness such that the block faces will not suffer significant permanent deformation during test (suggested hardness of 92 HRA).

A1.2.2 *Bearing Block Preparation*—The block diameter shall be at least three times the diameter of the specimen. Its thickness shall be at least two thirds the block diameter. Faces of the bearing blocks shall be flat within  $\pm 0.0002$  in./in. (m/m), parallel within 0.0005 in./in. (m/m), and have a surface finish of 8  $\mu$ m. (0.2  $\mu$ m) arithmetic average (aa). The blocks shall be used in conjunction with devices such as those shown in Figs. 3-5.

A1.2.3 The total accumulated lack of parallelism in the test assembly shall not exceed 0.0005 in./in. (m/m).

A1.2.4 In order to minimize detrimental end effects, a shim of 0.001 in. (0.025 mm) in thickness, of standard cold-rolled steel shim stock, shall be interposed between each specimen end and the bearing block. Each shim shall be used only once (see Ref 14).

**A1.3 Test Specimens**

A1.3.1 *Size and Shape*—The specimens shall be in the form of circular cylinders  $0.375 \pm 0.01$  in. ( $10.0 \pm 0.2$  mm) in diameter and  $1.00 \pm 0.05$  in. ( $25.0 \pm 1.0$  mm) long.

A1.3.2 *Preparation of Specimens*—The ends of a specimen shall be plane and normal to its longitudinal axis. They shall be parallel within a maximum of  $\pm 0.0005$  in./in. (m/m), flat within  $\pm 0.0002$  in./in. (m/m), and have a surface finish of 8  $\mu$ m. (0.2  $\mu$ m) aa.

**A1.4 Speed of Testing**

A1.4.1 Speed of testing shall be specified in terms of rate of stressing the specimen, and shall not exceed 50.0 ksi (345 MPa)/min.

**REFERENCES**

- (1) Papirno, R., "Inelastic Buckling of ASTM Standard E 9 Compression Specimens," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol 15, No. 3, May 1987, pp. 133–135.
- (2) Mescall, J., Papirno, R., and McLaughlin, J., "Stress and Deformation States Associated with Upset Tests in Metals," *Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites*, ASTM STP 808, Richard Chait and Ralph Papirno, Eds., ASTM, 1983, pp. 7–23.
- (3) Chait, R., and Curll, C. H., "Evaluating Engineering Alloys in Compression," *Recent Developments in Mechanical Testing*, ASTM STP 608, Am. Soc. Testing Mats., 1976, pp. 3–19; see also Hsü, T. C., A Study of the Compression Test for Ductile Materials, *Material Research & Standards*, Vol 9, No. 12, December 1969, p. 20.
- (4) Paul, D. A., Howell, F. M., and Grieshaber, H. E., "Comparison of Stress-Strain Curves Obtained by Single-Thickness and Pack Methods," National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC, Technical Note No. NACA-TN-819, August 1941.
- (5) Templin, R. L., "Discussion on Single-Strip Compression Test for Sheet Materials," *Proceedings, ASTM*, Vol 45, 1945, pp. 690–93.
- (6) Kotanchik, J., Woods, W., and Weinberger, R., "Investigation of Methods of Supporting Single-Thickness Specimens in a Fixture for Determination of Compressive Stress-Strain Curves," National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC, Wartime Report No. WR L-189, May 1945.
- (7) Moore, A. A., and McDonald, J. C., "Compression Testing of Magnesium Alloy Sheet," *Proceedings, ASTM*, Vol 45, 1945, pp. 671–704.
- (8) LaTour, H., and Wolford, D. S., "Single-Strip Compression Test for Sheet Materials," *Proceedings, ASTM*, Vol 45, 1945, pp. 671–88.
- (9) Miller, J. A., "A Fixture for Compressive Tests of Thin Sheet Steel Between Lubricated Steel Guides," National Advisory Committee for Aeronautics, Washington, DC, Technical Note No. NACA-TN-1022, April 1946.
- (10) Ramberg, W., and Miller, J. A., "Determination and Presentation of Compressive Stress-Strain Data for Thin Sheet Metal," *Journal of the Aeronautical Sciences*, Vol 13, No. 11, 1946, pp. 569–80.
- (11) Miller, J. A., "Discussion on Micro-Deformation under Tension and Compression Loads of Thin Aluminum Alloy Sheets for Aircraft Construction," *Proceedings, ASTM*, Vol 44, 1944, pp. 683–85 (See Ref. 7 for fuller description of the fixture.)
- (12) Sandorff, P. E., and Dillon, R. K., "Compressive Stress-Strain Properties of Some Aircraft Materials," *Proceedings, ASTM*, Vol 46, 1946, pp. 1039–52.
- (13) *Symposium on Elevated Temperatures Compression Testing of Sheet Materials*, ASTM STP 303, Am. Soc. Testing Mats, 1962.
- (14) Lueth, R. C., and Hale, T. E., "Compressive Strength of Cement Carbides—Failure Mechanics and Testing Methods," *Material Research & Standards*, Vol 10, No. 2, 1970, pp. 23–28.



*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or [service@astm.org](mailto:service@astm.org) (e-mail); or through the ASTM website ([www.astm.org](http://www.astm.org)).*



# Standard Practice for Verification and Classification of Extensometer System<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 83; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

## 1. Scope

1.1 This practice covers procedures for the verification and classification of extensometer systems, but it is not intended to be a complete purchase specification. The practice is applicable only to instruments that indicate or record values that are proportional to changes in length corresponding to either tensile or compressive strain. Extensometer systems are classified on the basis of the magnitude of their errors.

1.2 Because strain is a dimensionless quantity, this document can be used for extensometers based on either SI or US customary units of displacement.

NOTE 1—Bonded resistance strain gages directly bonded to a specimen cannot be calibrated or verified with the apparatus described in this practice for the verification of extensometers having definite gage points. (See procedures as described in Test Methods E 251.)

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>2</sup>

E 21 Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials<sup>2</sup>

E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>2</sup>

## 3. Terminology

3.1 *Definitions:* In addition to the terms listed, see Terminology E 6.

3.1.1 *calibration*—a determination of the calibration factor for a system using established procedures.

3.1.2 *calibration factor*—the factor by which the change in extensometer reading must be multiplied to obtain the equivalent strain.

3.1.2.1 *Discussion*—For any extensometer, the calibration factor is equal to the ratio of change in length to the product of the gage length and the change in the extensometer reading. For direct-reading extensometers the calibration factor is unity.

3.1.3 *compressometer*—a specialized extensometer used for sensing negative or compressive strain.

3.1.4 *deflectometer*—a specialized extensometer used for sensing of extension or motion, usually without reference to a specific gage length.

3.1.5 *error, in extensometer systems*—the value obtained by subtracting the correct value of the strain from the indicated value given by the extensometer system.

3.1.6 *extensometer, n*—a device for sensing strain.

3.1.7 *extensometer systems*—a system for sensing and indicating strain.

3.1.7.1 *Discussion*—The system will normally include an extensometer, conditioning electronics and auxiliary device (recorder, digital readout, computer, etc.). However, completely self-contained mechanical devices are permitted. An extensometer system may be one of three types.

3.1.8 *Type 1 extensometer system, n*—an extensometer system which both defines gage length and senses extension, for example, a clip-on strain gage type with conditioning electronics.

3.1.9 *Type 2 extensometer system, n*—an extensometer which senses extension and the gage length is defined by specimen geometry or specimen features such as ridges or notches.

3.1.9.1 *Discussion*—A Type 2 extensometer is used where the extensometer gage length is determined by features on the specimen, for example, ridges, notches, or overall height (in case of compression test piece). The precision associated with gage length setting for a Type 2 extensometer should be specified in relevant test method or product standard. The position readout on a testing machine is not recommended for use in a Type 2 extensometer system.

<sup>1</sup> This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and is the direct responsibility of Subcommittee E28.01 on Calibration of Mechanical Testing Machines and Apparatus.

Current edition approved June 10, 2002. Published August 2002. Originally published as E 83 – 50. Last previous edition E 83 – 00<sup>ε1</sup>.

<sup>2</sup> *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 03.01.

3.1.10 *Type 3 extensometer system, n*—an extensometer system which intrinsically senses strain (ratiometric principle), for example, video camera system.

3.1.11 *gage length (L), n*—the original length of that portion of the specimen over which strain or change of length is determined.

3.1.11.1 *Discussion*—If the device is used for sensing extension or motion, and gage length is predetermined by the specimen geometry or specific test method, then only resolution and strain error for a specified gage length should determine the class of extensometer system.

3.1.12 *resolution of the strain indicator*—the smallest change in strain that can be estimated or ascertained on the strain indicating apparatus of the testing system, at any applied strain.

3.1.13 *resolution of the digital type strain indicators (numeric displays, printouts, and so forth)*—the resolution is the smallest change in strain that can be displayed on the strain indicator (may be a single digit or a combination of digits) at any applied strain.

3.1.13.1 *Discussion*—If the strain indication, for either type of strain indicator, fluctuates more than twice the resolution, as described in 3.1.11 or 3.1.12, the resolution expressed as a strain shall be equal to one-half the range of fluctuation.

3.1.14 *verification*—a determination that a system meets the requirements of a given classification after calibration according to established procedures.

3.1.15 *verification apparatus*—a device for verifying extensometer systems.

3.1.15.1 *Discussion*—This device is used to simulate the change in length experienced by a test specimen as a result of the applied force. The extensometer may either be attached directly to the mechanism or interfaced with it in a manner similar to normal operation (that is, possibly without contact for some optical extensometers).

#### 4. Verification Apparatus

4.1 The apparatus for verifying extensometer systems shall provide a means for applying controlled displacements to a simulated specimen and for measuring these displacements accurately. It may consist of a rigid frame, suitable coaxial spindles, or other fixtures to accommodate the extensometer being verified, a mechanism for moving one spindle or fixture axially with respect to the other, and a means for measuring accurately the change in length so produced,<sup>3</sup> or any other device or mechanism that will accomplish the purpose equally well. The mechanism provided for moving one spindle relative to the other shall permit sensitive adjustments. The changes in length shall be measured, for example, by means of an interferometer, calibrated standard gage blocks and an indicator, a calibrated micrometer screw, or a calibrated laser measurement system. If standard gage blocks and an indicator, or a micrometer screw, are used, they shall be calibrated and

their limits of accuracy and sensitivity stated. The errors of the verification apparatus shall not exceed one third of the permissible error of the extensometer.

4.2 The verification apparatus shall be calibrated at intervals not to exceed two years.

NOTE 2—He-Ne laser interferometer measurement systems based on the 0.633  $\mu\text{m}$  wavelength line are considered to be primary-based displacement standards and do not require recalibration.<sup>4</sup>

4.3 If the verification apparatus is to be used to verify extensometers used for bidirectional tests, the errors of the verification apparatus should be measured in both directions of travel so as to include any backlash present.

#### 5. Verification Procedure for Extensometer Systems

5.1 *General Requirements*—The verification of an extensometer system should not be done unless the components of the system are in good working condition. Thoroughly inspect all parts associated with smooth operation of the instrument to ensure there are no excessively worn components. Repair or replace parts as necessary. Remove any dirt particles which may have accumulated through normal use of the instrument. Verification of the system shall be performed whenever parts are interchanged or replaced.

5.1.1 The verification of an extensometer system refers to a specific extensometer used with a specific readout device. Unless it can be demonstrated that autographic extensometers and recorders of a given type may be used interchangeably without introducing errors that would affect the classification of the extensometer, the extensometer shall be calibrated with the readout device with which it is to be used.

5.1.2 Prior to the initial verification, the extensometer should be calibrated according to the manufacturer's instructions or established procedures. The calibration procedure may include adjustment of span or determination of calibration factor, or both.

5.2 *Gage Length Measurement Method*—Measure the gage length of self-setting instruments by either the direct or indirect method.

NOTE 3—The following is an example of an indirect method. Set the extensometer to its starting position and mount it on a soft rod of the typical specimen size or diameter. After the extensometer is removed, measure the distance between the marks left by the gage points (or knife edges). If there are four or more gage points, take the average of the individual lengths as the gage length. The differences between individual measurements shall not exceed the tolerance given for the class of extensometer. If there are two gage points (or knife edges), but on opposite sides of the specimen, attach the extensometer twice rotating it 180° with respect to the rod. Take the average of the lengths thus established on each side of the rod as the gage length.

5.2.1 Make two measurements of the gage length. Determine and record the error from each measurement, which is the difference between the measured gage length and the specified gage length, expressed as a percent of the specified gage length.

5.2.2 For extensometer devices that do not have a self-setting gage length during use, such as deflectometers and

<sup>3</sup> A review of some past, current, and possible future methods for calibrating strain measuring devices is given in the paper by Watson, R. B., "Calibration Techniques for Extensometry: Possible Standards of Strain Measurement," *Journal of Testing and Evaluation*, JTEVA, Vol. 21, No. 6, November 1993, pp. 515–521.

<sup>4</sup> A letter from NIST (National Institute of Standards and Technology) is available for reference. Request RR:E 28-1013 from ASTM Headquarters.

some high-temperature tensile or creep extensometers, verification run errors should be calculated using the gage length for which the device is used. Separate classifications should be established for each gage length or range used.

5.2.3 Some extensometers have the capability to measure the gage length set by or chosen by the user. If this measurement is used in the calculation of strain, then it is the inherent measurement accuracy that is the important factor rather than the error between the chosen length and the actual.

NOTE 4—An example of an extensometer that is described by 5.2.3 is an optical extensometer that measures the position of “flags” attached to the test specimen. The flags are positioned at the approximate required gage length and the instrument measures the position of the flags (the actual gage length) before and after the specimen is stressed. Although this kind of device usually has a stated accuracy of gage length, it must be verified by either direct or indirect methods at the appropriate gage lengths.

5.3 *Position of Extensometer*—Carefully position the extensometer on or interface it to the verification device in the same manner as it is normally used for typical specimens. For extensometers that attach directly to the specimen, the verification device should allow attachment to pieces that are similar to the specimen on which the extensometer will be attached.

5.4 *Temperature Control*—Verify the extensometer at approximately the same temperature at which it will be used. Allow sufficient time for the verification device and extensometer to reach satisfactory temperature stability. Maintain temperature stability by excluding drafts throughout the subsequent verification. Record the temperature during each verification run.

NOTE 5—Extensometers used for high-temperature testing may be verified at ambient temperature to insure proper operation, but fixtures should be designed to verify performance at the actual test temperature. This is especially true with optical extensometers which may be adversely affected by air density changes associated with thermal gradients and turbulence, environmental chamber windows, or specimen changes due to the environment. See Appendix X2.

5.5 *Method of Reading*—Read the instrument or, in the case of an autographic extensometer, measure the record in the same manner as during use.

5.5.1 For extensometer with dial micrometers or digital readouts, the readings shall be recorded. Extensometers that use autographic methods shall have their charts read and recorded using a suitable measuring device, such as a vernier or dial caliper. The use of an optical magnifying device is recommended when reading and measuring autographic records.

NOTE 6—When autographic extensometer systems are used, care should be taken to minimize errors introduced by variances in the graph paper. These errors can be due to dimensional changes from reproduction or humidity changes. Direct measurement of the trace soon after it was made eliminates the graph paper errors and is desirable for systems verification.

NOTE 7—If an extensometer is equipped with a dial micrometer, it may be necessary to lightly tap the dial micrometer to minimize the effects of friction and to ensure that the most stable and reproducible readings are obtained. If the dial micrometer is tapped during the verification procedure, include this information in the report.

5.6 *Zero Adjustment*—After temperature stability has been achieved, displace the verification device (with extensometer

in the test position) to a slightly negative value and return to zero. If the reading does not return to zero, adjust and repeat the procedure until the reading does return to zero.

5.7 *Number of Readings*—For any strain range, verify the extensometer system by applying at least five displacement values, not including zero, at least two times, with the difference between any two successive displacement applications being no greater than one-third the difference between the selected maximum and minimum displacements.

5.7.1 Extensometers need not be verified beyond the range over which they will be used. Multi-range (multi-magnification) extensometers shall be verified for each range to be used.

NOTE 8—If the connection between the gage points attached to the specimen and the indicating device is made through geared wheels or micrometer screws, relatively large periodic errors may exist which might not be disclosed by this overall procedure. For such extensometers it may be necessary to take additional readings within one turn of any geared wheel, micrometer screw, or the travel of one tooth of any meshing gear.

5.7.2 When it is desired to establish the range of an extensometer system designed to automatically select or extend ranges below 10 % of full scale without the influence of the operator, the number of readings shall depend on how many overlapping decades are in the range. Extensometer readings should be chosen starting with the minimum reading and are grouped in overlapping decades such that the maximum reading on one decade is the minimum on the next decade. There are to be at least five strain applications per decade, unless the maximum, or the minimum strain on the range is reached before completing the decade. Strain (displacements) in each decade are to be approximately 1:1, 2:1, 4:1, 7:1, and 10:1, starting with the minimum strain in each decade.

