

AUTOMATIZACIÓN EN LA ADQUISICIÓN DE LA DATA EN UNA MÁQUINA
UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA TREBEL CON CARGA MÁXIMA DE 40
TONELADAS

CESAR EDUARDO PEÑA LEÓN

PEDRO ALBERTO ACOSTA MATEUS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA,

2017

AUTOMATIZACIÓN EN LA ADQUISICIÓN DE LA DATA EN UNA MÁQUINA
UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA TREBEL CON CARGA MÁXIMA DE 40
TONELADAS

CESAR EDUARDO PEÑA LEÓN

PEDRO ALBERTO ACOSTA MATEUS

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO

DIRECTOR

ALBERTO DAVID PERTUZ COMAS

PhD en ciencia de los materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

BUCARAMANGA,

2017

A mis padres, Martha Yaneth León Solano & Dagoberto Peña Cortes, debo agradecerles por siempre creer en mí, por su incondicional amor e incansable dedicación para que yo alcance mis objetivos.

A mis hermanos, Juan Sebastián Peña León & Andrea del Pilar Peña León, que son mis compinches y confidentes siempre que los necesito, brindándome su apoyo y cariño.

A mis amigos y compañeros por su colaboración y agradable compañía durante estos años de universidad.

César Eduardo Peña León

A Dios en primer lugar, a la memoria de mi abuela Carmen que son sus ejemplos me enseñó a ser una persona correcta a mi abuelo Pedro por su valiosa ayuda en momentos difíciles.

A mi madre Luz Marina quien hizo un enorme esfuerzo para que pudiera culminar con mis objetivos, a mi padre Carlos Alberto, de quien solo tengo palabras de admiración y agradecimientos, a mi hermano José Miguel, este título es para ellos.

A Sergio Luis y Simón que me dieron una nueva motivación para seguir adelante, a Angie por ser mi compañera incondicional.

Pedro Alberto Acosta Mateus

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sincero agradecimiento a cada una de las personas que tuvo paso e influyo en la solución de esta tesis, con sus aportes, comentarios y disposición.

Ing. DAVID ALBERTO PERTUZ COMAS. Director de trabajo de grado por depositar la confianza en nosotros, comunicar sus experiencias profesionales que ayudaron a la exitosa solución de la tesis.

Profesor MIGUEL AGUDELO, por la disposición de tiempo y experiencia acerca del manejo de la maquina universal de ensayos TREBEL.

JAIME, JAIRO y GERMAN, laboratoristas del edificio Álvaro Beltrán Pinzón, por la disposición de los recursos, salas y tiempo para la realización de las pruebas hechas sobre la máquina.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	108
1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	20
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA	22
1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	22
2 OBJETIVOS	24
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3 TEORÍA Y TERMINOLOGÍA	25
3.1 MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS:.....	25
3.2 ENSAYO DE TRACCIÓN:	25
3.2.1 Norma para ensayos de tracción:.....	25
3.2.2 Probeta para ensayos de tracción bajo la norma ASTM E8:	26
3.2.3 Diagrama esfuerzo-deformación:	28
3.3 ALTERNATIVAS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	37
3.3.1 Sensor y transductor:.....	37
3.3.2 Dispositivo para muestrear la deformación.....	38
3.3.3 Dispositivo para muestrear la carga.....	41
3.3.4 Transductor de presión:	41
3.3.5 Tarjeta para la adquisición de la data	42
4 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN Y SENSOR POTENCIOMÉTRICO	
LINEAL	45

4.1	TRANSDUCTOR DE PRESIÓN:	45
4.2	SENSOR POTENCIOMÉTRICO LINEAL	48
5	ACONDICIONAMIENTO DEL HARDWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	50
5.1	TARJETA DE ADQUISICIÓN “ARDUINO UNO”	50
5.2	ORDENADOR.....	51
5.3	TARJETA PCB PARA ACONDICIONAMIENTO.....	52
5.3.1	Líneas de alimentación para los sensores.....	53
5.3.2	Acondicionamiento del sensor potenciométrico lineal.	54
5.3.3	Acondicionamiento del transductor de presión.	55
6	DISEÑO DE INTERFAZ DE USUARIO EN LABVIEW.....	58
6.1	LABVIEW.....	58
6.2	INTERFAZ GRAFICA	58
7	PRUEBAS DEL SISTEMA Y RESULTADOS	62
7.1	PRUEBAS INICIALES	62
7.2	PRUEBAS FINALES.....	67
7.3	GRÁFICOS REPRESENTATIVOS PARA LOS DIFERENTES MATERIALES ENSAYADOS.....	69
7.3.1	Acero A36.....	69
7.3.2	Acero 1045:.....	71
7.3.3	Acero 4140:.....	73
7.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS:.....	74
7.4.1	Acero 1045	74
7.4.2	Acero 4140.....	76
8	CONCLUSIONES.....	79

9	BIBLIOGRAFÍA	80
	ANEXOS.....	82

LISTA TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Especificaciones transductor de presión.....	46
Tabla 2. Especificaciones sensor potenciométrico lineal.....	49
Tabla 3. Especificaciones del ordenador.....	51
Tabla 4. Muestreo forma "DOCENTE"	61
Tabla 5. Muestreo forma "ESTUDIANTE"	61
Tabla 6. Muestreo prueba uno para acero 1045.....	66
Tabla 7. Muestreo prueba dos para acero 1045.....	67
Tabla 8. Muestreo prueba tres para acero 1045.....	68
Tabla 9. Datos esperados acero A36.....	70
Tabla 10. Datos de la interfaz acero 1045 ensayo dos.....	71
Tabla 11. Datos de la interfaz acero 1045 ensayo tres.....	72
Tabla 12. Datos esperados acero 1045.....	72
Tabla 13. Datos de la interfaz acero 4140.....	73
Tabla 14. Datos esperados acero 4140.....	73
Tabla 15. Valores teóricos para acero 1045.....	74
Tabla 16. Valores experimentales para acero 1045.....	75
Tabla 17. Porcentajes de error para acero 1045 probeta 1.....	76
Tabla 18. Porcentajes de error para acero 1045 probeta 2.....	76
Tabla 19. Valores teóricos para acero 4140.....	76
Tabla 20. Valores experimentales para acero 4140.....	77
Tabla 21. Porcentajes de error para acero 4140.....	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Máquina universal de ensayos	20
Figura 2. Método de medición de la carga	21
Figura 3. Geometría de la probeta.	27
Figura 4. Dimensionamiento para las distintas probetas	27
Figura 5. Diagrama esfuerzo real-deformación real	32
Figura 6. Diagrama esfuerzo-deformación.....	32
Figura 7. Estricción de la probeta	34
Figura 8. Etapas del diagrama esfuerzo deformación.....	35
Figura 9. Transductor de presión.....	46
Figura 10. Posición del transductor de presión en la máquina	47
Figura 11. Ubicación extensómetro mecánico.....	48
Figura 12. Sensor potenciométrico lineal	49
Figura 13. Placa ARDUINO UNO	51
Figura 14. Ordenador de escritorio.....	51
Figura 15. Placa PCB de acondicionamiento.	52
Figura 16. Circuito representativo de acondicionamiento	53
Figura 17. Circuito representativo de alimentación a los sensores	53
Figura 18. Acondicionamiento para fuente de +6 y -6 volts	54
Figura 19. Circuito de acondicionamiento del sensor potenciométrico.	55
Figura 20. Amplificador de instrumentación AD620.	56
Figura 21. Circuito de acondicionamiento para el transductor de presión	57
Figura 22. Datos de entrada	59
Figura 23. Pulsadores.....	59
Figura 24. Gráfica y muestreo de las señales entrantes	60
Figura 25. Resultados finales de la prueba.....	60
Figura 26. Probeta de acero estructural A36	62
Figura 27. Prueba para acero estructural A36.	63