5.7.2.1 In no case should the distance between two successive strains (displacements) within a decade differ by more than one-third the difference between the minimum and maximum strains in that decade. Strains in the second successive run are to be approximately the same as those of the first run. Report all percent values of accuracy, and report the indicator resolution at least once per decade.

5.7.3 *Lower Limit Criteria*—as indicated in Table 1, all verified strain readings must have a resolution at least one-half the allowable error, that is, the resolution is a limiting factor to determine a lower limit of the range. The lowest verified strain reading must be at least 100 times the indicator resolution. Extensometer results used below the lowest verified strain reading may not comply with the error limit specified by this standard practice.

NOTE 9—*Example:* For an extensometer with a gage length of 1 in. and 50 % strain, the full scale displacement value is 0.5 in. If the machine (system) resolution is 0.00005 in., which meets the criteria for the B1 class, the lower limit (verification range) would be 0.00005 in.  $\times$  100 = 0.005 in., or 0.5 % strain. The suitable verification points for a single range extensometer system would be in percent strain 0.5, 1.0, 2.0, 3.5, 5, 10, 20, 35, and 50. (See Fig. X1.2 for single range system and Fig. X1.4 for multirange.)

5.8 *Number of Runs*—Take at least two complete sets of extensometer readings for the same changes of length. After the first run, an operation that simulates normal operation should be used to check repeatability. An extensometer that

**TABLE 1 Classification of Extensometer Systems**

Classification <sup>A</sup>	Relative Error of Gage Length (max %) (See 5.2)	Resolution not to Exceed the Greater of:		Error of Strain <sup>B</sup> not to Exceed the Greater of:	
		Fixed Value (in./in. m/m)	% of Reading	Fixed Error (in./in. m/m)	Relative Error (% of strain)
Class A	±0.1	0.00001	0.05	±0.00002	±0.1
Class B-1	±0.25	0.00005	0.25	±0.0001	±0.5
Class B-2	±0.5	0.0001	0.25	±0.0002	±0.5
Class C	±1	0.0005	0.5	±0.001	±1
Class D	±1	0.005	0.5	±0.01	±1
Class E	±1	0.05	0.5	±0.1	±1

<sup>A</sup> Class A classification is very difficult to achieve at short (1 in. (25 mm) or less) gage lengths, so the commercial availability of an extensometer system that meets this requirement may be very limited or nonexistent.

<sup>B</sup> The strain of an Extensometer System is the ratio of applied extension to the gage length.

attaches directly to the specimen should be removed and then reattached to the verification device between runs. An extensometer that does not attach directly to the specimen should be moved away from the verification device (or the device moved away from the extensometer) to simulate the changing of test specimens.

5.8.1 If the initial verification run (the “as found” run) produces satisfactory results which classify an extensometer system according to Table 1 specifications, then the data may be used as run—one of the two required for the verification report.

5.8.2 If the initial verification run produces results which are outside of expectations, for example, Class C instead of B1, and adjustments are necessary, then this first verification run might be reported “as found” data and used in accordance with applicable quality control programs. Calibration adjustments may then be made to the extensometer system after which two required verification runs shall be conducted and reported on the verification report and certificate.

#### 5.9 Direction of Verification Displacement:

5.9.1 *Extensometers Used for Unidirectional Tests*—Extensometers used for unidirectional tests (for example, tension tests) shall be verified by applying displacement in the direction of testing normally used. If start-up backlash is evident, the verification device (with extensometer in place) may be displaced to a slightly negative value and returned to zero before each run.

NOTE 10—This verification procedure does not measure the initial backlash in the extensometer that may appear after it is first attached to the specimen. If the extensometer is used with open or closed loop-type test equipment in load control, the users should disregard readings taken during the initial part of the loading curve. If the extensometer is used with closed loop test equipment in strain control, the backlash could result in large tension or compression loads during the initial part of the loading curve.

5.9.2 *Extensometers Used for Bidirectional Tests*—Extensometers used for bidirectional tests (for example, hysteresis tests, fatigue tests, and so forth) (See Appendix X3) shall be verified by applying both increasing and decreasing values of displacement over the total range of intended use. Displace the verification device (with extensometer in place) to a slightly negative value and return to zero before each run. During each run, displace the extensometer to the maximum

positive value, then to the maximum negative value, and then back to zero, stopping at each verification point along the way in each direction.

5.10 *Determination of Errors*—Calculate the error of the extensometer system for each change in length of the verification apparatus. Errors are based on net values from the zero point to each successive verification point, not on increments between verification points.

## 6. Classification of Extensometer Systems

6.1 Classify extensometer systems in accordance with the requirements as to maximum error of strain indicated by the extensometer system shown in Table 1. The maximum allowable error in each class is the fixed error or the variable error, whichever is greater. The fixed error will establish the maximum allowable error for readings near zero, but the variable error may establish the maximum allowable error for readings near full scale. Two examples of this procedure are presented in Appendix X1. In addition, the gage length error for Type 1 extensometers shall not exceed the greater of the values shown in Table 1.

6.1.1 Type 2 extensometer systems shall be classified using the smallest gage length for which they are used. They may be verified at additional gage lengths if desired.

6.1.2 Type 3 extensometer systems, operating over a range of gage lengths, shall be verified at the minimum and maximum gage lengths used. They may be verified at additional gage lengths if desired.

NOTE 11—For Type 3 systems, precision marked, divided test pieces may be used to establish known gage lengths on the calibration device. Known extensions enable the applied strains to be set. These applied strains are compared with the indicated strains from the Type 3 extensometer systems, in order to establish its classification in accordance with the requirements for resolution and strain error in Table 1.

6.2 Separate classifications may be established for different ranges of multi-range (multiple-magnification) extensometer systems.

## 7. Verification of Multiple Strain Readouts

7.1 When an extensometer is to be used with two or more readout devices (for example, a graphic recorder and a digital readout), steps must be taken to assure that errors are not introduced by interactions (mechanical or electrical) between

the readout devices or between the readouts and the extensometer, and that values from each readout device satisfy appropriate performance criteria. (Different accuracy classifications could be given to the systems using different readout devices.) This can best be accomplished by verifying each system (extensometer and readout device) individually and also in combinations that would be used simultaneously. As an alternative, after individual verifications have been made, the combination can be checked at three points (about 20, 50, and 90 % of full scale range are recommended); and, if values for each system do not differ from the individual verification values by more than 20 % of the class tolerance, the combined system shall be considered to meet the same requirements as the individual systems. If readout devices are always used in combination, individual verifications are not required when the combined system is verified as a unit.

## 8. Verification of Data Acquisition Systems

8.1 Extensometer systems in which strain values are indicated on displays or printouts of data acquisition systems, be they instantaneous, delayed, stored or retransmitted, which are verified in accordance with the provisions of Section 5 and classified in accordance with the provisions of Section 6, shall be deemed to comply with this practice.

## 9. Time Interval Between Verifications

9.1 It is recommended that extensometer systems be verified annually unless more frequent verification is required to comply with product or customer specifications. In no case shall the time interval between verifications exceed 18 months unless an extensometer is being used on a long-time test running beyond the 18-month period. In such cases, the extensometer system shall be verified immediately after completion of the test. (See Note 12.)

9.1.1 An extensometer system shall not be used after an adjustment or repair that could affect its accuracy without first verifying its accuracy utilizing the procedure described in this practice.

NOTE 12—If a test is expected to last more than 18 months, it is recommended that the extensometer system be verified immediately before as well as upon completion of the test.

## 10. Accuracy Assurance Between Verifications

10.1 Some product-testing procedures may require daily, weekly, or monthly spot checks to ascertain that an extensometer, recorder, or display, and so forth, or combinations thereof etc., are capable of producing accurate strain values between the verifications specified in Section 9. Spot checks may be performed on ranges of interest or at strain levels of interest utilizing a verification device that complies with Section 4 for the strain level(s) at which the spot checks are made.

10.2 Check the extensometer gage length (see 5.1).

10.3 Make spot checks of extensometer readings at approximately 10 and 50 % of a range unless otherwise agreed upon or stipulated by the material supplier or user.

10.4 The extensometer gage length and strain measurement errors shall not exceed the allowable errors at the spot check

points for the specified class of extensometer. Should errors be greater than allowable at any of the spot check points, the extensometer system is to be completely verified immediately.

10.5 When spot checks are made, a clear, concise record must be maintained as agreed upon between the supplier and the user. The record shall contain gage length and spot check test data; the name, serial number, verification date, verification agency of the verification device(s) used to make spot checks; the name of person making the spot check; and documentation of the regular verification data and schedule.

10.6 The extensometer system shall be considered verified up to the date of the last successful spot check verification provided that the extensometer system is verified in accordance with Section 5 on a regular schedule in accordance with Section 9. Otherwise, spot checks are not valid.

## 11. Report

11.1 The report shall include the following:

11.1.1 Method of gage length verification used.

11.1.2 Serial numbers and names of the manufacturers of all apparatus used in verifying the extensometer system.

11.1.3 Serial number and name of the manufacturer of the extensometer verified, or if it is an extensometer system composed of separable components, the serial number and manufacturer of each component of the systems verified.

11.1.4 Gage length of the extensometer. For variable gage length extensometers, state the gage lengths verified.

11.1.5 Temperature of the extensometer during verification.

11.1.6 Complete record of the readings of the extensometer and of the verification apparatus.

11.1.7 Calibration factor, if applicable.

11.1.8 Error in gage length for each measurement of gage length.

11.1.9 Error of the extensometer for each extensometer reading and associated resolution for each range (decade).

11.1.10 Class of the extensometer system. If separate classifications are established for various ranges, report the range (or magnification) and strain values associated with each classification.

11.1.11 If the classification applies to bidirectional testing, it shall be so stated. Otherwise, the classification shall be considered to be unidirectional in the direction of normal use (that is, opening for tension testing, closing for compression testing, and so forth).

11.1.12 The name of the person performing the classification and the date it was performed.

11.2 Information to be available upon request shall include the following:

11.2.1 A statement indicating how, by whom, and when the most recent calibration of the apparatus used in verifying the extensometer system was made.

11.2.2 A statement of the errors of the verification apparatus.

11.2.3 Position of the extensometer during verification.

11.2.4 Method of interfacing or attaching the extensometer to the verification device.

**APPENDIXES****(Nonmandatory Information)****X1. EXAMPLE OF PROCEDURE FOR VERIFICATION AND CLASSIFICATION OF EXTENSOMETERS**

X1.1 An example of a verification report for a 1-in., 50 % extensometer used on a single range testing machine is given in Fig. X1.1.

X1.1.1 The first two columns represent actual (applied) strains through calibration apparatus.

X1.1.2 The next two columns represent the extensometer strain readings from the testing instrument (indicated strain).

X1.1.3 The last four columns represent errors in actual strain (in./in. or m/m) as a percent of reading.

X1.2 Fig. X1.2 shows the accuracy specification for a 1-in., 50 % extensometer, with the errors plotted from an actual verification.

X1.3 Fig. X1.3 is an example of a verification report for the same extensometer shown in Fig. X1.1 but used as a multi-range system (100 % and 10 % ranges).

X1.4 The data for a typical autographic extensometer are given in Fig. X1.4.

**EXTENSOMETER VERIFICATION REPORT**  
XYZ Corporation

PERFORMED FOR: ABC CORP.

DATE: 11-04-1998

XYZ FIELD REPRESENTATIVE: JOE CALIBRATION

**EXTENSOMETER**

Model: DEF CORP.  
Serial No.: 11111  
Tens F/S Travel: 0.5000 in (12.7000 mm)  
Gage Length: 1.0000 in (25.4000 mm)

**MACHINE**

Model: DEF CORP.  
Serial No.: 22222  
Indicators: 1  
1-GPIB Interface  
Tens F/S Value: 0.5000 in

TEST TYPE: Unidirectional      TEMPERATURE: 75 F      MACHINE STRAIN CHANNEL: 1

GAGE LENGTH MEASURED (Direct): 1) 0.999 in (25.375 mm), 2) 0.999 in (25.375 mm)  
ERROR IN GAGE LENGTH: -0.001 in (-0.025 mm) -----> 0.10%

**MACHINE INDICATOR 1: GPIB Interface**

**100% RANGE**

ACTUAL STRAIN (%)		EXTENSOMETER STRAIN (%)		FIXED ERROR in/in (mm/mm)		RELATIVE ERROR (% OF ACT STRAIN)	
RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
+0.000	+0.000	+0.000	+0.000	+0.00000	+0.00000		
+0.506	+0.506	+0.500	+0.510	-0.00006	+0.00004	-1.186	+0.790
+1.007	+1.006	+1.010	+1.015	+0.00003	+0.00009	+0.298	+0.895
+2.009	+2.010	+2.015	+2.015	+0.00006	+0.00005	+0.299	+0.249
+3.513	+3.512	+3.525	+3.520	+0.00012	+0.00008	+0.342	+0.228
+5.015	+5.016	+5.035	+5.030	+0.00020	+0.00014	+0.399	+0.279
+10.026	+10.030	+10.050	+10.055	+0.00024	+0.00025	+0.239	+0.249
+20.041	+20.043	+20.090	+20.095	+0.00049	+0.00052	+0.244	+0.259
+35.060	+35.056	+35.105	+35.110	+0.00045	+0.00054	+0.128	+0.154
+50.073	+50.075	+50.155	+50.165	+0.00082	+0.00090	+0.164	+0.180

CALIBRATION FACTOR (Converts Machine Output to Strain Value): 1.001001

RESOLUTION: .00005 in

CLASS OF EXTENSOMETER SYSTEM: B-1

VERIFICATION METHOD: Micrometer in extensometer Calibration Frame.

**VERIFICATION APPARATUS:**

Micrometer - Make/Model: BRAND X DIGITAL MICROMETER  
Serial No.: 33333  
Calibration Due: 01-01-1997

\*\*\*\*\* VERIFICATION PERFORMED PER ASTM STANDARD PRACTICE E83-98 \*\*\*\*\*

XYZ CORPORATION FURTHER CERTIFIES THAT ITS CALIBRATION APPARATUS IS  
TRACEABLE TO NIST STANDARDS.

SIGNATURE OF XYZ FIELD REPRESENTATIVE \_\_\_\_\_

FIG. X1.1 Extensometer Verification Report

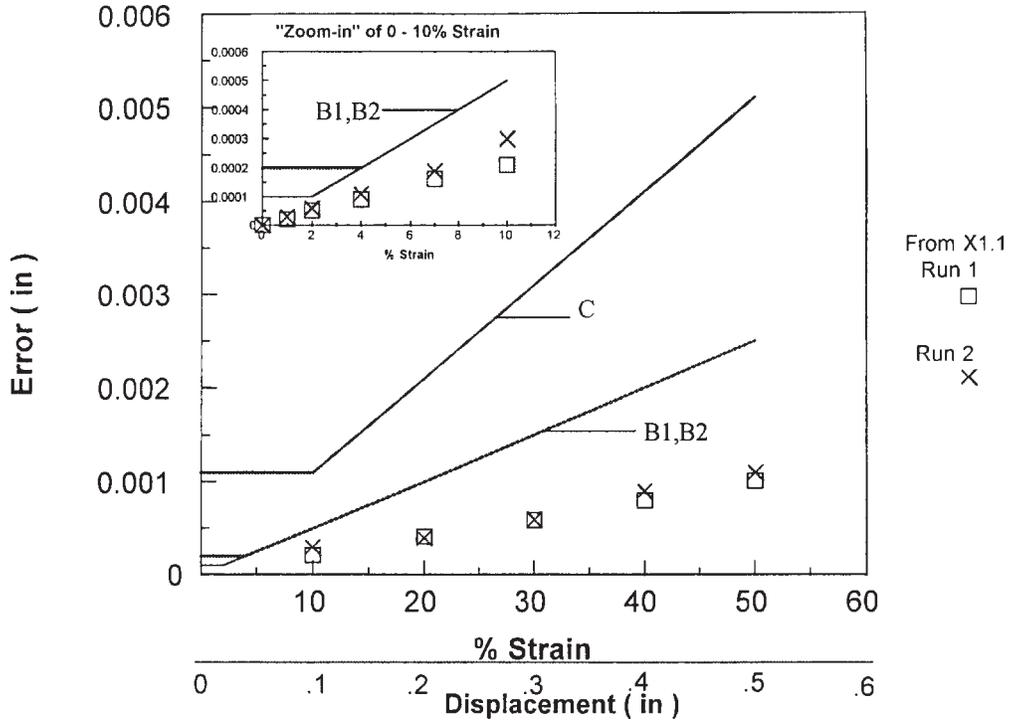


FIG. X1.2 Accuracy Specification for 1 in. 50 % Extensometer

**EXTENSOMETER VERIFICATION REPORT FOR A MULTIRANGE SYSTEM**  
**XYZ Corporation**

PERFORMED FOR: ABC CORP.