Figura 28. Falla de la probeta de acero estructural.	64
Figura 29. Probetas de acero 1045.	64
Figura 30. Prueba para acero 1045.	65
Figura 31. Falla de la probeta de acero 1045	65
Figura 32. Falla de las probetas ensayadas.	66
Figura 33. Prueba 2 para acero 1045.	67
Figura 34. Prueba 3 para acero 1045.	68
Figura 35. Prueba Acero 4140	69
Figura 36. Grafico carga vs alargamiento esperado acero A36	70
Figura 37. Grafico carga vs alargamiento esperado acero 1045.	72
Figura 38. Grafico carga vs alargamiento esperado acero 4140	74
Figura 39. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045.	74
Figura 40. Figura 39. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045 probeta 1.	75
Figura 41. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045 probeta 2.....	75
Figura 42. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 4140.	77
Figura 43. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 4140.	77

LISTA ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Norma ASTM.	82
ANEXO B. Circuito de acondicionamiento electrónico.	92
ANEXO C. Interfaz gráfica en labview	93
ANEXO D. Transductor de presión.	94
ANEXO E. Sensor potenciométrico lineal.	96
ANEXO F. Tarjeta de adquisición de datos “Arduino UNO”.....	97
ANEXO G. Amplificador de instrumentación AD620.....	98
ANEXO H. Etapas de programación en labview.....	106

RESUMEN

TITULO: AUTOMATIZACIÓN EN LA ADQUISICIÓN DE LA DATA EN UNA MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS MARCA TREBEL CON CARGA MÁXIMA DE 40 TONELADAS*

AUTORES: CESAR EDUARDO PEÑA LEÓN, PEDRO ALBERTO ACOSTA MATEUS**

PALABRAS CLAVES: MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS, PROPIEDADES MECÁNICAS, ADQUISICIÓN DE DATOS, ENSAYO DE TRACCIÓN, INTERFAZ, LABVIEW.

DESCRIPCIÓN:

La escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander cuenta con una máquina universal de ensayos marca TREBEL de 40 toneladas de carga máxima, en un estado de baja fiabilidad en salida de datos a la hora de realizar las prácticas o ensayos, principalmente por sus décadas de prestación de servicio a la comunidad y poca intervención para realizarle algún tipo de mantenimiento. Por consiguiente, se presentan fugas e incertidumbre en los datos referentes a la carga, arrojados por el sistema oleo hidráulico de la máquina, conllevando a resultados erróneos al calcular y hallar las propiedades mecánicas de los materiales tratados bajo las capacidades de dicha máquina. Teniendo en cuenta lo dicho, se busca dotar la máquina universal de ensayos de un sistema de adquisición de datos para ensayos de tracción a materiales metálicos, que recopile la data de carga y deformación con mayor exactitud y diseñar una interfaz de usuario hombre/máquina de fácil acceso y uso.

Para el desarrollo de este proyecto se hizo una previa verificación del estado de la máquina, al identificar las necesidades y alta capacidad de la misma, se establecieron las resoluciones mínimas que deben tener los sensores, los cuales, perciben los cambios de presión y elongación sobre la probeta, enviando respuestas en mili voltios a una tarjeta de adquisición previamente seleccionada, con el fin de procesar y almacenar cada dato para ser visualizados finalmente en una interfaz desarrollada en labview basada en PC.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: David Alberto David Pertuz Comas, Ingeniero Mecánico.

SUMMARY

TITLE: AUTOMATION IN THE ACQUISITION OF DATA IN A UNIVERSAL TESTING MACHINE TREBEL BRAND WITH MAXIMUM LOAD 40 TONNES*

AUTHORS: CESAR EDUARDO PEÑA LEON, PEDRO ALBERTO ACOSTA MATEUS**

KEYWORDS: UNIVERSAL TEST MACHINE, MECHANICAL PROPERTIES, DATA ACQUISITION, TRACTION TEST, INTERFACE, LABVIEW.

DESCRIPTION:

The civil engineering school of the industrial university of Santander has a universal test machine TREBEL brand of 40 tons of maximum load, currently in a state of low reliability in data output at the time of practicing or testing, mainly for its Decades of service to the community and little intervention to perform some kind of maintenance. This is why, leakage and uncertainty in the data concerning the load as issues are presented, thrown by the hydraulic oil system of the machine, leading to erroneous results when calculating and finding the mechanical properties of materials treated under the capabilities of the machine. Under this circumstances, it is sought to provide the universal testing machine with a data acquisition system for tensile tests on metallic materials, to collect the data of loading and deformation with greater accuracy and to design an user/machine interface easy to use.

It was made a previous verification of the state of the machine for the development of this project. When identifying the needs and high capacity of the machine, resolutions that must have the sensors were set, which, perceive the changes of pressure and elongation on the probe, sending responses in milli volts to a previously selected acquisition card, in order to process and store each data to be finally displayed in an interface developed in PC-based labview.

* Work degree.

** Faculty of Mechanical Engineering and Physical. School of Mechanical Engineering. Director: David Alberto David Pertuz Comas, Ingeniero Mecánico.

INTRODUCCIÓN

La tecnología abre caminos a situaciones que anteriormente eran muy difíciles de manejar o comprender, situaciones que generaban complejidad para realizar cálculos, controlar procesos, eliminar incertidumbres en una toma de datos, dimensionamientos etc... todo esto se realizaba manualmente, incluyendo el error humano en cada proceso. Con la evolución de la tecnología dando solución a las necesidades del ser humano, y que cada vez se dan con mayor complejidad, en este caso haciendo referencia a la automatización industrial como un aporte valioso a dichos procesos.

Con el fin de generar un aporte tecnológico y académico dentro de la Universidad Industrial de Santander, se ejecuta este proyecto sobre una maquina universal de ensayos, que hace gran aporte académico y es usada en una de las áreas perteneciente al pensum de ingeniería mecánica, dotándola de un sistema automatizado de adquisición de datos.

La máquina universal de ensayos es ampliamente usada para la caracterización de nuevos materiales, ha sido desarrollada pensando en las necesidades de sectores como el de la investigación, construcción en industria en general, haciendo posible hallar y definir las propiedades mecánicas de los materiales. En este caso, materiales metálicos y con alto valor de esfuerzo máximo, teniendo en cuenta que la carga de la máquina es bastante considerable (40 toneladas).

Para la solución de los objetivos mencionados en esta tesis, se plantean varias alternativas para cada uno de los elementos instalados. Dos sensores y una tarjeta requerida para adquirir y procesar los datos recopilados. Se tuvieron en cuenta aspectos como: necesidades y costo, aspectos que ratificaron el cumplimiento total de los objetivos del proyecto.

1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La escuela de ingeniería civil cuenta con un laboratorio de resistencia de materiales, el cual es usado por los estudiantes de ingeniería mecánica y la comunidad universitaria en general, que necesite el servicio de este. El laboratorio posee cierto número de máquinas, que cumplen con una labor y le aportan a la comunidad resultados con todo lo relacionado a pruebas, ensayos y análisis de las propiedades de los materiales.

Figura 1. Máquina universal de ensayos



En la vida ingenieril, sin destacar ninguna de las ramas, por el contrario, haciendo énfasis en cada una de ellas, al desarrollar casi cualquier tipo de proyecto, es necesario conocer y saber qué tipo de material se usará, esto lleva a realizar todo

tipo de análisis sobre él, con el fin de encontrar las propiedades importantes o relevantes del material que se tendrán en cuenta para el óptimo desarrollo de dicho proyecto.

El laboratorio cuenta con máquinas que son capaces de dar una idea real de cada una de las propiedades mecánicas de los materiales, resaltando entre dichas maquinas una muy importante, y es la que hará parte esencial de este trabajo. Se trata de la maquina universal de ensayos marca TREBEL con capacidad máxima de carga de 40 toneladas. El desarrollo funcional de la maquina consta básicamente de un sistema oleo hidráulico.

Esta máquina arribó al laboratorio hace ya varias décadas, más específicamente, en el año de fundación de la universidad industrial de Santander, lo que da un indicio de la tecnología ya obsoleta que maneja, en este caso concreto, con respecto al subsistema de adquisición de datos, sin dejar atrás el hecho que con el tiempo hubiesen adquirido algún tipo de daño, básicamente estos factores la hacen imprecisa al momento de arrojar resultados.

Figura 2. Método de medición de la carga



1.2 JUSTIFICACIÓN PARA LA SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Para los directivos de la escuela de ingeniería civil e ingeniería mecánica, este es un proyecto que tendrá en gran medida un aporte netamente académico, se desea aportar una actualización tecnológica sobre esta máquina generando un salto de más de 60 años de obsolescencia en el subsistema de data, con el fin de poder presentar a los estudiantes pruebas mucho más certeras y precisas. Esto hará que se disminuyan tiempos de trabajo, imprecisiones y porcentajes de error en los datos y gráficos obtenidos, no será necesario acudir al mismo número de operadores al momento de realizar las pruebas

Dos puntos muy importantes a tener en cuenta en la solución de este proyecto son: la magnitud altamente considerable de carga alcanzada por la máquina, y el subsistema usado para la generación de carga, que en este caso es netamente ole hidráulico.

Necesariamente por ser una máquina que genera tan alta carga, en este caso 40 toneladas, se debe hacer una exhaustiva búsqueda con respecto al sensor o transductor de presión que será montado en circuito oleo hidráulico, en la entrada de presión del actuador, dado a las condiciones de trabajo que se darán durante los ensayos, las altas cargas generadas obligaran a encontrar un sensor de alta precisión y capacidad.

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Este proyecto se fundamenta principalmente en generar un diagnóstico sobre una maquina universal de ensayos marca TREBEL con carga máxima de 40 toneladas, perteneciente a la escuela de ingeniería civil de la universidad industrial de Santander, centrándose en la automatización y modernización en todo lo referente a la toma de datos. Sin desconocer la edad de la máquina y la tecnología

que maneja, se desea asumir el reto de encontrar una solución efectiva y duradera a la problemática ya planteada anteriormente, con el fin de prolongar de cierta manera la vida útil de la máquina, que se considera como herramienta esencial en materias pertenecientes al pensum tanto de ingeniería civil, como ingeniería mecánica.

La base para el desarrollo del tema es encontrar el transductor de presión indicado, que se ubicará justamente a la entrada de presión del cilindro hidráulico, encargada de ejercer la carga sobre las probetas, esto, con el fin de censar y obtener los valores de carga que se dan en la prueba.

En este tipo de ensayos, para llegar a una solución, es necesario conocer dos variables, una es el valor de carga y este compararlo frente a un valor de deformación o elongación del material durante el ensayo, con esto se logra generar la curva esfuerzo-deformación y así conocer ciertas propiedades mecánicas específicas del material. Por esto, es necesario encontrar la mejor alternativa en la variedad de sensores encontrados en el mercado con el propósito de calcular deformaciones.

Encontrando la mejor alternativa y combinación con respecto a la carga y deformación, se diseñará un software que permita la recopilación de cada uno de los datos arrojados por los sensores, con el fin de exportarlos y analizarlos para generar una respuesta de las propiedades del material en el menor tiempo posible.

Cada una de las partes mencionadas y alternativas a escoger, se presentarán en la siguiente sección.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Contribuir con la misión de la Universidad Industrial de Santander dentro de lo cual tiene como propósito la formación de personas de alta calidad profesional en pro del progreso y el beneficio de la industria colombiana, desarrollando un plan de recuperación y modernización a una maquina universal de ensayos marca TREBEL, adaptando en ella un sistema automatizado de adquisición y análisis de datos obtenidos en las pruebas de laboratorio.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

2.2.1 Dotar a la maquina universal de ensayos TREBEL de un sistema de adquisición de datos para ensayos de tracción a materiales metálicos bajo la norma ASTM E E-8 y que permita:

- Adquirir y procesar una carga máxima de 40 toneladas y resolución de 50 Kgf (kilogramos fuerza).
- Adquirir y procesar la deformación longitudinal de una probeta en un rango de hasta 25,4 mm y resolución de 0,0254 mm.

2.2.2 Seleccionar el hardware y software de adquisición de datos.

2.2.3 Diseñar e implementar una interfaz hombre/maquina basada en PC que permita para cada ensayo:

- Visualizar y exportar los datos de carga y deformación de un ensayo de tracción para uso por parte de los estudiantes
- Visualizar la gráfica esfuerzo-deformación para uso por parte del docente.

3 TEORÍA Y TERMINOLOGÍA

3.1 MAQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS:

En ingeniería se denomina máquina universal a una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico. Esta máquina es ampliamente utilizada en la caracterización de nuevos materiales.

3.2 ENSAYO DE TRACCIÓN:

El ensayo de tracción es uno de los más importantes para determinar las propiedades mecánicas de los materiales.

El ensayo consiste en someter una pieza de forma cilíndrica o prismática de dimensiones normalizadas a un esfuerzo de tracción continuo (tendencia a estirar el material)¹.

3.2.1 Norma para ensayos de tracción:

Al desarrollar la recuperación o automatización de un equipo de laboratorio que realice ensayos de resistencia de materiales, se deben tener en cuenta ciertas normas que rigen este tipo de prácticas.

A nivel ingenieril y de investigación existen una variedad de normas escritas por distintas asociaciones, en este caso, el proyecto se regirá a las normas desarrolladas por American Society for Testing and Materials (ASTM), más

¹ ENSAYOS DE MATERIALES. [en línea] < <http://materialesensegundo.blogspot.com.co/2011/05/ensayo-de-traccion.html>> [Citado 5 de diciembre del 2016]

específicamente al texto descrito en la norma ASTM E8 que hace referencia a los procedimientos y estándares necesarios para el óptimo desarrollo en los ensayos de tracción a materiales metálicos.

3.2.1.1 Norma ASTM E-08²:

Los métodos descritos en esta norma hacen referencia a ensayos de tracción a materiales metálicos en cualquier forma geométrica y ambiente. Menciona el método óptimo para el desarrollo de la práctica y la determinación de propiedades tales como: resistencia a la fluencia, rendimiento en el punto de alargamiento, resistencia a la tracción, elongación y reducción de área.

En definitiva, la normativa mencionada se aplica a materiales metálicos de cualquier forma, hoja, placa, alambre, varilla, barra, tubería, etc... Para cada una de estas, la norma define geometrías, dimensiones, condiciones de agarre o sujeción convenientes para la realización de un ensayo exitoso.

La máquina universal de ensayos intervenida para el desarrollo de este proyecto, posee mandíbulas en V cerradas, por esto las geometrías, dimensiones y especificaciones sacadas de la norma harán referencia a probetas de sección circular.