DATE: 11-04-1998

XYZ FIELD REPRESENTATIVE: JOE CALIBRATION

**EXTENSOMETER**

Model: DEF CORP.  
 Serial No.: 11111  
 Tens F/S Travel: 0.5000 in (12.7000 mm)  
 Gage Length: 1.0000 in (25.4000 mm)

**MACHINE**

Model: DEF CORP.  
 Serial No.: 22222  
 Indicators: 1  
 1-GPIB Interface  
 Tens F/S Value: 0.5000 in

TEST TYPE: Unidirectional      TEMPERATURE: 75 F      MACHINE STRAIN CHANNEL: 1

GAGE LENGTH MEASURED (Direct): 1) 0.999 in (25.375 mm), 2) 0.999 in (25.375 mm)  
 ERROR IN GAGE LENGTH: -0.001 in (-0.025 mm) -----> 0.10%

**MACHINE INDICATOR 1: GPIB Interface**

**100% RANGE**

ACTUAL STRAIN (%)		EXTENSOMETER STRAIN (%)		FIXED ERROR in/in (mm/mm)		RELATIVE ERROR (% OF ACT STRAIN)	
RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
+0.000	+0.000	+0.000	+0.000	+0.00000	+0.00000		
+5.008	+5.010	+5.020	+5.025	+0.00012	+0.00015	+0.239	+0.299
+10.020	+10.022	+10.030	+10.035	+0.00010	+0.00013	+0.100	+0.130
+20.034	+20.035	+20.010	+20.000	+0.00024	+0.00035	-0.120	-0.175
+35.055	+35.056	+35.105	+35.100	+0.00050	+0.00044	+0.142	+0.125
+50.076	+50.075	+50.110	+50.115	+0.00034	+0.00040	+0.068	+0.080

CALIBRATION FACTOR (Converts Machine Output to Strain Value): 1.001001  
 RESOLUTION: .00005 in      CLASS OF EXTENSOMETER SYSTEM: B-1

**10% RANGE**

ACTUAL STRAIN (%)		EXTENSOMETER STRAIN (%)		FIXED ERROR in/in (mm/mm)		RELATIVE ERROR (% OF ACT STRAIN)	
RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2	RUN 1	RUN 2
+0.000	+0.000	+0.000	+0.000	+0.00000	+0.00000		
+0.503	+0.504	+0.505	+0.505	+0.00002	+0.00001	+0.398	+0.198
+1.004	+1.004	+1.008	+1.009	+0.00004	+0.00005	+0.398	+0.498
+2.007	+2.006	+2.015	+2.016	+0.00008	+0.00010	+0.399	+0.499
+3.511	+3.513	+3.528	+3.529	+0.00017	+0.00016	+0.484	+0.455
+5.015	+5.014	+5.039	+5.037	+0.00024	+0.00023	+0.479	+0.459

CALIBRATION FACTOR (Converts Machine Output to Strain Value): 1.001001  
 RESOLUTION: .00005 in      CLASS OF EXTENSOMETER SYSTEM: B-1

VERIFICATION METHOD: Micrometer in extensometer Calibration Frame.

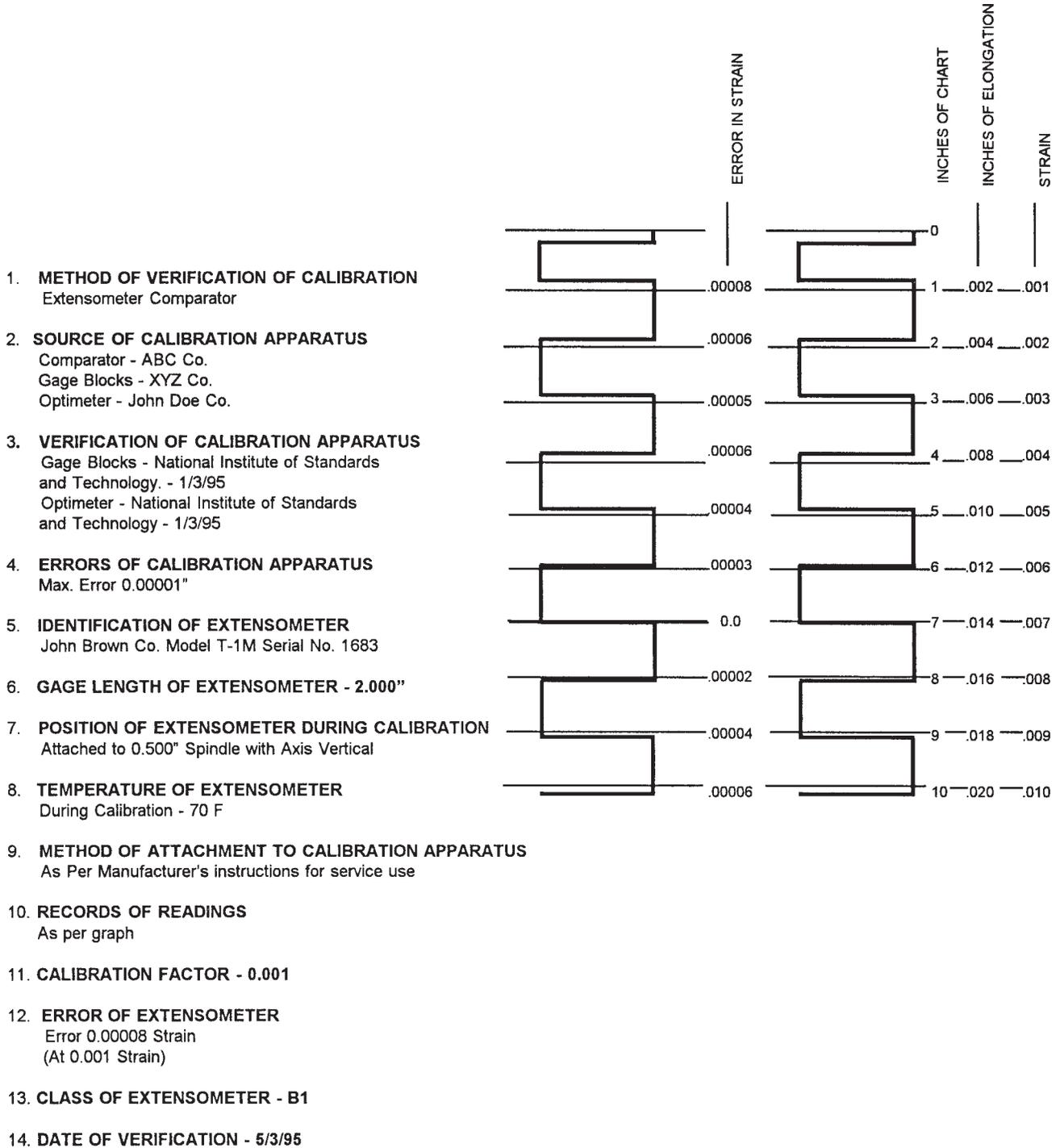
**VERIFICATION APPARATUS:**

Micrometer - Make/Model: BRAND X DIGITAL MICROMETER  
 Serial No.: 33333  
 Calibration Due: 01-01-1997

\*\*\*\*\* VERIFICATION PERFORMED PER ASTM STANDARD PRACTICE E83-98 \*\*\*\*\*

XYZ CORPORATION FURTHER CERTIFIES THAT ITS CALIBRATION APPARATUS IS  
 TRACEABLE TO NIST STANDARDS.

SIGNATURE OF XYZ FIELD REPRESENTATIVE \_\_\_\_\_



NOTE 1—Error in strain is calculated by measuring the error in chart length and multiplying by the calibration factor.  
**FIG. X1.4 Typical Record and Report for Extensometers Verified on Autographic Recorders**

**X2. TEMPERATURE EFFECTS ON EXTENSOMETER CLASSIFICATION**

X2.1 Using an extensometer on a test specimen at a temperature other than the temperature at which the verification was performed can cause errors in the strain reading. The source of these errors varies with the type of extensometer being used. It may be due to a shift in the null point of the device, a change in span, or an error in the gage length. See Fig. X2.1.

X2.2 Some common typical sources of error are as follows:

*X2.2.1 Clip-On Type Extensometers:*

X2.2.1.1 Dimensional changes due to thermal effects giving rise to errors in zero, span, and gage length,

X2.2.1.2 Sensitivity changes as a function of temperature of the transducer being used (that is, strain gages, capacitive devices, LVDTs, etc.) giving span errors,

X2.2.1.3 Shifts in the null point of the transducer being used as a function of temperature,

X2.2.1.4 Sensitivity changes as a function of dielectric changes of the environment, and

X2.2.1.5 Sensitivity changes as a function of modulus change in extensometer arms or element.

*X2.2.2 Non-Contact Type Extensometers:*

X2.2.2.1 Refraction effects due to windows, temperature gradients, or turbulence can cause errors in some type extensometers (for example, scanning beams measuring distance between flags),

X2.2.2.2 Loss of transparency in windows can reduce accuracy,

X2.2.2.3 Changes in speed of light, if not corrected, will cause errors in some laser techniques,

X2.2.2.4 Changes in the surface of the specimen due to oxidation, frosting, corrosion, and so forth, will cause problems with some techniques, and

X2.2.2.5 Radiation emitted by high-temperature specimens or heaters may affect the performance of various optical extensometers.

X2.3 Since there are a wide variety of new extensometry instruments based on new technology, it is impossible to predict or correct, or both, for all possible sources of error when using these methods at high or low temperatures. The only prudent approach is to perform a Practice E 83 type of verification within the environment to be used. It is recommended that the same environmental chamber (furnace or cryostat) be used for the verification that is being used for the material test. This will insure similar thermal and optical conditions exist and, hence, similar effects on the strain measurement should be observed.

X2.4 Examples of methods that could be employed for verification are as follows (also see Test Methods E 21, paragraph 5.4.1).

X2.4.1 *Environmental Effects on Span*—The schematic below shows a clip-on extensometer in an environmental chamber mounted on a split specimen attached to a micrometer head. Although it may be difficult to establish effects on zero (null point) or gage length accuracy, this setup can be used to measure any changes to the span of the device.

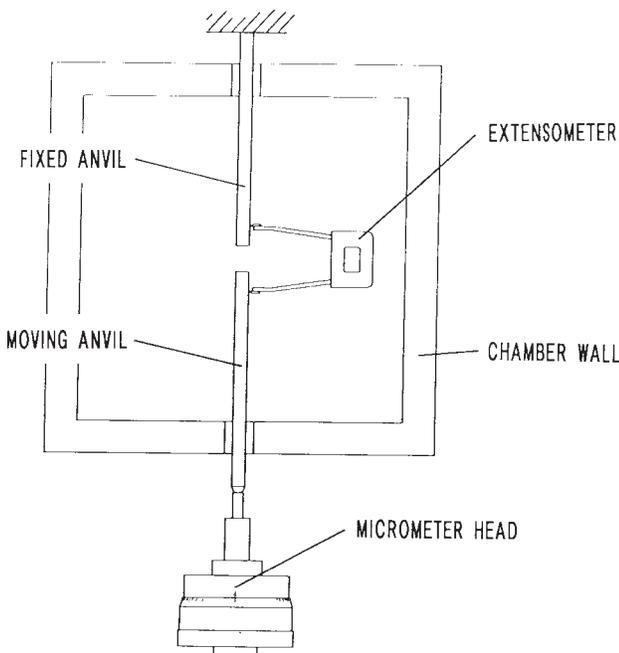
X2.4.2 *Effects on the Null Point*—A material of zero or known expansion coefficients can be used to measure the effects of temperature on the null or zero of the extensometer. The device is either mounted on or focused toward (for optical non-contact extensometers) the “dummy” specimen. The known effects of temperature (in the absence of stress) on the material’s dimension can be compared against the measured effect from the extensometer to give a measurement of the change in zero.

*X2.4.3 Effects on Gage Length Accuracy:*

X2.4.3.1 This quantity is more difficult to determine since common methods (as described in this practice) for determining accuracy of gage length are difficult to apply at high or low temperatures.

X2.4.3.2 For example, if an extensometer is “clipped” on a specimen that was immersed in a cryogenic liquid, the accuracy of the gage length setting could be determined at room temperature by conventional methods. The actual low-temperature gage length would be different since the material would change in length according to its coefficient of expansion characteristics. If these are known and the temperature is known, then the low-temperature gage length can be calculated.

X2.4.3.3 If the null and span characteristics of the extensometer are known, then the change in output of the extensometer (attached to the specimen) as the temperature is lowered



**FIG. X2.1 Schematic of Test Set-Up**

will give a direct reading of the thermal characteristics of the material and this output can be used to determine the new gage length.

X2.5 Another possible approach for non-contact type systems is the use of reference specimens. Some of these extensometers measure the distance between “flags” on the specimen at zero load as the gage length. The accuracy of the gage length is dependent on the accuracy of the instrument and does not rely on precise placement of the flags. A possible method to verify this at high temperature is the use of a precision reference specimen with known gage length (placement of marks or flags) and known thermal mechanical properties. This specimen is then placed in the environmental chamber, and the environmental and optical conditions to be

used in the test can be reproduced. The gage length can be calculated from the known properties of the reference specimen and compared with the measurement.

X2.6 This appendix is not intended to be a detailed test procedure for verification of the classification of extensometers as a function of all environments. It should be used as a guide to make the user aware of possible errors in strain that result from environmental effects. Manufacturers of extensometers should provide performance characteristics of their instruments under typical operating test conditions. Although this information is seldom adequate to allow the user to ignore errors due to their specific test conditions, it can be used as a starting point for further analysis.

### X3. FREQUENCY EFFECTS ON THE CLASSIFICATION OF EXTENSOMETERS

X3.1 The usable bandwidth of extensometers is a function of both mechanical and electrical characteristics. It is naive to perform a static verification as described in Practice E 83 and run dynamic (cyclic) testing and assume that the classification remains unchanged. In general, both the amplitude and phase of the instrument may change as a function of frequency effects. Some examples follow.

X3.1.1 *Mechanical Effects*—If the specimen extensometer system approaches a resonance, there will be shifts in the phase between the input and the resulting strain as well as errors in the amplitude reading. The error in strain amplitude approaching a resonance will be positive, will peak at the resonance (for underdamped systems) and will become a negative error beyond the resonant point. This effect depends not only on the resonant frequency but the Q of the resonance. Extensometers that contain large mechanical elements may have inertial effects which at high frequencies cause forces on the attachment points to the specimen. These forces can lead to slipping of the extensometer which will give errors in strain.

X3.1.2 *Electronic Effects*—Most extensometer systems include electronics which have bandwidths determined by the detail of the design. These should be specified by the manufacturer. They result from the following characteristics:

X3.1.2.1 Response of the readout device. For example, if a chart recorder or XY plotter were being used, then the pen response might be the limiting factor; or if a digital readout device is used, they are often filtered to avoid digit instability. This filter will have a roll-off frequency, which may be the limiting factor of the bandwidth.

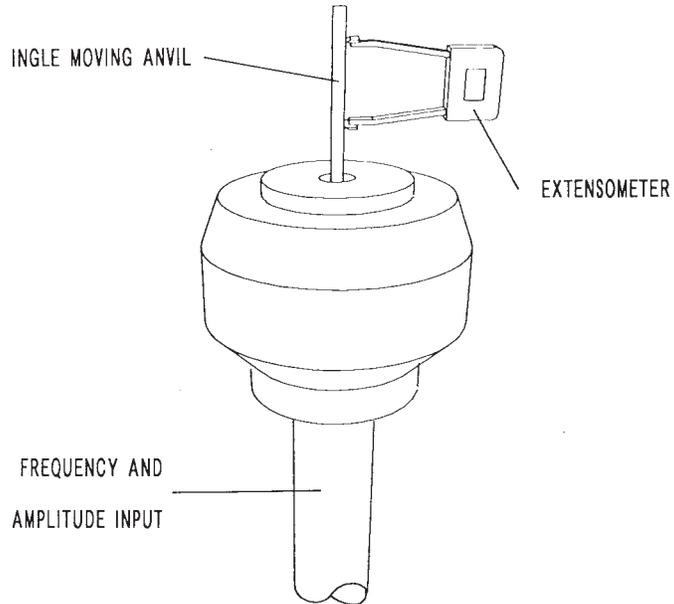
X3.1.2.2 For digital instruments the digital sampling rate will affect the bandwidth. Aliasing can also be a factor in digital systems.

X3.1.2.3 On the opposite end of the spectrum long-term drift characteristics must be considered for extensometers to be used in long-term creep testing.

#### X3.2 *Qualitative Test of Dynamic Performance:*

X3.2.1 There are a number of methods that can be used to check the dynamic performance of an extensometer. These methods, if carefully implemented, would give quantitative information on the dynamic effects on the accuracy of the extensometer. This appendix is not intended to provide specific procedures for a dynamic calibration of an extensometer. An extensometer of known dynamic properties can be used in parallel with the device in question, and a comparison of the results can be made as a function of frequency. A strain-gaged specimen can be used as a reference, or a specimen with known properties could be used to verify the extensometer results.

X3.2.2 It is recommended, however, that as an absolute minimum the test illustrated in Fig. X3.1 be used to check the extensometer over the frequency range of interest. The test conditions (frequency and amplitude) should be applied to the extensometer attached to a single anvil as shown. Ideally, this test should result in zero output over the performance range of interest. Any output under these test conditions will likely cause deviations in the accuracy of the extensometer system as determined by the static verification described in Practice E 83.



**FIG. X3.1 Extensometer on a Single Moving Anvil**

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*



# Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation E 251; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

## INTRODUCTION

The Organization of International Legal Metrology is a treaty organization with approximately 75 member nations. In 1984, OIML issued International Recommendation No. 62, 'Performance Characteristics of Metallic Resistance Strain Gages.' Test Methods E 251 has been modified and expanded to be the United States of America's compliant test specification. Throughout this standard the terms "strain gage" and "gage" are to be understood to represent the longer, but more accurate, "metallic bonded resistance strain gages."

### 1. Scope

1.1 The purpose of this standard is to provide uniform test methods for the determination of strain gage performance characteristics. Suggested testing equipment designs are included.

1.2 Test Methods E 251 describes methods and procedures for determining five strain gage parameters:

	Section
Part I—General Requirements	7
Part II—Resistance at a Reference Temperature	8
Part III—Gage Factor at a Reference Temperature	9
Part IV—Temperature Coefficient of Gage Factor	10
Part V—Transverse Sensitivity	11
Part VI—Thermal Output	12

1.3 Strain gages are very sensitive devices with essentially infinite resolution. Their response to strain, however, is low and great care must be exercised in their use. The performance characteristics identified by these test methods must be known to an acceptable accuracy to obtain meaningful results in field applications.

1.3.1 Strain gage resistance is used to balance instrumentation circuits and to provide a reference value for measurements since all data are related to a change in the gage resistance from a known reference value.

1.3.2 Gage factor is the transfer function of a strain gage. It relates resistance change in the gage and strain to which it is

subjected. Accuracy of strain gage data can be no better than the precision of the gage factor.

1.3.3 Changes in gage factor as temperature varies also affect accuracy although to a much lesser degree since variations are usually small.

1.3.4 Transverse sensitivity is a measure of the strain gage's response to strains perpendicular to its measurement axis. Although transverse sensitivity is usually much less than 10 % of the gage factor, large errors can occur if the value is not known with reasonable precision.

1.3.5 Thermal output is the response of a strain gage to temperature changes. Thermal output is an additive (not multiplicative) error. Therefore, it can often be much larger than the gage output from structural loading. To correct for these effects, thermal output must be determined from gages bonded to specimens of the same material on which the tests are to run; often to the test structure itself.

1.4 Bonded resistance strain gages differ from extensometers in that they measure average unit elongation ( $\Delta L/L$ ) over a nominal gage length rather than total elongation between definite gage points. Practice E 83 is not applicable to these gages.

1.5 These test methods do not apply to transducers, such as load cells and extensometers, that use bonded resistance strain gages as sensing elements.

1.6 Strain gages are part of a complex system that includes structure, adhesive, gage, leadwires, instrumentation, and (often) environmental protection. As a result, many things affect the performance of strain gages, including user technique. A

<sup>1</sup> These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee E28 on Mechanical Testing and are the direct responsibility of Subcommittee E28.14 on Strain Gages.

Current edition approved June 10, 2003. Published January 2004. Originally approved in 1964. Last previous edition approved in 1998 as E 251 – 86 (1998).

further complication is that strain gages once installed normally cannot be reinstalled in another location. Therefore, gage characteristics can be stated only on a statistical basis.

1.7 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

1.8 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

## 2. Referenced Documents

### 2.1 ASTM Standards:

E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers<sup>2</sup>

E 228 Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials with a Vitreous Silica Dilatometer<sup>3</sup>

E 289 Test Method for Linear Thermal Expansion of Rigid Solids with Interferometry<sup>3</sup>

E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages<sup>2</sup>

2.2 OIML International Recommendation No. 62: Performance Characteristics of Metallic Resistance Strain Gages

## 3. Terminology

### 3.1 Definitions of Terms Specific to This Standard:

3.1.1 The vocabulary included herein has been chosen so that specialized terms in the strain gage field will be clearly defined. A typical strain gage nomenclature is provided in Appendix X1.

3.1.1.1 *batch*—a group of strain gages of the same type and lot, manufactured as a set (made at the same time and under the same conditions).

3.1.1.2 *calibration apparatus*—equipment for determining a characteristic of a bonded resistance strain gage by accurately producing the necessary strains, temperatures, and other conditions; and, by accurately measuring the resulting change of gage resistance.

3.1.1.3 *error-strain gage*—the value obtained by subtracting the actual value of the strain, determined from the calibration apparatus, from the indicated value of the strain given by the strain gage output. Errors attributable to measuring systems are excluded.

3.1.1.4 *gage factor*—the ratio between the unit change in strain gage resistance due to strain and the causing strain. The gage factor is dimensionless and is expressed as follows:

$$K = \frac{R - R_o}{R_o} \frac{L - L_o}{L_o} = \frac{\Delta R}{R_o} / \epsilon \quad (1)$$

where:

$K$  = the gage factor,

$R$  = the strain gage resistance at test strain,

$R_o$  = the strain gage resistance at zero or reference strain,

$L$  = the test structure length under the strain gage at test strain,

$L_o$  = the test structure length under the strain gage at zero or reference strain,

$\Delta R$  = the change in strain gage resistance when strain is changed from zero (or reference strain to test strain),

$\epsilon$  = the mechanical strain  $(L - L_o) / L_o$ .

3.1.1.5 *gage length* (see Fig. 1)—the length of the strain sensitive section of a strain gage in the measurement axis direction. An approximation of this length is the distance between the inside of the strain gage end loops. Since the true gage length is not known, gage length may be measured by other geometries (such as the outside of the end loops) providing that the deviation is defined.

3.1.1.6 *grid* (see Fig. 1)—that portion of the strain-sensing material of the strain gage that is primarily responsible for resistance change due to strain.

3.1.1.7 *lot*—a group of strain gages with grid elements from a common melt, subjected to the same mechanical and thermal processes during manufacturing.

3.1.1.8 *matrix* (see Fig. 1)—an electrically nonconductive layer of material used to support a strain gage grid. The two main functions of a matrix are to act as an aid for bonding the strain gage to a structure and as an electrically insulating layer in cases where the structure is electrically conductive.

3.1.1.9 *measurement axis (grid)* (see Fig. 1)—that axis that is parallel with the grid lines.

3.1.1.10 *strain gage, metallic, resistive, bonded* (see Fig. 1)—a resistive element, with or without a matrix that is attached to a solid body by cementing, welding, or other suitable techniques so that the resistance of the element will vary as the surface to which it is attached is deformed. These test methods apply to gages where the instantaneous gage resistance,  $R$ , is given by the equation:

$$R = R_o(1 + \epsilon K) \quad (2)$$

where:

$R_o$  = element resistance at reference strain and temperature levels (frequently initial test or balanced circuit conditions),

$\epsilon$  = linear strain of the surface in the direction of the strain-sensitive axis of the gage, and

$K$  = a proportionality factor (see gage factor).

3.1.1.11 *strain, linear*—the unit elongation induced in a specimen either by a stress field (mechanical strain) or by a temperature change (thermal expansion).

3.1.1.12 *temperature coefficient of gage factor*—the ratio of the unit variation of gage factor to the temperature variation, expressed as follows:

$$\left( \frac{K_{T_1} - K_{T_0}}{K_{T_0}} \right) \cdot \left( \frac{1}{T_1 - T_0} \right) \quad (3)$$

where:

$T_1$  = the test temperature,

$T_0$  = the reference temperature,

$K_{T_1}$  = the gage factor at test temperature, and

$K_{T_0}$  = the gage factor at reference temperature.

<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.

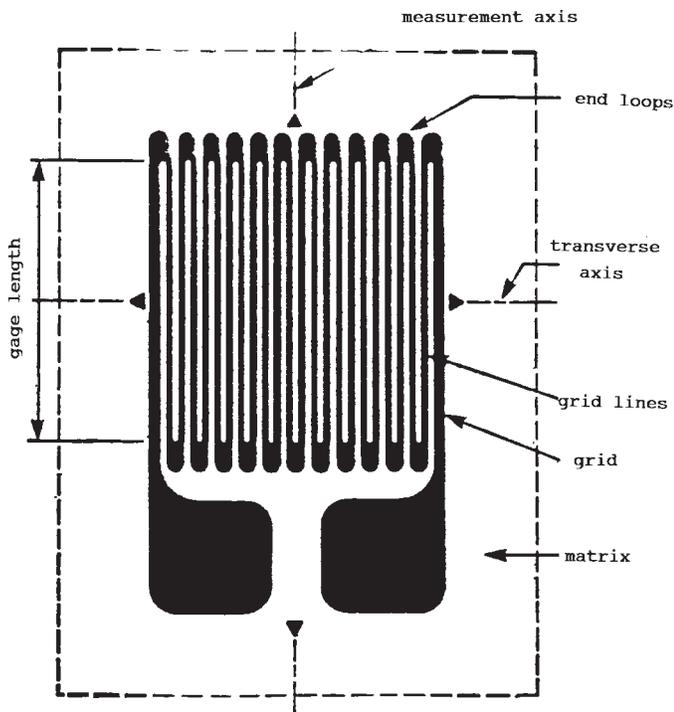


FIG. 1 Typical Strain Gage

3.1.1.13 *thermal expansion*—the dimensional change of an unconstrained specimen subject to a change in temperature that is uniform throughout the material.

3.1.1.14 *thermal output*—the reversible part of the temperature induced indicated strain of a strain gage installed on an unrestrained test specimen when exposed to a change in temperature.

3.1.1.15 *transverse axis* (see Fig. 1)—the strain gage axis at 90° to the measurement axis.

3.1.1.16 *transverse sensitivity*—the ratio, expressed as a percentage, of the unit change of resistance of a strain gage mounted perpendicular to a uniaxial strain field (transverse gage) to the unit resistance change of a similar gage mounted parallel to the same strain field (longitudinal gage).

3.1.1.17 *type*—a group of strain gages that are nominally identical with respect to physical and manufacturing characteristics.

#### 4. Significance and Use

4.1 Strain gages are the most widely used devices for the determination of materials, properties and for analyzing stresses in structures. However, performance parameters of strain gages are affected by both the materials from which they are made and their geometric design. These test methods detail the minimum information that must accompany strain gages if they are to be used with acceptable accuracy of measurement.

4.2 Most performance parameters of strain gages require mechanical testing that is destructive. Since test gages cannot be used again, it is necessary to treat data statistically and then apply values to the remaining population from the same lot or batch. Failure to acknowledge the resulting uncertainties can have serious repercussions. Resistance measurement is non-destructive and can be made for each gage.

4.3 Properly designed and manufactured strain gages, whose properties have been accurately determined and with appropriate uncertainties applied, represent powerful measurement tools. They can determine small dimensional changes in structures with excellent accuracy, far beyond that of other known devices. It is important to recognize, however, that individual strain gages cannot be calibrated. If calibration and traceability to a standard are required, strain gages should not be employed.

4.4 To be used, strain gages must be bonded to a structure. Good results depend heavily on the materials used to clean the bonding surface, to bond the gage, and to provide a protective coating. Skill of the installer is another major factor in success. Finally, instrumentation systems must be carefully designed to assure that they do not unduly degrade the performance of the gages. In many cases, it is impossible to achieve this goal. If so, allowance must be made when considering accuracy of data. Test conditions can, in some instances, be so severe that error signals from strain gage systems far exceed those from the structural deformations to be measured. Great care must be exercised in documenting magnitudes of error signals so that realistic values can be placed on associated uncertainties.

#### 5. Interferences

5.1 In order to assure that strain gage test data are within a defined accuracy, the gages must be properly bonded and protected with acceptable materials. It is normally simple to ascertain that strain gages are not performing properly. The most common symptom is instability with time or temperature change. If strain gages do not return to their zero reading when the original conditions are repeated, or there is low or changing resistance to ground, the installation is suspect. Aids in strain gage installation and verification thereof can be found in Guide E 1237.

#### 6. Hazards

6.1 In the specimen surface cleaning, gage bonding, and protection steps of strain gage installation, hazardous chemicals may be used. Users of these test methods are responsible for contacting manufacturers of these chemicals for applicable Material Safety Data Sheets and to adhere to the required precautions.

#### 7. Test Requirements

##### 7.1 General Environmental Requirements:

7.1.1 *Ambient Conditions at Room Temperature*—The nominal temperature and relative humidity shall be 23°C (73°F) and 50 %, respectively. In no case shall the temperature be less than 18°C (64°F) nor greater than 25°C (77°F) and the relative humidity less than 35 % nor more than 60 %. The fluctuations during any room temperature test of any gage shall not exceed  $\pm 2^\circ\text{C}$  and  $\pm 5\%$  RH.

7.1.2 *Ambient Conditions at Elevated and Lower Temperatures*—The temperature adjustment error shall not exceed  $\pm 2^\circ\text{C}$  ( $\pm 3.6^\circ\text{F}$ ) or  $\pm 2\%$  of the deviation from room temperature, whichever is greater. The total uncertainty of temperature shall not exceed  $\pm 2^\circ\text{C}$  ( $\pm 3.6^\circ\text{F}$ ), or  $\pm 1\%$  of the deviation from room temperature, whichever is greater. At

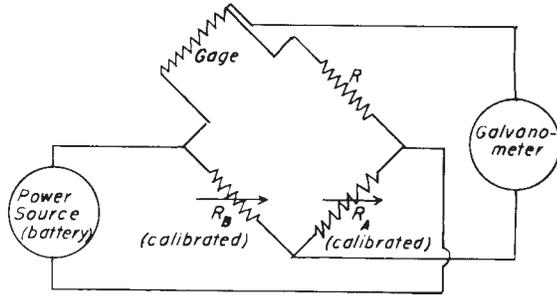


FIG. 2 Wheatstone-Bridge Circuit

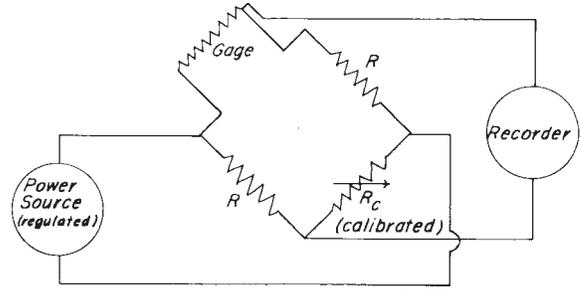


FIG. 3 Unbalanced-Bridge Circuit

elevated temperatures the mixing ratio shall be constant, that means independent of temperature, at a nominal value of 0.009 g of water per 1 g of air at a pressure of 1 bar. This value corresponds to a relative humidity of 50 % at 23°C (73°F).

NOTE 1—This mixing ratio, independent of temperature, can be realized by a furnace that is well connected to an atmosphere meeting the conditions of 7.1.1.

7.2 Test Measurement Requirements:

7.2.1 Several methods are available for measuring the change of gage resistance with sufficient resolution and accuracy. In general, any of these methods that are convenient may be used after it has been shown that the particular combination of instruments or components used produce a system with the required accuracy.

7.2.2 Examples of potentially satisfactory methods are as follows:

7.2.2.1 *Balanced Bridge Circuit*—In this circuit, a change in gage resistance is matched by an equal unit resistance change in a calibrated arm of the bridge circuit so as to produce a balanced condition with zero electrical output. This circuit is not sensitive to excitation voltage changes except for self-heating effects. A sensitive null detector (galvanometer) is required to obtain adequate resolution. Direct-current excitation is usually, but not necessarily, used. Thermal emfs generated within the circuit and reactive changes in the circuit may cause errors. This circuit is shown in Fig. 2.

7.2.2.2 *Unbalanced Bridge Circuit*—This circuit is similar to the Wheatstone bridge except that the bridge components are not adjusted after a nearly balanced initial condition is obtained. The output voltage of an unbalanced bridge circuit in which one arm is varying,  $E_o$ , is given by the equation:

$$E_o = E_i[\Delta R / (4R_o + 2\Delta R)] \quad (4)$$

where:

- $E_i$  = input voltage,
- $R_o$  = resistance required for initial bridge balance, and
- $\Delta R$  = difference between the instantaneous resistance and  $R_o$ .

This circuit is readily adaptable to automatic recording of data. Either ac or dc excitation may be used, but errors due to thermal emfs and reactive changes are possible. Loading effects due to the impedance of the recording instruments may be significant and must be considered. To avoid the necessity of accurate absolute measurement of the input and output voltages, the readout (recording) system may be calibrated in terms of unit resistance change of a bridge arm by use of a calibrating

resistor that can be varied so that the total arm resistance changes in accurately known steps. This resistor should be in the opposite arm of the bridge circuit from the gage. This circuit is shown in Fig. 3.