3.2.2 Probeta para ensayos de tracción bajo la norma ASTM E8:

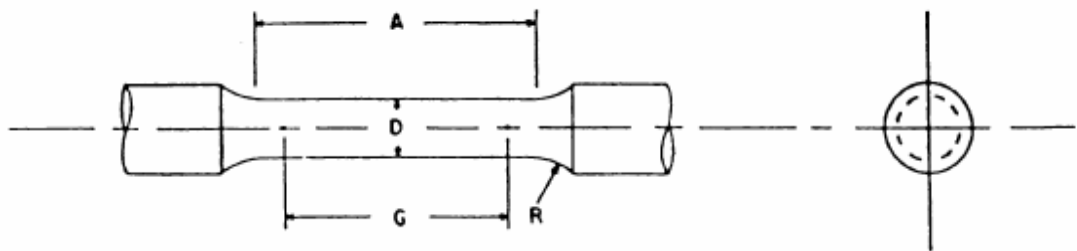
Se considera una la probeta de longitud 'A' y sección transversal 'A₀' hallada con diámetro 'D' sometida a una fuerza 'F' perpendicular a la sección 'A₀'. Definiendo esfuerzo o tensión ' σ ' como la fuerza aplicada a la probeta por unidad de sección transversal 'A₀'.

² NORMA ASTM E-08. [en línea] < <http://es.slideshare.net/filomenospanfilodeagor/norma-astm-e8-en-espaol>> [Citado 5 de diciembre del 2016]

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

Haciendo referencia a lo mencionado y descrito en la norma ASTM E8, la geometría para probetas con sección transversal circular es como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Geometría de la probeta.



Fuente: norma ASTM E-08

La norma ASTM E8 describe y especifica el buen desarrollo para los ensayos de tracción a materiales metálicos. Dentro de dicha norma también se especifican las posibles dimensiones iniciales que debe tener la probeta antes de iniciar el prueba, dando parcialidad y estandarización a la hora de llevar a cabo el ensayo, a continuación, en la figura 4, se especifican las variables para A,D,G y R, según el caso.

Figura 4. Dimensionamiento para las distintas probetas

	Dimensions, mm				
	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional To Standard		
	12.5	9	6	4	2.5
G—Gage length	62.5 ± 0.1	45.0 ± 0.1	30.0 ± 0.1	20.0 ± 0.1	12.5 ± 0.1
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2	9.0 ± 0.1	6.0 ± 0.1	4.0 ± 0.1	2.5 ± 0.1
R—Radius of fillet, min	10	8	6	4	2
A—Length of reduced section, min (Note 2)	75	54	36	24	20

Fuente: Norma ASTM E8

3.2.3 Diagrama esfuerzo-deformación³:

El uso de los materiales en la industria ingenieril y en general, se hace necesario el conocimiento de las propiedades físicas y mecánicas de los mismos, para esto existen ciertas pruebas que permiten determinarlas. Todo cuerpo al soportar una fuerza aplicada, tiende a deformarse en sentido de aplicación de dicha fuerza. Aunque el esfuerzo aplicado y la deformación de la probeta ocurren simultáneamente durante el ensayo, los dos conceptos tienen definiciones completamente distintas. La prueba se realiza en la maquina universal aplicando esfuerzo de tracción sobre la probeta hasta producir la rotura.

- Esfuerzo: Los materiales poseen fuerzas internas distribuidas por toda su área, de ahí, la definición de esfuerzo como la fuerza aplicada por unidad de área, se denomina con la letra griega sigma (σ) y es el parámetro que define la resistencia de los materiales, su ecuación es.

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

σ = esfuerzo.

F= fuerza aplicada.

A= área transversal o perpendicular a la línea de acción de la fuerza.

- Deformación unitaria: Todo elemento sometido a cargas externas se deforma debido a la acción de las fuerzas. La deformación unitaria, se puede definir como la relación entre la deformación total y la longitud inicial del elemento y se representa por:

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

ε = deformación unitaria.

³ PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS MATERIALES. [en línea] < <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>> [Citado 5 de diciembre del 2016]

δ = deformación total de la probeta.

L = longitud inicial de la probeta.

3.2.3.1 Curva esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril:

A fin de comprender de una mejor manera los efectos que produce la aplicación de una determinada carga sobre un material se han desarrollado curvas características como la ya conocida esfuerzo ingenieril vs deformación ingenieril (σ_e vs ϵ_e) y así obtener información sobre el comportamiento mecánico del material para su óptima aplicación con base en los requerimientos del diseño. Estas curvas son una extremadamente importante medida gráfica de las propiedades mecánicas del material, sin embargo no son del todo útiles, especialmente en el caso de materiales dúctiles que pueden experimentar cambio geométricos substanciales durante los ensayos, pues la información que éstas entregan presenta ciertas limitaciones en cuanto a propiedades mecánicas se refiere lo que conlleva a una errónea interpretación de los datos adquiridos.

Y es que, una vez que el cuerpo es tensionado, éste experimenta una serie de cambios dimensionales a lo largo de su deformación una vez superado el límite de proporcionalidad (pérdida de la linealidad en la curva esfuerzo-deformación atribuida al inicio del comportamiento visco-elástico del material), mismos que no son registrados en las curvas ingenieriles convencionales. Estos cambios pueden ser reversibles en un rango elástico, parcialmente irreversibles en el rango visco-elástico, totalmente irreversibles en un rango plástico o bien puede generarse una nueva superficie, lo que se conoce como fractura. Todos estos cambios ocurren por la necesidad de disipar la energía suministrada al sistema. Una vez que la pieza ha roto, dos tipos de superficies son apreciables en la zona fracturada correspondientes a una fractura dúctil o fractura frágil.

Los valores ingenieriles del esfuerzo son determinados a partir de la carga medida F durante del ensayo y del área transversal inicial de la probeta A_0 relacionadas mediante la ecuación 1.1, y los correspondientes a la deformación se determinan mediante la razón de cambio en el desplazamiento de las mordazas ΔL y la longitud inicial de la muestra L_0 siguiendo la ecuación 1.2⁴.

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0}. \quad \text{Ec. 1.1}$$

$$\varepsilon_e = \frac{\Delta L}{L_0}. \quad \text{Ec. 1.2}$$

3.2.3.2 Curva esfuerzo real-deformación real:

Como se explicó en el apartado anterior, las curvas ingenieriles del esfuerzo y la deformación han de ser interpretadas con precaución después del límite elástico ya que las dimensiones de la probeta experimentan cambios substanciales de sus valores originales debido a la inestabilidad estructural que presentan los materiales metálicos en el régimen de grandes deformaciones.

Teniendo en cuenta la reducción del área en la probeta desarrollada después del límite elástico, se establece el esfuerzo verdadero como la relación entre el área instantánea A_i con la carga aplicada asociada mediante la ecuación 1.3.

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i} \quad \text{Ec. 1.3}$$

La medida logarítmica de la deformación conocida como deformación logarítmica o deformación verdadera ε_T y comúnmente asociada al esfuerzo verdadero

⁴ LOAEZA BECERRIL, Alfonso David. *Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales. Trabajo de grado maestría en ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona. 2014. p.23, 24.*

considera el incremento de la deformación como un incremento secuencial del desplazamiento dL dividido entre la longitud inicial de la muestra L_0 mediante:

$$d\varepsilon_T = \frac{dL}{L_0} = \varepsilon_T = Ln \frac{L_i}{L_0} \quad \text{Ec. 1.4}$$

Durante el régimen de fluencia y flujo plástico, el material experimenta cambios de volumen despreciables. Así, bajo una suposición de incompresibilidad plástica y transformación homogénea a lo largo de la zona de ensayo se obtiene una relación entre los esfuerzos y deformaciones ingenieriles y verdaderos siguiendo las ecuaciones 1.5 y 1.6.

$$\sigma_T = \sigma_e (1 + \varepsilon_e) \quad \text{Ec. 1.5}$$

$$\varepsilon_T = Ln (1 + \varepsilon_e) . \quad \text{Ec. 1.6}$$

Estas ecuaciones pueden ser utilizadas para obtener la curva esfuerzo verdadero-deformación verdadera de la curva ingenieril hasta la deformación a la cual se comienza a formar el cuello de estricción. Más allá este punto, la deformación es no-uniforme en la zona de ensayo por lo que los valores de esfuerzo y deformación deben obtenerse a partir de las cargas y secciones transversales de pruebas reales⁵.