7.2.2.3 Several types of instruments are available for obtaining strain data directly from a resistance strain gage. These instruments use various types of excitation and read-out systems. Such indicators may be used only after their resolution, accuracy, and stability have been verified by connecting a resistor that can be varied in accurately known increments in place of the gage and calibrating the strain indicator over the entire range for which it will be used. The calibrating resistor steps shall be accurate to 0.1 % of the resistance change or 2 ppm of the total resistance, whichever is greater. The effects of the following factors should be determined: thermal emf's within the bridge circuit and within the leads to the gage; reactive changes within the bridge and lead circuits; initial bridge unbalance; and, battery conditions or power line fluctuations.

7.3 Strain Gage Attachment:

7.3.1 The attachment conditions shall correspond exactly to the instructions published by the gage manufacturer.

8. Test Method for Determining Strain Gage Resistance at Ambient Conditions

8.1 The standard 23°C (73°F) temperature resistance of each unbonded strain gage shall be measured and stated. Alternatively, strain gages may be combined in sets (4, 5, or 10, for example) from the same batch that have close resistance values. All gages combined in sets shall fall within the stated nominal resistance value and uncertainty from all sources.

8.2 The unpackaged strain gages selected for testing should be stored under the ambient conditions described in 7.1.1 for at least 72 h before and during resistance measurement.

8.3 The uncertainty of the strain gage resistance measurement shall be less than  $\pm 0.1$  %. Repeated measurements shall have a range no greater than  $\pm 0.04$  % of the measured value. The influence of the measuring current on the strain gage shall not be greater than  $\pm 0.1$  % of the resistance value.

8.4 For the resistance measurement no particular mechanical requirements are necessary. However, if the influence of the flatness of the strain gage on the resistance measurement exceeds  $\pm 0.1$  % of the actual value, the gage must be held in contact with a substantially flat surface using a suitable pressing device. Care must be exercised to assure that the probes used to contact the tabs of gages without leads do not damage foil areas.

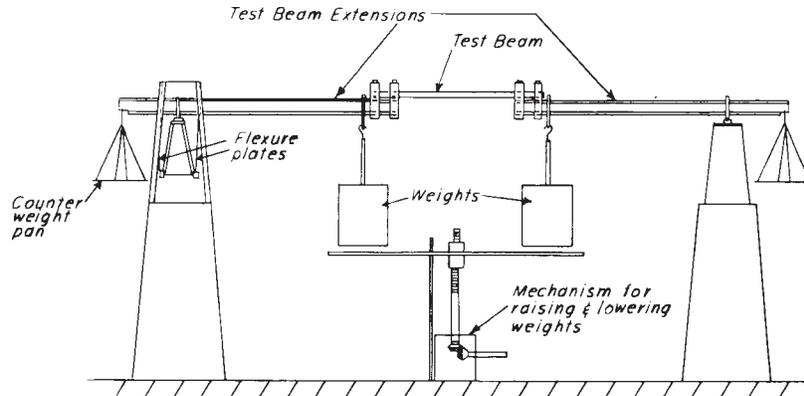


FIG. 4 Constant Bending-Moment Beam Method for Gage-Factor Determination

### 9. Test Methods for Determining the Gage Factor of Resistance Strain Gages at a Reference Temperature

9.1 These test methods describe procedures for the determination of the gage factor of bonded resistance strain gages. It is suggested that gage factor values be obtained for at least five gage installations of one type.

9.2 For gage factor determination, the uncertainty of the relative resistance change measurement shall not exceed  $\pm 2$   $\mu\text{ohm}/\text{ohm}$  or  $\pm 0.1\%$  of the actual value, whichever is greater. Any of the test methods described in Section 7 may be used. In addition, special circuits designed to compare the gages being tested to a calibrated reference gage may be used if it is shown that equal accuracy is obtained.

9.3 Determination of the gage factor  $K$  requires mechanical equipment consisting of a test specimen and a loading device capable of producing a uniform uniaxial stress in the test specimen corresponding to nominal mean principal strain values of  $0, \pm 1000$  and  $\pm 1100$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). The Poisson's ratio of the test specimen shall be  $0.28 \pm 0.01$  or suitable corrections must be made. The mean principal strain shall be within  $\pm 50$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) of the nominal value. The strain at the various gage stations shall differ by no more than  $\pm 0.5\%$  of the mean value and the strain within a gage station shall vary by no more than  $\pm 0.5\%$  of the nominal value. The uncertainty of the mean strain measurement shall be less than  $\pm 2$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) or  $\pm 0.2\%$  of the actual value, whichever is greater. Any test apparatus that meets these criteria may be used for determination of gage factor.

9.4 To the extent possible, test specimens with attached strain gages for tests of the gage factor should be stored under the ambient conditions described in 7.1.1 for at least 72 h before being tested.

9.5 For the determination of the gage factor, the strain gages under test should be prestrained three times with strain cycles similar to the ones used for the measurement, but with maximum strain levels about 10% higher. That means that the loading cycle should nominally be:

$$\begin{aligned}
 &0, + 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), \\
 &+ 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), \\
 &+ 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), \\
 &0, + 1000 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0, - 1000 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0. \quad (5)
 \end{aligned}$$

If possible, one half of the sample (group of gages to be tested) should be strained this way and the other half of the

sample should be subjected to strains of the same magnitude but opposite sign. The gage factor is determined from the slope of the straight line between the measurement points at  $+ 1000$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) and  $- 1000$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). Although less desirable, it is permissible to use the strain cycles of:

$$\begin{aligned}
 &0, + 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0, + 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), \\
 &0, + 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0, + 1000 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0 \quad (6)
 \end{aligned}$$

for one half of the sample and strain cycles of:

$$\begin{aligned}
 &0, - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0, - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), \\
 &0, - 1100 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0, - 1000 \mu\text{m}/\text{m} (\mu\text{in.}/\text{in.}), 0 \quad (7)
 \end{aligned}$$

for the other half of the sample.

The gage factor is determined from the average of the slopes, of the straight lines between the measurement points at  $0$  and  $+ 1000$   $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) and  $0$  and  $- 1000$   $\mu\text{m}/\text{m}$ , ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ).

9.6 As a guide, three separate test methods are described, the choice of the test method used being determined by the particular application and by the facilities that are available. These test methods do not classify strain gages according to accuracy or other performance characteristics. The three test methods that are described differ primarily in the manner of producing an accurately known surface strain, and they are thereby classified. These test methods are described in the following sections:

#### 9.6.1 Constant Bending Moment Beam Test Method:

9.6.1.1 *Summary of Test Method*—This test method utilizes a strain on the surface of a test bar produced by loading it as a constant moment beam by the application of dead-weight loads.

9.6.1.2 *Mechanical System*—A typical mechanical system is shown in Fig. 4. The test beam may be of any suitable material that meets the requirements of 9.3, and shall have minimum dimensions of 19 by 25 by 760 mm (0.75 by 1 by 30 in.). The minimum distance between the pivot points on the supports shall be 2.45 m (96 in.). The beam assembly shall be symmetrical about a vertical line through its midpoint. The positions of the pivots and the weight values shall be adjusted to provide the required strains. The strain over the usable section of the beam shall vary by not more than 1% of the strain at the reference point. The usable portion of the beam shall be at least one half of the exposed length.

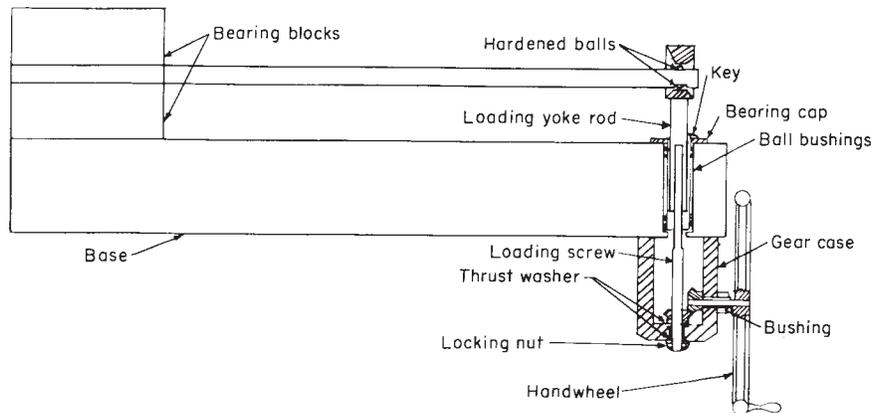


FIG. 5 Constant-Stress Cantilever Beam Method for Gage-Factor Determination

9.6.1.3 *Verification*—The need for measuring calibration strain directly during each test is eliminated by maintaining a calibration of the system. Such a calibration is made by measuring with a Class A extensometer (see Practice E 83) the actual strain produced on the surface of the beam when it is loaded. Measurements shall be made with the extensometer centered over each station of the beam. At least three measurements shall be made at each station to verify the strain distribution over the width of the beam. The dimensions of the beam shall be checked at each station periodically. A change of 0.2 % in the thickness at any station shall disqualify that station. Other dimensional changes that would cause a change of surface strain of 0.2 % shall disqualify the beam. The strain at the reference station shall be determined each time the beam is used either with a Class A extensometer, or with a carefully selected, permanently mounted resistance strain gage that has been calibrated by spanning with a Class A extensometer. The response of this reference gage shall be verified periodically to assure compliance with specifications using a Class A extensometer. The beam shall be completely recalibrated after 50 applications or 6 months, whichever comes last.

9.6.1.4 *Procedures*—Mount test gages with any appropriate installation technique that will not change the characteristics of the test beam (for example, excessive cure temperatures could be damaging). Mount the gages at the stations on the beam where the strain level has been determined by the calibration procedure outlined in 9.6.1.3.

9.6.1.5 Install the test specimen bearing previously unstrained gages in the loading system and test environment. After temperature equilibrium has been attained, follow the loading sequence of 9.5. Take readings from the strain gages before applying the load, with the load applied, and after the load is removed for each loading cycle. Obtain compression loads by mounting the beam with the gaged surface up. Obtain tension loads by mounting the beam with the gaged surface down.

9.6.1.6 Calculate the gage factors.

9.6.2 *Constant Stress Cantilever Beam Test Method:*

9.6.2.1 *Summary of Test Method*—This test method produces strain on the surface of a cantilever beam that is designed to have a constant stress over the major portion of its length when loaded in the prescribed manner.

9.6.2.2 *Mechanical System*—A typical mechanical system is shown in Fig. 5 and detailed design of a beam that has been used satisfactorily is shown in Fig. 6 (Note 2). The size and arrangement of the equipment must be such that the beam may be bent sufficiently in either direction to produce a surface strain of at least 1100  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). Two or more carefully selected strain gages, for use as reference standards, shall be permanently bonded to the constant-stress section of the beam as shown in Fig. 6. Great care must be taken to install these gages, using the best current techniques to ensure bonding integrity and long-time stability. These reference gages shall be individually calibrated to determine their gage factor by placing a Class A extensometer (Practice E 83) so as to span the gage, bending the beam by means of the deflecting apparatus, and measuring the resulting change in gage resistance and strain. Readings shall be taken for the strain cycles stipulated in 9.5 and the gage factor computed (Note 3 and Note 4).

NOTE 2—In order for the beam to fulfill the requirements of a constant-stress beam, the drive rod must be attached to the beam at the apex of the angle formed by the sides of the beam. The ratio of the free length of the beam to width at the base should not be less than 9.1.

NOTE 3—For the reference gage, the gage factor for compression strains may differ from the gage factor for tension strains and it must be determined for both directions of loading.

NOTE 4—It may be convenient to obtain strain of the beam surface as a function of the deflection of the end of the beam as measured by a dial gage while the strain gages are being calibrated.

9.6.2.3 *Verification of Beam*—The constant-stress area of the beam shall be explored with a Class A extensometer to determine the area where the strain is the same as that experienced by the reference gages. The gage length of the extensometer shall not exceed 25 mm (1 in.). Only areas of the beam where differences between the strains indicated by the extensometer and the reference gage do not exceed 10  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) at a strain of 1000  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) are acceptable for testing gages. The beam shall be verified after each 50 uses or 6 months, whichever comes last.

9.6.2.4 *Procedure*—Install the gages to be tested on the beam in the areas that have been found to be satisfactory; connect them to instruments for measuring their change of resistance. The active axes of the gages shall be parallel to the

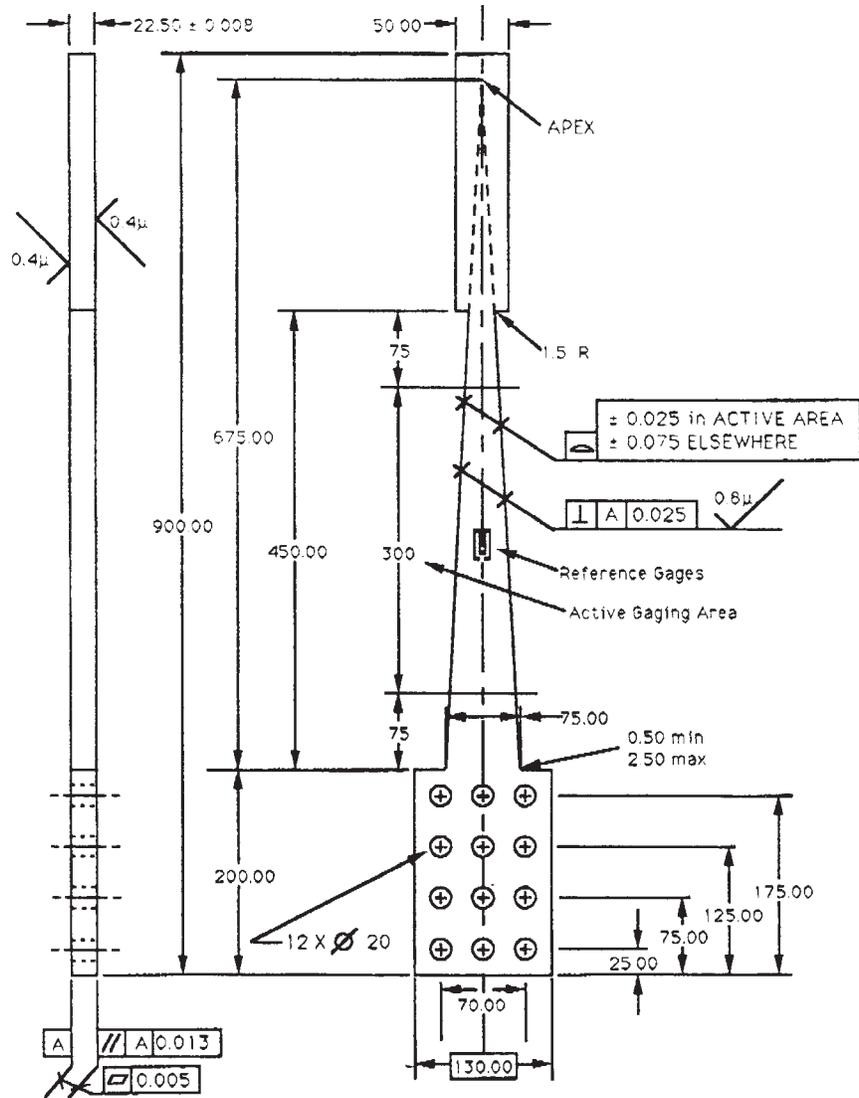


FIG. 6 Constant Stress Cantilever Beam

center line of the beam. A selector switch may be used to connect several gages into the measuring circuits if it is shown that repeated switchings do not change indicated strain readings by more than  $2 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ).

9.6.2.5 Follow the loading schedule of 9.5 and calculate gage factors.

9.6.3 Direct Tension or Compression Test Method:

9.6.3.1 Summary of Test Method—This test method produces strain in a test bar by applying direct tensile or compressive loads to the bar.

9.6.3.2 Mechanical System—A typical mechanical system is shown in Fig. 7. In this system the test bar is strained directly in tension or compression by a testing machine or other device capable of applying an axial load to the specimen. The horizontal position of the bar is convenient for mounting the reference extensometer, but it is not necessary. The load may be applied by hydraulic, mechanical, or other means, but care must be taken to prevent any twisting or bending of the bar. Twisting in the mechanical system of Fig. 7 is prevented by the torque arm. Fig. 8 shows a test bar that has been used

successfully for both tension and compression loading. The strain gage under test shall be mounted at the center of the reduced section; and a Class A extensometer shall be mounted so as to span the gage. The extensometer should have a gage length as near that of the gage as possible in order to minimize the effect of nonuniform strain along the length of the bar.

9.6.3.3 Verification—Since the calibration strain is measured during each test, no calibration of the system is necessary. The thickness and width of the test bar must be uniform within  $\pm 0.25\%$  of their average values over a length extending 13 mm (0.5 in) beyond the extensometer gage points in each direction. The absence of twisting and bending of the test bar must be verified.

9.6.3.4 Procedure—Mount a test gage by any appropriate technique so that the center of its sensitive portion coincides with the center line of the bar. Mount the bar in the loading device taking care to avoid bending or loading of the bar. Connect the gage electrically to the resistance-measuring circuit, and mount the reference extensometer so as to span the gage. Follow the loading cycle in 9.5 (plus or minus strains

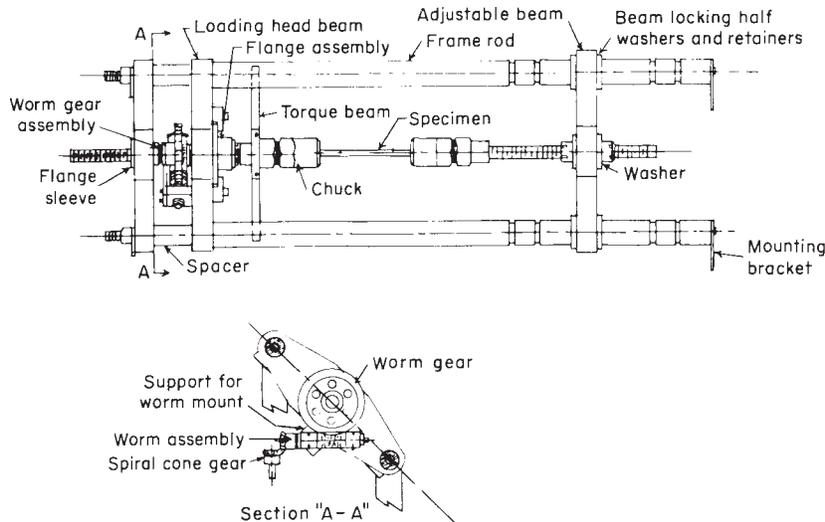


FIG. 7 Testing Machine for Gage-Factor Measurements

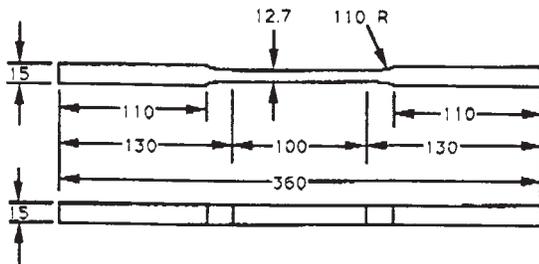


FIG. 8 Test Bar for Gage Factor Test

only) except that preload, not exceeding 5 % of the maximum load, may be applied to align the bar in the machine, to remove backlash, etc. Take readings simultaneously from the electrical circuit and the extensometer. Calculate gage factors. Repeat for strains in the opposite direction.

### 10. Test Methods for Determining the Temperature Coefficient of Gage Factor of Resistance Strain Gages

10.1 These test methods describe procedures for the determination of temperature coefficient of gage factors of bonded resistance strain gages.

10.2 For temperature coefficient of gage factor determination, the uncertainty of the relative resistance change measurement shall not exceed  $\pm 5 \mu\text{ohm}/\text{ohm}$  or  $\pm 0.1 \%$  of the actual value, whichever is greater.

10.3 If convenient, strain gages may be tested in tension/compression half bridges (one gage in tension, the other in compression) by mounting two gages opposite each other and connecting them in a half bridge. This practice helps to eliminate errors from drift and leadwires. If gages are tested individually, a three-lead wiring arrangement is used (see Fig. 2 and Fig. 3).

10.4 To determine the temperature coefficient of gage factor, it is necessary to have equipment consisting of a test specimen, a loading device, and a furnace for producing the temperatures needed. It must be possible to adjust the strain in the specimen to mean values of 0 and  $+ 1000 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). It is desirable that a strain of  $- 1000 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) may be produced.

Instead of the reference strain of zero, a small prestrain of between 20 and  $100 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) may be used. The adjustment error shall be no more than  $\pm 50 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). The uncertainty of the mean strain should be less than  $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). The strain at the various gage stations shall differ by no more than  $\pm 2 \%$  of the actual strain and the strain within a gage station shall vary by no more than  $\pm 2 \%$  of the nominal value.

10.5 Two test methods for determining the temperature coefficient of gage factor of bonded resistance strain gages are given, a static method and a dynamic method. The choice of test method will be determined by the temperature range, ultimate user needs, and the number of tests to be conducted. The two test methods differ in the manner in which the strain is produced, one test method making use of measurements made under static strain and static temperature conditions, and the other test method making use of measurements made under dynamic strain and transient temperature conditions.

#### 10.5.1 Static Test Method:

10.5.1.1 *Summary of Test Method*—This test method<sup>4</sup> utilizes a constant-stress cantilever beam that is forcibly deflected in a series of fixed, accumulative steps that can be accurately repeated at various temperatures of interest.

10.5.1.2 Typical equipment used to produce the strain and a typical test beam are shown in Fig. 9. The beam is designed to have a considerable area of uniform stress that is directly proportional to the deflection of the end point (the apex of the angle formed by the sides of the beam) of the beam. The frame is designed to hold the base of the beam rigidly and provide a base for the sliding-stepped block. The rider on the beam is attached at the apex of the angle formed by the beam sides. The frame must be much more rigid than the beam to prevent errors due to bending of the frame. The stepped block can provide several deflection steps, as shown in Fig. 9. However, it is sufficient that the maximum deflection produces a surface

<sup>4</sup> This test method is based on apparatus and techniques proposed by McClintock, R.M., "Strain Gage Calibration Device for Extreme Temperatures," *Review of Scientific Instruments*, Vol 30, No. 8, 1959, p. 715.

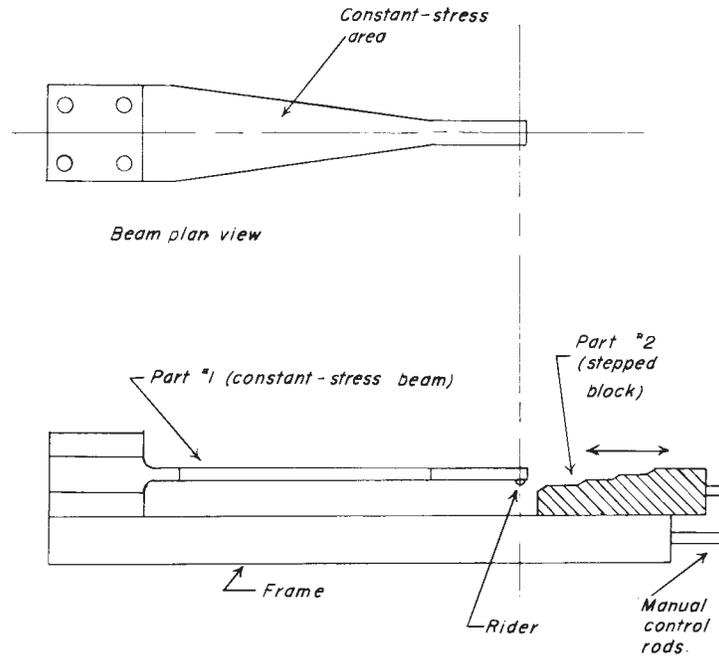


FIG. 9 Apparatus for Static Determination of Gage-Factor Variation Versus Temperature

strain on the beam of  $1000 \pm 50 \mu\text{m/m}$  ( $\mu\text{in./in.}$ ). The stepped surfaces must be parallel to each other and to the opposite sliding surface of the block. The apparatus must be designed so the beam end is deflected about 2 % of its total planned deflection when the rider is in contact with the lowest step of the sliding block. This is to ensure that contact is always maintained between the beam and the rider. To avoid differential expansion problems, all parts of the test rig, and the specimen, should be made from the same material, selected to assert proper operation over the entire temperature span to be encountered.

10.5.1.3 A furnace or cryostat capable of producing the desired temperature conditions is required but not shown.

10.5.1.4 Mount the gage or gages to be tested on the beam so they are symmetrically centered on the constant-stress area and aligned with the longitudinal center line of the beam. Mount temperature sensors as near the gage(s) as practicable and at each end of the constant-stress area. Mount the beam in the frame, and connect the gages electrically to the read-out instruments.

10.5.1.5 With the loading apparatus in the furnace or cryostat and the gage connected to its read-out instrumentation, allow the beam to come to temperature equilibrium at the reference temperature (usually room temperature). With the rider resting on the lowest step of the block, take a measurement of the gage output. Then move the sliding block so as to increase the beam deflection and take gage output readings at each step. Again take readings as the deflection is decreased in steps. Repeat this procedure to obtain three sets of readings. Take the gage output due to strain for each step as the average of the differences from the value at the lowest step for all loading cycles.

10.5.1.6 Bring the temperature of the test fixture and beam to each of the preselected temperatures of interest and repeat the procedure. Take care to ensure that the temperature has

stabilized. Make tests at a minimum of five nearly equally spaced temperatures over the temperature range of interest, compute the temperature coefficient of gage factor (see section 3.12).

#### 10.5.2 Dynamic Test Method:

10.5.2.1 *Summary of Test Method*—This test method depends upon the output voltage from a bridge circuit composed of stable resistors and one or more resistance strain gages:

$$E_0 \approx E_1 K(N/4)\epsilon \quad (8)$$

where:

- $E_0$  = output voltage from bridge circuit,
- $E_1$  = input voltage to bridge circuit,
- $K$  = gage factor of the gages,
- $\epsilon$  = strain to which the gages are subjected, and
- $N$  = number of active gages.

If such a bridge circuit is connected to a constant d-c voltage source and the gages are subjected to a sinusoidal strain of constant amplitude, the change in the alternating output voltage will be a measure of the change of gage factor.

10.5.2.2 This test method requires a means of vibrating a constant-stress cantilever beam at a constant amplitude; varying the temperature of the beam at a nearly uniform rate; and measuring the output voltage, or change of output voltage, of the bridge circuit as a function of temperature. These operations must be done simultaneously.

10.5.2.3 The beam vibration may be conveniently produced by a motor-driven cam or by an electromechanical vibrator. If the vibrator is used, a method of maintaining the amplitude of vibration constant is required. Monitoring the vibration amplitude by means of a velocity sensing pick-up may not be satisfactory because of changes in the vibration frequency.

10.5.2.4 The temperature environment is conveniently produced by radiant heaters of the tungsten filament quartz tube type. Power may be supplied to these heaters by a temperature

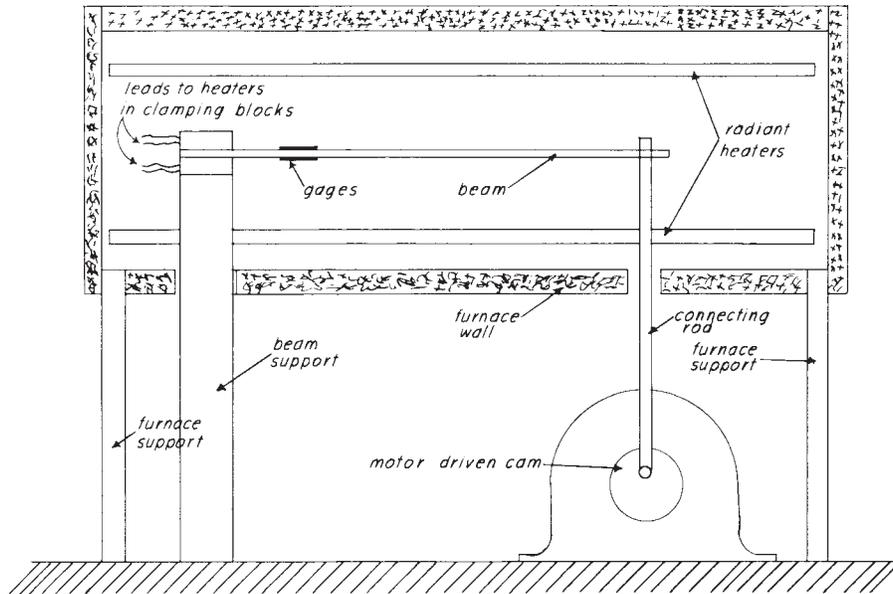


FIG. 10 Dynamic Apparatus for Determining Variation of Gage Factor

programming unit or by manual control with an autotransformer. In order to maintain a nearly uniform temperature over the length of the beam, supplemental heat must be supplied to the clamped end of the beam. This may be done by resistance-wire heating elements built into the clamping fixture.

10.5.2.5 Equipment for producing the vibratory motion, by means of a cam, and temperature environment is shown in Fig. 10. The control units for the heating elements are not shown. Care must be taken in the design of the apparatus to prevent changes in the rigidity of the beam support and clamping with time or temperature. The design of the beam is shown in Fig. 11.

10.5.2.6 Measuring the ac output of the strain gage circuit and obtaining changes by taking differences of measured values will not usually be satisfactory because of the small differences of large values involved. However, the change of ac voltage may be measured directly by use of circuits such as those shown in Fig. 12 and Fig. 13. The input circuit, Fig. 12, provides a selected constant voltage of 4 to 12 V to the gage circuit, and also provides means for varying this input voltage over a range of  $\pm 10\%$  of the nominal value in known steps. After the ac output voltage from the gage circuit has been amplified to about 5 V and filtered to remove all signals except that of the vibration frequency, it becomes the input signal to the output circuit, Fig. 13. The signal is rectified, filtered to remove ripple, and suppressed by a bucking voltage from a stable dc voltage source. The difference between the rectified signal and the suppressing voltage is recorded as a function of test-beam temperature. The dc voltage input to the gage circuit must be constant during the test.

10.5.2.7 Mount two resistance strain gages on opposite sides of the constant-stress cantilever beam as shown in Fig. 11. Clamp the wide end of the beam firmly to the rigid mount, and connect the narrow end to equipment for producing sinusoidal deflections of constant amplitude. Make the connection to this equipment at the apex of the angle made by the sides of the main portion of the beam. Connect the gages as

adjacent arms of a bridge circuit, the other arms being stable resistors of approximately the same resistance as the gages and chosen so that the bridge circuit is nearly balanced when the beam is in a neutral position. With the input terminals of the bridge circuit connected to a constant-voltage source, vibrate the beam to produce a strain of about  $\pm 500 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). Adjust the suppressing voltage to give zero output to the recorder. Obtain the recorder sensitivity in terms of change of gage-circuit output voltage by varying the input voltage to the gage circuit in known steps. The change of output voltage due to a change in input voltage is the same as would be caused by the same percentage change of gage factor, the strain amplitude remaining constant.

10.5.2.8 After the recorder sensitivity has been determined, return the input voltage to its nominal value, and increase the temperature of the beam at a uniform rate to the maximum desired temperature. During this time record the difference between the rectified gage circuit output and the suppressing voltage as a function of the test beam temperature. Obtain the temperature from a temperature sensor mounted as near the gage installation as practicable. A heating rate of  $10^\circ\text{C}$  ( $20^\circ\text{F}$ )/min has been used satisfactorily. During the test keep the temperature gradient over the area of the beam near the gages small. Measure this temperature gradient by the difference between two temperature sensors, one mounted near the clamping fixture and the other mounted an equal distance the other side of the gage installation. The temperature difference between these points should not exceed  $3^\circ\text{C}$  ( $5^\circ\text{F}$ ) or 1% of the beam temperature. The power to the heaters in the clamping fixture can be adjusted to minimize this temperature difference. Calculate the temperature coefficient of gage factor.