⁵ LOAEZA BECERRIL, Alfonso David. *Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales. Trabajo de grado maestría en ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona. 2014. p.25, 26.*

Figura 5. Diagrama esfuerzo real-deformación real

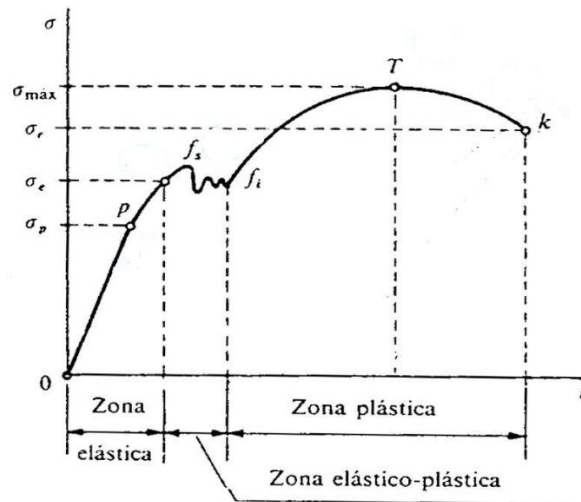


Fuente:

http://datateca.unad.edu.co/contenidos/256599/256599%20Materiales%20Industriales/b__curva_e_sfuero__deformacin_real.html

En la curva obtenida para la figura 6 se es posible identificar distintas zonas de transición sobre la probeta como lo muestra la figura 5, con estas se hallaran las distintas propiedades del material en cuestión.

Figura 6. Diagrama esfuerzo-deformación



Fuente: <http://materialesparaconstruir.blogspot.com.co/2009/03/el-acero.html>

σ_p = *limite de proporcionalidad*

σ_e = *limite elastico*

σ_s = *limite de fluencia*

σ_{max} = *esfuerzo maximo*

σ_u = *esfuerzo de rotura*

A continuación se definirán las zonas demarcadas en la gráfica esfuerzo-deformación.

- Zona OA⁶: Región lineal o de proporcionalidad, trayecto en que el comportamiento en la gráfica es lineal, se define como zona elástica. Se cumple que al retirar la carga, el material vuelve a su longitud inicial sin haberse deformado. En esta zona se establece el módulo de elasticidad o módulo de Young, el valor más alto del esfuerzo se denomina límite de fluencia. El límite de proporcionalidad se da entre A y B generando una leve curva denotando que la deformación aumentara con mayor rapidez que el esfuerzo aplicado.
- Zona BC: Punto de fluencia, lugar donde la probeta cede abruptamente sin incremento de carga, e algunos casos la carga oscila. Este fenómeno es a causa de las impurezas que impiden el deslizamiento de la red de cristales.
- Zona CD: Como consecuencia de un reacomodamiento de los cristales del material, luego de la fluencia el material sufre un re-endurecimiento, que le da la capacidad de incrementar la resistencia, es decir, logra admitir un incremento de carga. Sin embargo en este periodo las deformaciones son muy pronunciadas. La tensión aumenta hasta alcanzar un valor máximo, denominado esfuerzo último o tensión de rotura.
- Zona DE: Zona de estricción, se presenta una disminución de la sección transversal por estricción con acumulación de deformación hasta la rotura de la probeta, por lo que el esfuerzo se muestra decreciente en la gráfica.

⁶ MATERIALES DE INGENIERIA. [en línea] <<http://materialesdeingenieria2013.blogspot.com.co/2013/05/diagrama-de-esfuerzo-deformacion.html>> [Citado 5 de diciembre del 2016]

Figura 7. Estricción de la probeta



Fuente: <http://apuntescientificos.org/propiedades-materiales.html>

Debido a lo mencionado anteriormente, la curva mostrada se denomina diagrama convencional esfuerzo-deformación unitaria, ya que los cálculos de las tensiones se realizan sobre la suposición de que la sección transversal es constante de inicio a fin.

3.2.3.3 Endurecimiento por deformación plástica en frío⁷.

El endurecimiento por deformación plástica en frío es el fenómeno por medio del cual un metal dúctil se vuelve más duro y resistente a medida es deformado plásticamente. Generalmente a este fenómeno también se le llama trabajo en frío, debido a que la deformación se da a una temperatura “fría” relativa a la temperatura de fusión absoluta del metal.

Teniendo en cuenta la conservación de volumen durante el ensayo $\Delta V = 0$, entonces:

$$A_0 * L_0 = A_f * L_f$$

La variación en porcentaje para el trabajo frío se define de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} * 100$$

⁷ ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN PLÁSTICA EN FRÍO. RECUPERACIÓN, RECRISTALIZACIÓN Y CRECIMIENTO DEL GRANO. [en línea] < <http://www.uca.edu.sv/facultad/clases/ing/m210031/Tema%2011.pdf> > [Citado 10 de enero del 2017]

Dónde:

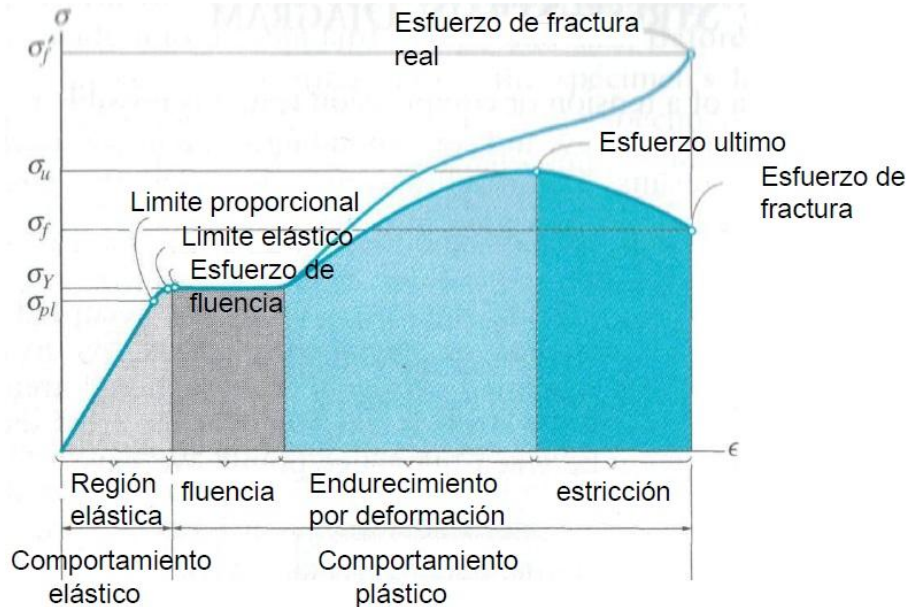
A_0 es el área transversal del material antes de la deformación.

A_d es el área transversal del material después de ser deformado.

La resistencia del material aumenta al aumentar el porcentaje de trabajo en frío, sin embargo la ductilidad del material disminuye.

Una descripción un poco más grafica de las secciones que se encontraran en un diagrama esfuerzo deformación se muestra en la figura 8.