10.5.2.9 Since both the length and thickness of the beam change with temperature, the recorded output should be corrected for the resulting change in strain. Applying this correction gives:

$$\text{Gage factor change, \%} = \Delta E_0 / (1t\alpha_b t) \quad (9)$$

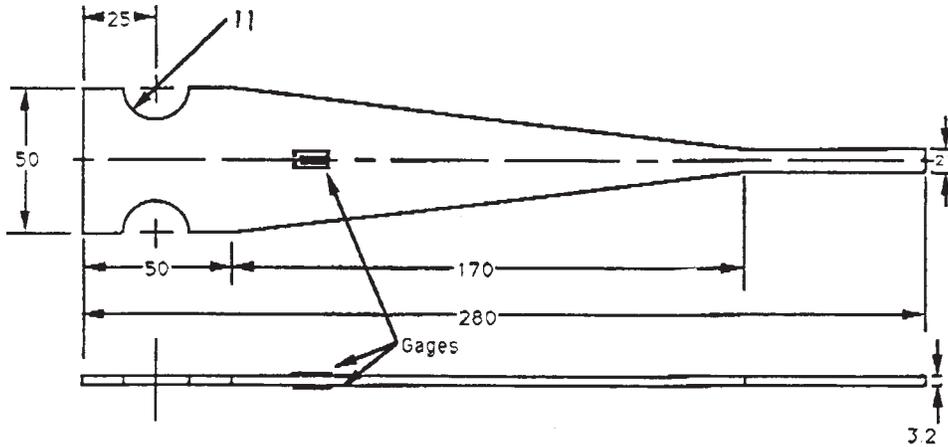


FIG. 11 Beam Used for Gage Factor Variation Test

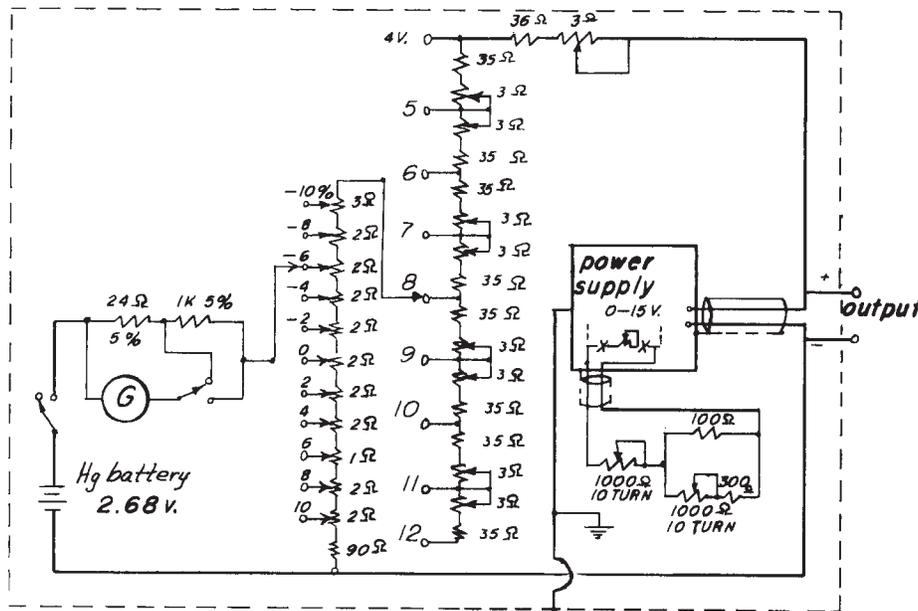


FIG. 12 Input Circuit—Gage-Factor Variation

where:

- $\Delta E_0$  = recorded change in gage circuit output, percent,
- $\alpha_b$  = coefficient of linear expansion of the beam material.  
(See Test Methods E 228 and E 289 for methods of determining  $\alpha_b$ ), and
- $\Delta t$  = difference between the instantaneous beam temperature and the initial temperature.

### 11. Test Method for Determining the Transverse Sensitivity of Resistance Strain Gages at a Reference Temperature

11.1 Strain gage transverse sensitivity results in an undesired signal induced by strains along directions other than the one to be measured. In two-dimensional stress analysis the errors resulting from transverse sensitivity will depend upon

the stress distribution in gaged areas, and for accurate results, strain-gage readings should be corrected for this effect.

11.2 For transverse sensitivity determination, the uncertainty of the relative resistance change measurements shall not exceed  $\pm 5 \mu\text{ohm}/\text{ohm}$  or  $\pm 0.1\%$  of the actual value, whichever is greater.

11.3 To determine the transverse sensitivity; mechanical equipment is required for producing uniform uniaxial strains of 0, 1000, and 1100  $\mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) in the longitudinal direction of the specimen. The adjustment error shall be less than  $\pm 50 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ). The strain at the various gage stations shall differ by no more than  $\pm 2\%$  of the actual strain in the longitudinal direction of the specimen and no more than  $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) in the transverse direction. The uncertainty of the strain shall be no more than  $\pm 10 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\mu\text{in.}/\text{in.}$ ) in the



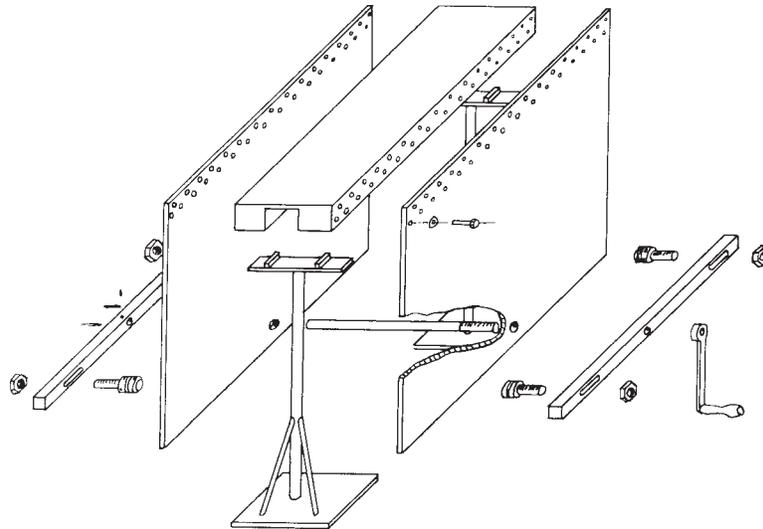


FIG. 14 Transverse-Sensitivity Test Rig

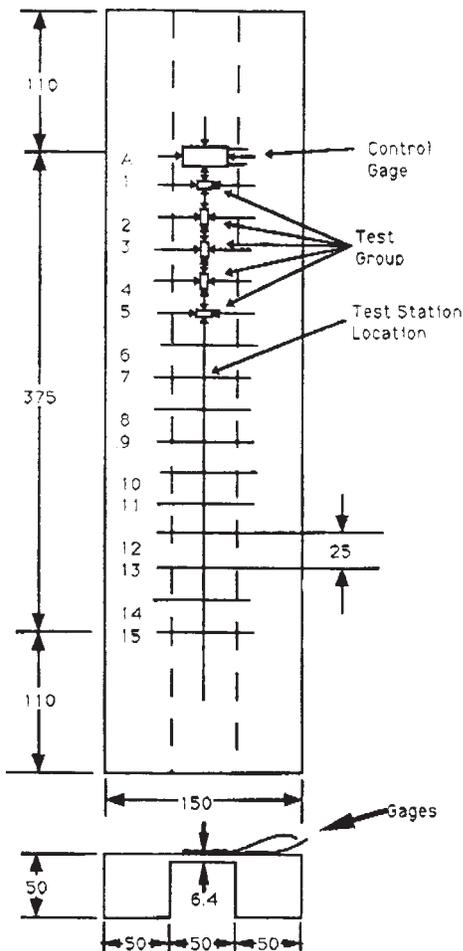


FIG. 15 Testing Stations and Gage Arrangement for Transverse Sensitivity Test

12.1.2 The values of 12.1.1.2 and 12.1.1.3 can be obtained from 12.1.1.1. The test method described is primarily useful when a temperature range greater than 50°C (90°F) is involved. This test method requires heating uniformly a small test strip with a strain gage installed upon it while the unit change of gage resistance is recorded as a function of test strip temperature. It depends upon the test strip being able to expand freely with temperature changes; upon the test strip not being distorted or otherwise affected by external loads, residual stresses, etc; upon the temperature of the test strip being uniform at any given time; and upon changes of resistance of the gage due to other factors being insignificant during the test.

12.2 For thermal output determination, the uncertainty of the relative resistance change measurements shall not exceed  $\pm 5 \mu\text{ohm}/\text{ohm}$  or  $\pm 0.1\%$  of the actual value, whichever is greater.

12.3 For determination of the thermal output (1.3.5), a test specimen is required. It must be properly heat-treated and free of residual stresses. Its dimensions, especially the thickness, must be sufficient to prevent any distortion and thermal hysteresis greater than  $\pm 5 \mu\text{m}/\text{m}$  ( $\pm 0.1 \mu\text{in.}/\text{in.}$ ) for any temperature difference of 100°C (180°F). This applies to the whole temperature range for which the thermal output has to be determined. If this temperature range is less than 100°C (180°F), the requirements applied should be those for a minimum of 100°C (180°F). The thermal expansion of the specimen must be known over the full temperature range with an uncertainty of less than  $\pm 0.2 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$  ( $\pm 0.1 \mu\text{in.}/\text{in.}/^\circ\text{F}$ ). If necessary, the thermal expansion must be determined using a dilatometer and the specimen itself or a test piece manufactured from the test specimen material.

NOTE 6—A test strip 25 by 150 by 1.3 mm (1 by 6 by 0.050 in.) has been used. The test strip may be of any suitable material.

12.4 Apparatus:

12.4.1 *Electrical Measurements*—The unit change of gage resistance is conveniently recorded as a function of temperature by the circuit shown in Fig. 3. The output voltage from the bridge circuit is recorded on the y-axis of a sensitive X-Y

12.1.1.2 The unit change of gage resistance between two given temperatures, a chord function, and

12.1.1.3 The slope of a tangent to the unit change of resistance-versus-temperature curve at a given temperature.

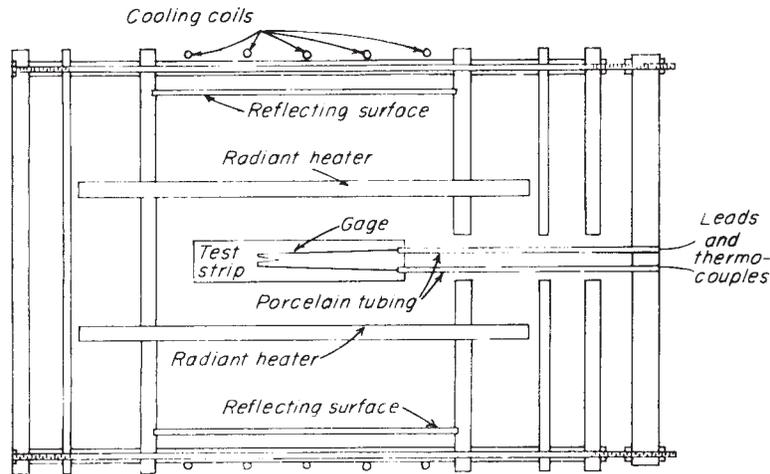


FIG. 16 Apparatus for Determining Temperature Sensitivity

recorder, the x-axis of which records the temperature indicated by a thermocouple mounted on the test strip as near the gage as possible.

12.4.2 *Thermal System*—A system that has been used to produce satisfactory thermal environments at temperatures up to 800°C (1475°C) is shown in Fig. 16. The heating elements are eight tungsten filament quartz tube radiant-heat lamps rated at 1000W each. The test strip is supported at the center of the heater configuration by porcelain tubes that also serve to carry electrical leads and thermocouples to the gaged area. Air from the cooling coils surrounding the reflecting cylinder prevents the reflecting surface from overheating during a test series.

12.5 *Procedure:*

12.5.1 Install the strain gage at the center of the test strip using manufacturer recommended installation procedures. Attach the test strip to its holder and mount in the furnace. Connect the leads from the gage and thermocouples to the measuring circuit and recorder. Calibrate the recorder by varying the calibrating resistor in at least five nearly equal increments that cover the expected gage resistance change and noting the recorder response at each step. With the bridge circuit again balanced, supply power to the heaters.

12.5.2 For the determination of the thermal output, the test specimens with the attached strain gages should be heated to the upper end of the temperature range. As the temperature decreases, in steps or continuously but eventually with sufficient heat balance and without perceptible oxidation, the strain indication versus temperature is measured. At least five measurements should be taken over the temperature range:

12.5.2.1 Between 0 and 100°C (32 and 212°F), at temperature intervals of about 20°C (35°F) with a maximum of 30°C (55°F) (roughly 5 measurements per 100°C (180°F)),

12.5.2.2 Above 100°C (212°F) and below 0°C (32°F), at temperature intervals of about 25°C (45°F) with a maximum of 40°C (75°F) (at least 5 measurements per 200°C (350°F)). More measurements should be made if the thermal output changes rapidly.

12.5.3 The test specimen material shall be particularly specified; the linear coefficient of expansion and the nonlinear part of the thermal expansion must be known. If the strain

gages are of the self-compensated type, the thermal coefficient of expansion for which the strain gages are compensated shall be specified.

13. Report

13.1 *Data Reduction and Statistics*—Since strain gages used to determine values of performance characteristics are generally not reusable, the data obtained from a sample of such gages are used to predict values of these characteristics for all other gages of the same batch. Well established statistical methods can be used to make such predictions of values and the uncertainties associated with those values. These methods require that tests be made upon a sample taken at random from the batch, and generally assume that the test results will have a normal, that is, Gaussian, distribution. For purposes of verification of reported values, it will be assumed that these reported values are equivalent to those obtained from a sample of thirty gages and that systematic errors in these reported values are negligible or have been corrected for. A numerical example is given in Appendix X3.

13.1.1 For each characteristic to be verified, a sample of strain gages shall be tested using the procedures described. The control sample shall consist of at least five strain gages although a sample of ten or more gages would be preferred. The results of the several tests made on one gage shall be averaged, and these average values shall be used in the following computations to determine if the average performance or variability of the control sample differs from the reported values at the 95 percent confidence level.

13.1.2 A two-sided t-test is used to compare the manufacturer’s statement of the value for a particular characteristic,  $V_R$ , shown on the gage package, and the average value from the control tests,  $V_C$ . The standard deviation of the reported value,  $S_R$ , is taken as  $T_R/2$ , where  $T_R$  is the tolerance given on the package. The standard deviation of the control value,  $S_C$ , is calculated from the control test data using the relationship:

$$S_C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \tag{11}$$

**TABLE 1 Values Used to Compare Reported and Control Test Values of Average Gage Performance and Variability**

Number of gages in control sample, <i>n</i>	Factor for comparing average values, <sup>A</sup> <i>t</i>	Values for comparing variability, <sup>B</sup>	
		<i>A</i>	<i>B</i>
5	2.036	0.306	8.47
10	2.025	0.386	3.57
15	2.018	0.424	2.74
20	2.013	0.448	2.40
30	2.002	0.476	2.10

<sup>A</sup>Obtained by interpolation for *t* (.975) from a table of percentiles of the *t* distribution assuming that  $S_R$  is based upon a sample of 30.

<sup>B</sup>Obtained by interpolation from a table of percentiles of the *F* distribution for *F* (.975) assuming that  $S_R$  is based upon a sample of 30.

where:

$X_i$  = the average value for *i*<sup>th</sup> gage,

$\bar{X}$  = the average value for all gages in the control sample, and

*n* = the number of gages in control sample.

The manufacturer's reported value,  $V_R$ , is considered to be verified if:

$$|V_R - V_C| \leq t - \sqrt{\left[ \frac{29S_R^2 + (N-1)S_C^2}{28+n} \right] \times \left[ \frac{3+n}{3n} \right]} + e_s \quad (12)$$

where:

*t* = the value from Table 1 corresponding to *n*, and

$e_s$  = the estimate of systematic error in the control value,  $V_C$ .

13.1.3 An "equal tail" test is used to compare the variability reported with the gages and the variability of the control sample. The reported tolerance,  $T_R$ , shall be considered verified if:

$$A \leq (S_R^2/S_C^2) \leq B \quad (13)$$

where:

$S_R = T_R/2$ ,

$S_C$  = the standard deviation of control sample, and

*A* and *B* = the values from Table 1 corresponding to the number of gages in the control sample, *n*.

13.1.4 An example is presented in Appendix X2.

13.2 *Content of Report:*

13.2.1 The report shall include the following:

13.2.1.1 Method of test used,

13.2.1.2 Statement of the accuracy of the apparatus used, including the latest date of verification and by whom verified,

13.2.1.3 The uncertainty from all sources, of the gage characteristics at a probability level of at least 95.5 % (that is to say, no less than two standard deviations).

13.2.1.4 Type of electrical circuit used, including the type of excitation (ac or dc, constant voltage or constant current), and the voltage across or current through the gage,

13.2.1.5 Temperature and humidity in the test area,

13.2.1.6 Number of gages included in the tests,

13.2.1.7 Complete description of the gages tested including, type, lot number, manufacturer, size, and method of attachment, including curing cycle,

13.2.1.8 Results from all gages tested, and

13.2.1.9 Average of all values of the characteristics determined and the uncertainties. Results may be presented in the form of a table or a graph (see Appendix X2 for samples). In the case of gage factor, state whether the values are for tension and compression load on each gage, tension on part of the sample and compression on the remainder, or tension or compression only.

13.3 *Presentation of Gage Characteristics:*

13.3.1 Supply the following information:

13.3.1.1 Gage type,

13.3.1.2 Lot number,

13.3.1.3 Batch number,

13.3.1.4 Gage resistance with uncertainty,

13.3.1.5 Gage factor with uncertainty,

13.3.1.6 Transverse sensitivity with uncertainty,

13.3.1.7 Temperature coefficient of gage factor, over recommended temperature range, expressed either graphically or numerically with uncertainty,

13.3.1.8 Thermal output versus temperature to be expressed either graphically or numerically with uncertainty. The thermal output data or graph must include a statement concerning whether the test was run at fixed stable temperature steps or with continuous but uniform temperature changes and recording of data.