Figura 8. Etapas del diagrama esfuerzo deformación



Fuente: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/2-propiedades-mecanicas-de-los-materiales/>

Distintos metales tienen diferente capacidad para endurecerse cuando se deforman plásticamente. Esa habilidad de endurecerse se mide con el coeficiente de endurecimiento por deformación (n). Entre mayor es n para un metal, más se endurece al ser deformado plásticamente.

Una representación empírica de la curva tensión verdadera σ_r versus deformación verdadera ϵ para muchos metales está dada por la siguiente expresión:

$$\sigma_r = k * \varepsilon^n$$

Donde los parámetros k y n se conocen como coeficiente de resistencia y exponente de endurecimiento por deformación, respectivamente. La ecuación es válida mientras el material se deforma sin un cambio apreciable de volumen.

El exponente n es una propiedad relacionada con la capacidad de estiramiento de un metal durante un proceso de conformado. Mientras más grande es este valor menor es la tendencia del material a causar deformaciones localizadas, lo que posibilita un mejor conformado. También brinda una medida del incremento de la resistencia del material debido a la deformación plástica. Los valores de n para metales dúctiles a temperatura ambiente varían generalmente entre 0,02 y 0,5.

Tomando logaritmos a ambos miembros de la ecuación:

$$\text{Ln } \sigma_r = \text{Ln } k * \varepsilon^n \dots \dots \dots \text{Ln } \sigma_r = \text{Ln } k + n * \text{Ln } \varepsilon \quad \text{Ec 1.7}$$

$$y = \text{Ln } \sigma_r ; x = \text{Ln } \varepsilon \quad \text{Ec 1.8}$$

Se aprecia que la ecuación 1.7 representa una recta $y = a + bx$, con ordenada al origen $a = \text{Ln}(K)$ y pendiente $b = n$. Por lo tanto, los parámetros k y n pueden obtenerse mediante una regresión lineal de la curva $y - x$. Dicho ajuste se realiza usualmente mediante el método de mínimos cuadrados convencional⁸.

3.2.3.4 Porcentaje de elongación⁹.

La ductilidad es el grado en el cual un material se deformara antes de su fractura final. Lo contrario de ductilidad es fragilidad. Cuando se usan materiales dúctiles en elementos de máquinas, se detecta con facilidad la inminente falla, y es ara una falla repentina. También, los materiales dúctiles resisten, bajo condiciones

⁸ MATUSEVICH, Ariel; MANCINI, Reinaldo. *DETERMINACIÓN DEL EXPONENTE "n" DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO DE MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS*. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. San Juan: Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Ensayos Mecánicos, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro Regional Córdoba. 2010. p.2

⁹ *PROPIEDADES DE LOS MATERIALES*. [en línea] < <https://docs.google.com/document/d/1YWT-mh2FEjTNdv2TQ8D2KUphaSvbfGBru55JPG0Ypbs/edit> > [Citado 10 de enero del 2017].

normales, las cargas repetidas sobre los elementos de maquina mejor que los materiales frágiles.

La medida usual de la ductilidad es el porcentaje de elongación o de alargamiento de la material cuando se fractura en una prueba normalizada de tensión. Antes de la prueba, se trazan marcas de calibración en la barra, después de la fractura, se acomodan las partes nuevamente y se toma la nueva lectura de la deformación. El porcentaje de elongación se define de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de elongacion} = \frac{L_f - L_0}{L_0} * 100$$

Dónde:

L_f es la longitud calibrada luego de la fractura de la probeta.

L_0 es la longitud inicial de la probeta, anterior al ensayo.

Desde el punto de vista teórico, se considera que un material es dúctil si su porcentaje de alargamiento es mayor que 5% (los valores menores indican fragilidad). Por razones prácticas. Se aconseja usar un material con 12% o más porcentaje de elongación, para miembros de máquinas sujetas a cargas repetitivas de choque o de impacto.

3.3 ALTERNATIVAS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

3.3.1 Sensor y transductor:

En cualquier maquina o proceso automatizado es necesario disponer de elementos que nos indiquen el estado del proceso o valor de la variable a controlar para que el sistema actúe según lo esperado.

Un sensor se define como un dispositivo sensible que utiliza un fenómeno físico o químico dependiente de la naturaleza y el valor de la magnitud físico química a

medir, esto permite la transducción del estímulo a una señal utilizada directa o indirectamente como medida¹⁰.

Un transductor es un dispositivo que transforma un tipo de variable física (fuerza, presión, temperatura, velocidad, etc.) en otra. Un sensor es un transductor que se utiliza para medir una variable física de interés. Los transductores y sensores pueden clasificarse en dos tipos dependiendo la forma de la señal convertida.

- Sensores analógicos: proporcionan una señal analógica continua, por ejemplo voltaje o corriente eléctrica. Esta señal puede ser tomada como el valor de la variable física que se mide.
- Sensores digitales: producen una señal de salida digital en la forma de un conjunto de bits de estado paralelo o formando una serie de pulsaciones que puedan ser contadas.

3.3.2 Dispositivo para muestrear la deformación

Definiendo la necesidad, en este caso medir la deformación de la probeta simultáneamente al desarrollo del ensayo, se encuentra que existe una amplia gama de sensores que pueden ser aptos para la solución del objetivo del proyecto. Los sensores se clasifican según sus principios de funcionamiento, los cuales se definirán a continuación.

3.3.2.1 Sensores de distancia láser:

Los sensores de distancia láser, son una excelente opción para la medida de distancia o desplazamiento sin contacto mecánico ni rozamiento.

Los sensores para la medición de distancia funcionan según el procedimiento del tiempo de ejecución de luz. Se emite un haz de luz y se refleja a través de un objeto. Se mide el tiempo que el haz de luz necesita para realizar el recorrido de la

¹⁰ *TRANSDUCTORES Y SENSORES. [en línea] < <http://adrillikos.wikidot.com/transductores-y-sensores> > [Citado 5 de diciembre del 2016]*

unidad al objeto y del objeto a la unidad. Ya que la velocidad de la luz es constante, el tiempo de ejecución permite calcular la distancia¹¹.

- Este tipo de sensor presentar gran robustez de trabajo, compacto y muy sensible, con baja resolución y alta confiabilidad. Por otro lado no es de fácil asequibilidad, generalmente son productos importados y pueden llegar a tardar varias semanas hasta la entrega, el costo, comparado con sensores que usan otros principios de funcionamiento, es más elevado. Por los motivos ya mencionados no se optó por el uso de este sensor.

3.3.2.2 Sensor de desplazamiento inductivo:

Los sensores de desplazamiento tipo inductivo, también conocidos como sensores de desplazamiento LVDT (de las siglas en inglés Linear Variable Differential Transformer), basan su funcionamiento en el movimiento de un núcleo dentro del cuerpo del sensor que tiene arrollados los bobinados, de ahí que sea un transformador de núcleo móvil.

Se trata de un sensor sin rozamiento, ya que al ser inductivo, la variación es por campo magnético. Este desplazamiento debidamente calibrado, proporciona una relación entre la inducción y la distancia recorrida.

- Para el desarrollo de este tipo de proyectos, es común el uso de este sensor. Dado a que brindan amplia confiabilidad en la toma de data, son capaces de soportar varios ambientes de trabajo y manejan resoluciones bastante bajas. La asequibilidad es un factor en contra y por otro lado el costo es de un nivel medio comprado con las otras opciones ya mencionadas.

3.3.2.3 Sensores ultrasónicos:

Son sensores que trabajan libres de roces mecánicos y que detectan objetos que van desde pocos milímetros hasta varios metros. El sensor emite un sonido y mide

¹¹ *SENSORES DE DISTANCIA*. [en línea] < http://www.ifm.com/ifmxx/web/pmain/010_070_030.htmlsensores > [Citado 12 de diciembre del 2016]

el tiempo que la señal tarda en regresar. Estos sensores reflejan la señal en un objeto generando un eco que recibirá para luego convertirlo en señal eléctrica¹².

- Los sensores ultrasónicos al tener un comportamiento muy parecido a los sensores laser, brindando capacidades y confiabilidades similares, estarían el mismo rango de oportunidad para el uso de este en el desarrollo de los objetivos. Por su alto costo y demora en la importación, no fue la mejor opción para el sistema de adquisición de deformación de la probeta.

3.3.2.4 Potenciómetros lineales:

Los sensores de desplazamiento potenciométrico o sensores de desplazamiento resistivos están pensados para la medida de posición lineal, distancia lineal o desplazamiento lineal, en rangos bajos y medios. La medida se obtiene mediante el deslizamiento de unas escobillas sobre una pista plástica resistiva, que en función del punto donde se encuentre dará un valor de salida proporcional resistiva en ohmios¹³.

- Este tipo de principio aunque, en su descripción hable de rozamiento mecánico entre escobillas y la pista resistiva, no es una causa que genere baja confiabilidad. Este tipo de sensores trabajan dentro los rangos permitidos y mencionados en los objetivos del proyecto, en cuanto al costo, comparado con los demás maneja un criterio bajo. Se debe tener en cuenta que este tipo de sensores es bastante usado en estos proyectos y es un poco más comercial a la hora de adquirirlo.

Conclusión:

Al presentar las distintas formas en las que se puede tomar la data de deformación, comentar pro y contras a la hora de decidir por cualquiera de estas

¹² *SENSORES ULTRASÓNICOS. [en línea] < http://www.pepperl-fuchs.es/spain/es/classid_182.htm > [Citado 12 de diciembre del 2016]*

¹³ *POTENCIOMETROS LINEALES. [en línea] < http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-distancia_36/Potenci%C3%B3metros-lineales_53/ > [Citado 12 de diciembre del 2016]*

opciones, es evidente que los sensores que más se ajustan a las condiciones de trabajo, especificaciones mencionadas en los objetivos de la tesis, asequibilidad de compra y presupuesto son de tipo inductivo y resistivo. Nuevamente al hacer la comparación entre estos dos, se llega a la conclusión que ambos sensores cumplen de manera satisfactoria las necesidades, pero, el costo y el tiempo de adquisición de compra son las características que hacen decidir el uso de un sensor de tipo resistivo o potenciométrico.

3.3.3 Dispositivo para muestrear la carga

3.3.3.1 Celda de carga:

La celda de carga es una estructura diseñada para soportar cargas de compresión, tensión y flexión, en cuyo interior se encuentra uno o varios sensores de deformación llamados Strain Gages que detectan los valores de deformación.

La celda de carga digital produce esta deformación mediante circuitos wheatstone, que actúan en las bases de la máquina o sistemas de pesaje para encontrar reacciones, una vez obtenida la resistencia, se produce la transducción y se puede obtener el valor que la máquina resiste. La señal de la carga se lleva a un dispositivo electrónico, microchip o computadora central para recopilar los datos totales de la celda de carga.

3.3.4 Transductor de presión:

Un transductor de presión convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Aunque hay varios tipos de transductores de presión, uno de los más comunes es el transductor extensométrico.

La conversión de la presión en una señal eléctrica se consigue mediante la deformación física de los extensómetros que están unidos en el diafragma del transductor de presión y cableados en una configuración de puente de Wheatstone. La presión aplicada al sensor produce una deflexión del diafragma, que introduce la deformación a los medidores. La deformación producirá un cambio de resistencia eléctrica proporcional a la presión.

Conclusión:

Al comparar las capacidades de trabajo, rango, resolución y confiabilidad de estos dos transductores se concluye que son aptos para el uso dentro del proyecto. Por otro lado, teniendo en cuenta la estructura física de la máquina, el montaje para una celda de carga se torna incómodo y muy complejo, contrario al transductor de presión, teniendo en cuenta que el sistema de que genera la carga sobre la probeta es netamente oleo hidráulico y en ese caso no sería necesario intervenir ni afectar la estructura física de la máquina.

3.3.5 Tarjeta para la adquisición de la data

En esta sección se definirá que tipo de tarjeta usar, necesaria y capaz de tomar las señales registradas por los sensores, guardarlas y procesarlas cumpliendo con las especificaciones del proyecto. Esta tarjeta es el puente entre las señales de tensión que envían los sensores y la salida de datos o respuestas presentadas por la interfaz hacia el operador responsable del ensayo.

A continuación se presentaran varias alternativas encontradas en la industria usadas para la adquisición de datos.

3.3.5.1 Controlador lógico programable (PLC)¹⁴:

Un Controlador Lógico Programable, PLC (Programmable Logic Controller), es una computadora utilizada en la ingeniería automática o automatización industrial, para automatizar procesos electromecánicos.

Los PLC son utilizados en muchas industrias y máquinas. A diferencia de las computadoras de propósito general, el PLC está diseñado para múltiples señales de entrada y de salida, rangos de temperatura ampliados, inmunidad al ruido eléctrico y resistencia a la vibración y al impacto. Los programas para el control de funcionamiento de la máquina se suelen almacenar en baterías copia de seguridad o en memorias no volátiles. Un PLC es un ejemplo de un sistema

¹⁴ *CONTROLADOR LOGICO PROGRAMABLE. [en línea]*
<https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_l%C3%B3gico_programable> [Citado 20 de diciembre del 2016]

de tiempo real rígido, donde los resultados de salida deben ser producidos en respuesta a las condiciones de entrada dentro de un tiempo limitado, de lo contrario no producirá el resultado deseado.

- La causa principal para el no uso de este método de adquisición es su alto y rígido desempeño en procesamiento, es una alternativa sobredimensionada para el objeto de este proyecto, por otro lado el alto costo de este sistema hace que se ratifique la no implementación del mismo.

3.3.5.2 Tarjeta de adquisición National Instruments (NI):

Los dispositivos de adquisición de datos (DAQ)¹⁵ multifunción de National Instruments proporcionan entrada y salida analógica y digital con circuitos de contadores/temporizadores, teniendo un catálogo extenso de tarjetas con rangos de procesamiento que van desde 10 bits a 16 bits de resolución y de 10 Ks/s hasta 250 Ks/s.

- National Instruments brinda una gran variedad de tarjetas de adquisición de datos, dando amplios rangos en especificaciones y costos. Esta marca da un soporte confiable de buen rendimiento, confortabilidad, resolución y procesamiento de datos. Esta tarjeta es una opción potencial para la solución del problema, ya que cumple a satisfacción las especificaciones técnicas, pero, se debe tener en cuenta el costo de la misma, comparado con otras opciones, esta está en un rango medio.

3.3.5.3 Placa ARDUINO UNO¹⁶:

El hardware consiste en una placa de circuito impreso con un microcontrolador, puertos digitales y analógicos de entrada/salida, los cuales pueden conectarse a placas de expansión (shields) que amplían las características de funcionamiento

¹⁵ NI myDAQ. [en línea]

<<http://sine.ni.com/np/app/main/p/ap/academic/lang/es/pg/1/sn/n17:academic,n21:16781/fmid/6353/>> [Citado 20 de diciembre del 2016]

¹⁶ ARDUINO. [en línea] <<http://www.arduino.org/products/boards/arduino-uno>> [Citado 20 de diciembre del 2016]

de la placa Arduino. Asimismo posee un puerto de conexión USB desde donde se puede alimentar la placa y establecer comunicación serial con el computador.