## 14. Precision and Bias

14.1 *Precision*—No precision statement based on interlaboratory testing is possible at this time. Committee E-28 is not aware of sufficient laboratories to conduct an appropriate program of testing but seeks cooperation of any and all laboratories concerned with implementing these test methods. The Committee is willing to coordinate such an activity.

14.2 *Bias*—Since there are no reference or true values of strain gage performance characteristics, no bias estimates can be measured.

APPENDICES

(Nonmandatory Information)

X1. GAGE DESIGNS (Reproduced from Reference Cited in 2.3)

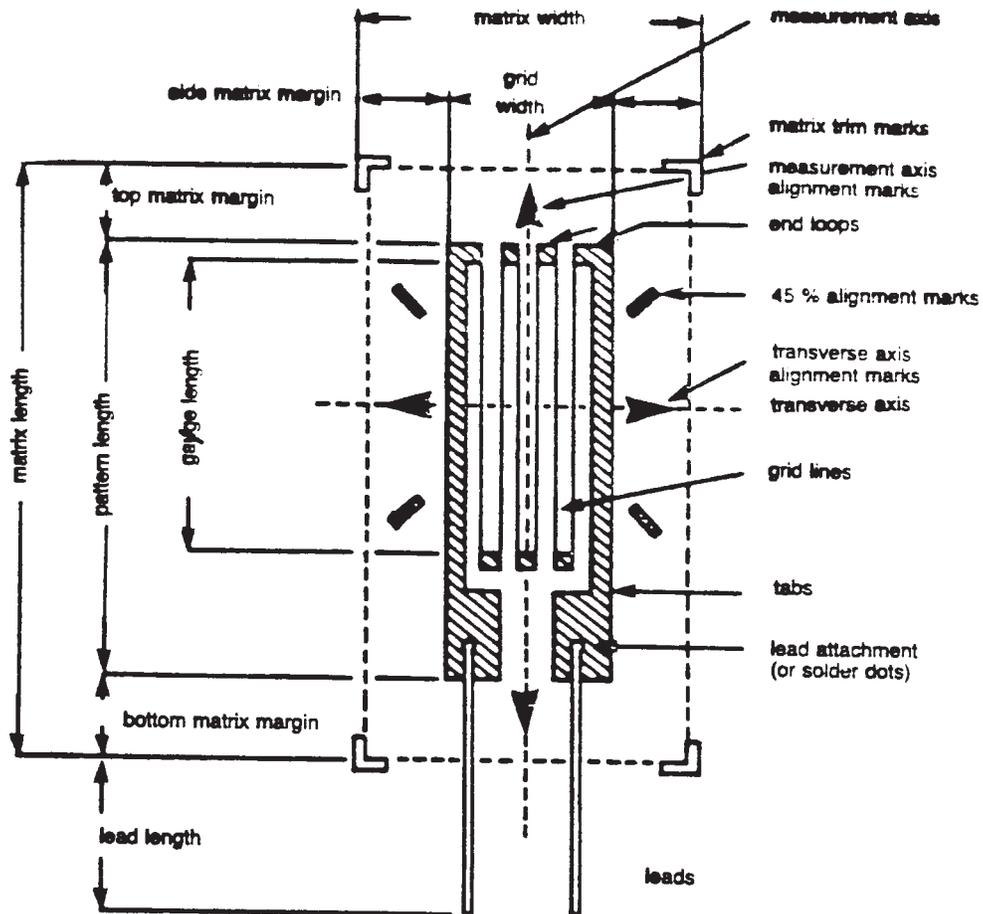


FIG. X1.1 Typical Foil Strain Gage

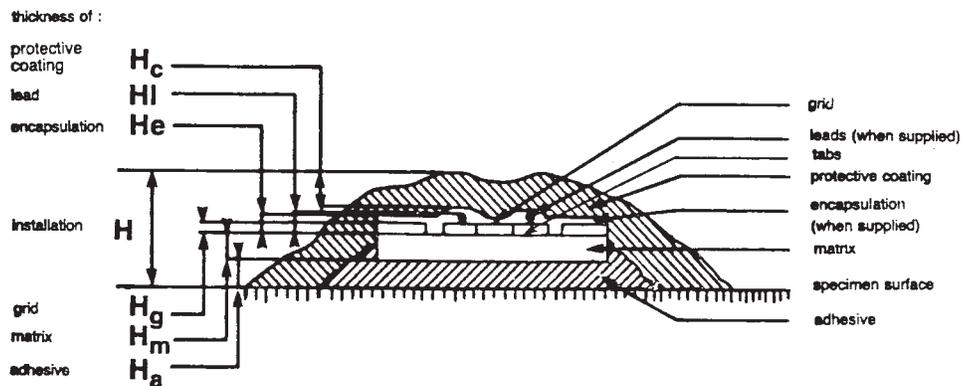


FIG. X1.2 Typical Strain Gage Installation Displacement of Grid from Specimen Surface:  $H_d = H_a + H_m + \frac{1}{2} H_g$

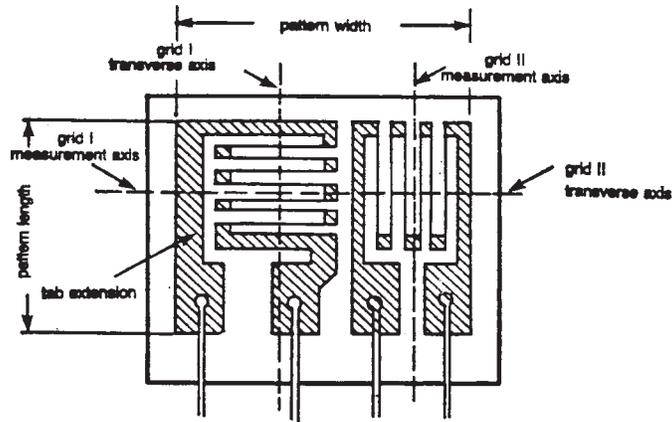


FIG. X1.3 Typical Multiple Grid Strain Gage

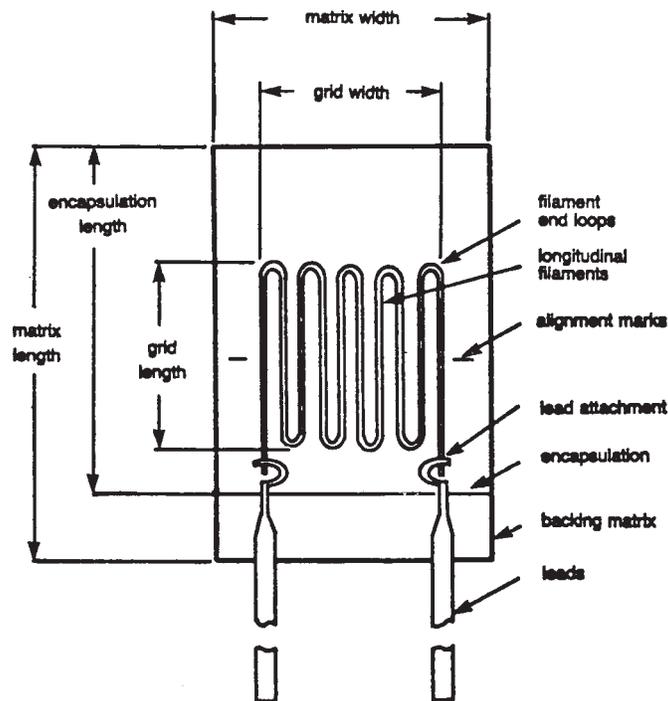


FIG. X1.4 Typical Wire Strain Gage

## X2. PRESENTING THE INFORMATION

X2.1 A format for presenting the information either numerically or graphically, is given as follows:

EXAMPLE: PACKAGE INFORMATION  
 GAGE TYPE: RLX-25PB-8764  
 LOT: 36D91L  
 BATCH: 6143

PERFORMANCE CHARACTERISTIC	VALUE
1. Gage resistance at 24°C and 50 % RH	350 $\Omega$ $\pm$ 0.2 %
2. Gage factor at 24°C and 50 % RH	2.05 $\pm$ 1 %
3. Transverse sensitivity at 24°C and 50 % RH	(-0.6 $\pm$ 0.2) %

- |  |  |
|--|--|
| 4. Temperature coefficient of gage factor<br>(if expressed numerically)  | (+ 0.9 ± 0.2) %/100°C <sup>A</sup>   |
| 5. Thermal output in μm/m versus temperature in °C (if expressed numerically). Bonded to 2023-T3 aluminum. Temperature change and data are continuous. | - 45.1 + 3.32 T - 6.76·10 <sup>-2</sup> T <sup>2</sup><br>+ 3.20·10 <sup>-4</sup> T <sup>3</sup><br>- 2.86·10 <sup>-7</sup> T <sup>4</sup> μm/m<br>± 0.22 (μm/m)·°C <sup>-1A</sup> |

<sup>A</sup> See Fig. X2.1 for graphical presentation.

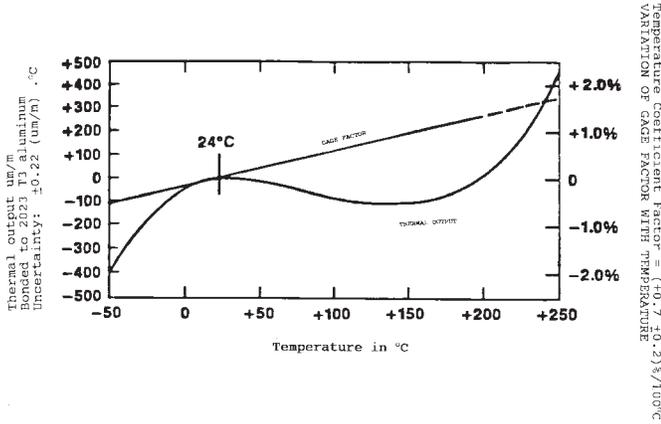


FIG. X2.1 Items 4 and 5 (Presented Graphically)

X2.2 The gage type designation used shall be unique in nature so that, from published literature, the following can be determined:

- X2.2.1 strain gage geometry,
- X2.2.2 type of strain sensing alloy,
- X2.2.3 type of matrix material, if used,
- X2.2.4 approximate matrix size,
- X2.2.5 type of leads, terminals, solder dots or other optional features, if included, and
- X2.2.6 the coefficient of expansion of the material for which the strain gage is to provide compensated minimum thermal output, if applicable.

### X3. COMPARISON OF REPORTED AND CONTROL VALUES

X3.1 Example—The following example is given to show how values and tolerances furnished with a shipment of strain gages can be compared to values obtained from a sample tested by a control laboratory to determine whether the reported values properly describe the supplied gages. The gage factor  $K$  is the characteristic used in this example, but the process would be the same for other characteristics.

X3.1.1 Assume that the gage factor value furnished with the gages is  $2.024 \pm 0.5\%$ , reported in accordance with these test methods.

X3.1.2 Select a sample of ten gages at random from the shipment.

X3.1.3 Test the gages of the sample using the procedures described in point four. Each gage is tested in both tension and compression. The test plan (Table X3.1) gives the same number of data points for each direction of loading.

X3.1.4 The results of the tests are tabulated as shown in Table X3.1. Note that the values given in this table were obtained using random number techniques and may not be representative of actual data from strain gages.

X3.1.5 An average gage factor  $K_i$  is calculated for each gage tested. Average values are used in the subsequent calculations since gage performance and not the effects of the test procedure are of interest. The average value is the best estimate of the gage factor of that particular gage. These average values are shown in Table X3.1.

X3.1.6 An average gage factor for the sample,  $K_C$ , is calculated:

$$K_C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i \quad (X3.1)$$

This value is shown in Table X3.1.

X3.1.7 An estimate of the standard deviation for the sample,  $S_C$ , is calculated as:

$$S_C = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - K_C)^2}{n - 1}} \quad (X3.2)$$

This value is shown in Table X3.1.

X3.1.8 An estimate of the systematic error in  $K_C$  is made from the characteristics of instruments, test apparatus, test procedures, operators, etc. This estimate is influenced by the experience of the laboratory. Note that this does not include systematic effects for which corrections have been made, for example, instrument calibration corrections. For this example, the systematic error  $e_s$  is estimated to be 0.05 %.

X3.1.9 The gage factor value,  $K_C$ , obtained from (1), is compared to the value furnished with the gages,  $K_R$ , using the equation:

$$|K_R - K_C| \leq t \sqrt{\left[ \frac{29 S_R^2 + (n - 1) S_C^2}{28 + n} \right] \left[ \frac{30 + n}{30 n} \right]} + e_s \quad (X3.3)$$

Using values from Table X3.1 in this equation gives:

$$2.024 - 2.020 \leq 2.025 \sqrt{\left[ \frac{29 \times 0.0051^2 + 9 \times 0.0064^2}{38} \right] \left[ \frac{40}{300} \right]} + 0.001$$

$$\leq 0.004 \leq 0.005 \quad (X3.4)$$

Since this statement is true, there is no reason to believe that the two values are different at the 95 percent confidence level, and the value of  $K$  is therefore verified.

X3.1.10 The variability of the sample is compared to the tolerance furnished with the gages using Eq 13 in 13.1.3:

**TABLE X3.1** Test Plan  
 Odd numbered gages—Runs 1, 2 and 3 in tension; Runs 4 and 5 in compression  
 Even numbered gages—Runs 1, 2 and 3 in compression; Runs 4 and 5 in tension

Gage No	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Avg. $K_i$	$K_i - K_C$	$(K_i - K_C)^2$
1	2.039	2.040	2.012	2.040	2.005	2.027	+ .0068	$4.624 \times 10^{-5}$
2	2.008	2.015	2.013	2.022	2.019	2.015	-.0052	$2.704 \times 10^{-5}$
3	2.038	2.039	2.001	2.040	2.000	2.024	+ .0038	$1.444 \times 10^{-5}$
4	2.002	2.014	2.036	2.003	2.005	2.012	-.0082	$6.724 \times 10^{-5}$
5	2.013	2.022	2.027	2.037	2.048	2.029	+ .0088	$7.744 \times 10^{-5}$
6	2.000	2.021	2.046	2.008	2.034	2.022	+ .0018	$0.324 \times 10^{-5}$
7	2.007	2.027	2.004	2.039	2.011	2.018	-.0022	$0.484 \times 10^{-5}$
8	2.047	2.005	2.047	2.001	2.028	2.026	+ .0058	$3.364 \times 10^{-5}$
9	2.013	2.008	2.007	2.015	2.011	2.011	-.0092	$8.464 \times 10^{-5}$
10	2.005	2.010	2.036	2.003	2.034	2.018	-.0022	$0.484 \times 10^{-5}$
						20.202		$36.36 \times 10^{-5}$

Control Values (Calculated):  
 $K_C = \sum K_i / n = 20.202 / 10 = 2.0202$   
 $S_C = \sqrt{\sum (K_i - K_C)^2 / n - 1} =$   
 $\sqrt{3.636 \cdot 10^{-4} / 9} = 0.0064$   
 $e_s = 0.0005 \quad K_C = 0.0010$

Reported values (from package):  
 $K_R = 2.024$   
 $S_R = T_R / 2 = 0.005 \cdot 2.024 / 2 = 0.0051$

$$A \leq (S_R^2 / S_C^2) \leq B \quad (X3.5)$$

Using values from Table 1 in this equation gives:

$$0.386 \leq \left[ \frac{0.0051^2}{0.0064^2} = 0.635 \right] \leq 3.57 \quad (X3.6)$$

Since this statement is true, there is no reason to believe that the variabilities are different at the 95 % confidence level, and the value of  $T_R$  is therefore verified.

## REFERENCES

- (1) "Bonded Electric Resistance Strain Gauges with Metallic Measurement Grids—Characteristics and Testing Conditions"; VDE/VDI—Richtlinien NR 2365 August, 1974. Verein Deutscher Ingenieure, VDE/VDI—Fachgruppe Messtechnik, 4000 Dusseldorf 1, Graf-Recke-Str. 84, F. R. of Germany.
- (2) "Calibration of Measuring Instruments—Force and Strain Measuring Extensometers"; Draft Recommendation, Rc. Aero 803 21. Bureau National de l'Aeronautique et de l'Espace, Boulogne 92100, France (undated).
- (3) "Measurements and Uncertainties"; by P. Giacomo, International Bureau of Weights and Measures. OIML Bulletin No. 65, 1976.
- (4) "Methods for Calibration of Bonded Electric Resistance Strain Gauges"; Draft for Development 6: 1972. British Standards Institution, 2 Park Street, London W1A 2BS, England.
- (5) "Strain Gages, Bonded Resistance"; Classification Specification NAS 942 (National Aerospace Standard 942) 1963. Aerospace Industries Association of America, Inc. Published by National Standards Association, Inc., 1315 Fourteenth Street, N.W., Washington, D.C., USA.
- (6) "Performance Characteristics of Metallic Resistance Strain Gauges"; International Recommendation No. 62, 1985. Organisation Internationale de Metrologie Legale, 11, Rue Turgot, 75009 Paris, France.

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).*