Por otro lado, el software consiste en un entorno de desarrollo (IDE) basado en el entorno de Processing y lenguaje de programación basado en Wiring. El microcontrolador de la placa se programa a través de un computador, haciendo uso de comunicación serial mediante un convertidor de niveles RS-232 a TTL serial.

- Este microcontrolador es la opción final y definitiva escogida para el desarrollo del proyecto. Se cumplen las especificaciones técnicas necesarias, es muy comercial en la industria, compatible con softwares conocidos y a un costo módico.

4 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN Y SENSOR POTENCIOMÉTRICO LINEAL

Como se ha mencionado a lo largo del documento, para cumplir con éxito los objetivos es necesaria la instalación de ciertos componentes específicos. En este capítulo se mencionaran los dos sensores usados, el transductor de presión y el sensor potenciométrico lineal, usados para la toma de carga y deformación respectivamente, aclarando y definiendo características, rangos, especificaciones y funcionamiento de los mismos.

4.1 TRANSDUCTOR DE PRESIÓN:

El dispositivo seleccionado para medir la carga ejercida de la maquina universal de ensayos sobre la probeta metálica es un transductor de presión. Como se menciona anteriormente, la maquina trabaja con un sistema ole hidráulico, esto lleva a que sea más cómodo y efectivo el montaje de un transductor de este tipo y no una celda de carga, por esto y por el diseño estructural de la máquina se ha tomado la decisión.

A la hora de escoger el sensor se tuvo en cuenta la carga máxima de la máquina y el diámetro del actuador, que para este caso son de 40 toneladas y 6 pulgadas respectivamente.

$$40 \text{ Ton} = 40.000 \text{ kgf} = 88184,905 \text{ lbf}$$

$$D = 6 \text{ in}, A_p = \pi * \frac{D^2}{4} = 28,274339 \text{ in}^2$$

$$Presion = \frac{8814,905}{28,274339} = 3118,9024 \text{ psi} = 215,04075 \text{ bar}$$

Según las ecuaciones mostradas anteriormente, el transductor de presión debe tener un rango mínimo de 3118,9 psi o 215,04 bar

Figura 9. Transductor de presión



Características:

- Rangos de medición amplios de 0/10 bar a 0/2000 bar.
- Precisión de medición de 0.05, 0.1, 0.5 seleccionable.
- 100% fabricado en acero inoxidable, pequeñas dimensiones y rentable.
- Todas las construcciones soldadas, rígidas y compactas, anti-inflamables y explosivas
- Amplia compensación de temperatura
- Señal de calibración interna del 80% FS.

Tabla 1. Especificaciones transductor de presión

Marca	BCM sensor
Modelo	625 F
Alimentación	9-36 volts
Rango	0/700 bar
Linealidad	$\pm 0.1\%$

Según lo mostrado anteriormente, el transductor es alimentado con tensión en DC entre 9 y 36 volts, arrojando una señal de salida entre 0 y 5 Volts, señal que será

amplificada buscando los rangos de resolución inscritos en los objetivos. La instalación del sensor se hace sobre la línea hidráulica, justamente a la entrada del cilindro o actuador, ya que en los ensayos, la carga de la máquina que soporta la probeta se da cuando el actuador se mueve en dirección de abajo hacia arriba, por esta razón la presión que se debe monitorear es en este punto (ver figura 8). El fluido hidráulico ejerce presión sobre la cara plana del cilindro, que tiene 6 pulgadas de diámetro. Este dato es clave, sabiendo que la gráfica esfuerzo-deformación o carga-deformación se compone como su nombre lo dice, por valores de carga y esfuerzo en su eje ordenado.

$$\text{Area del piston} = A_p = \pi r^2$$

$$\text{Radio del piston} = r = 3 \text{ pulgadas}$$

$$\text{Fuerza} = \text{Presión} * \text{Area}$$

$$\text{Carga aplicada} = P * A_p$$

Figura 10. Posición del transductor de presión en la máquina

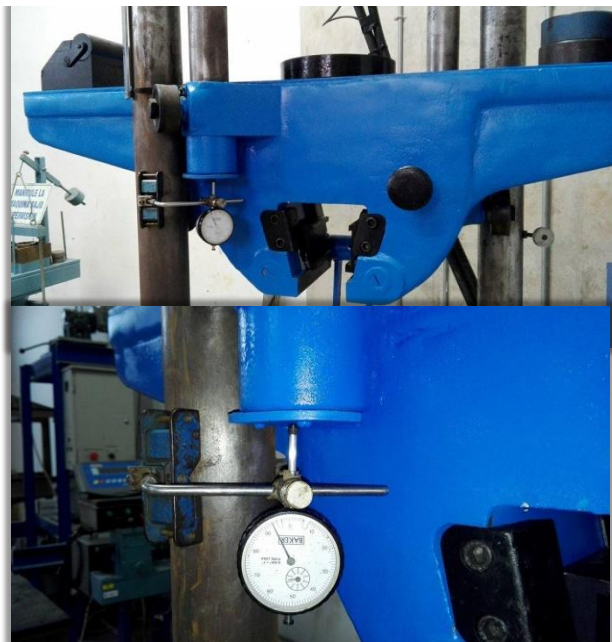


En este caso, las unidades de área están en pulgadas cuadradas y la presión en psi (lbf/pulgada cuadrada), la fuerza estará dada en lbf, teniendo en cuenta que 1 lbf equivale a 4,45 N, se debe hacer la conversión de unidades para dar resultados coherentes. Los valores de carga se darán en KN (Kilo Newton) y los valores de esfuerzo en Mpa (Mega pascal).

4.2 SENSOR POTENCIOMÉTRICO LINEAL

Este sensor es usado para determinar las variaciones en la deformación longitudinal de la probeta metálica, está sujeto a un soporte que a su vez este está unido magnéticamente a una de las columnas por donde desliza el carro móvil de la maquina universal. En definitiva, se ubica y posiciona en forma similar al extensómetro mecánico usado anteriormente en los ensayos (ver figura 9).

Figura 11. Ubicación extensómetro mecánico



Características

- Cuerpo en aluminio.
- Eje en acero inoxidable.
- Material de la resistencia plástico conductor.

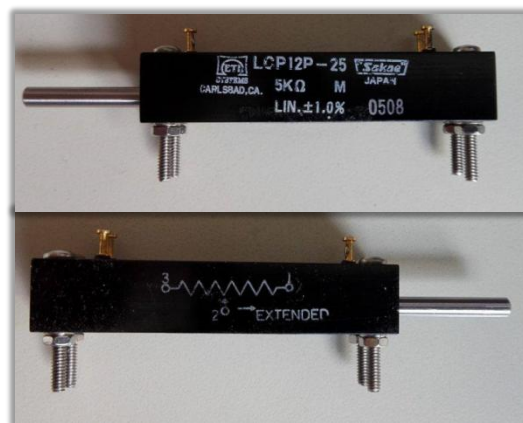
- Esperanza de vida de 20 millones de movimientos.
- Fuerza de fricción 8 oz.

Tabla 2. Especificaciones sensor potenciométrico lineal

Marca	ETI SYSTEMS
Modelo	LCP 12-25
Alimentación	5 volts
Resolución	infinita
Rango	1 pulgada
Linealidad	$\pm 1\%$

Como muestran las especificaciones, este sensor es de tipo potenciométrico, es decir, varía su resistencia permitiendo más o menos paso de tensión, también llamado divisor de voltaje. En este caso, este varía su paso de voltaje o salida entre 0 y 5 volts, esto quiere decir que las diferentes longitudes de la probeta tienen un cambio proporcional a la variación de la tensión.

Figura 12. Sensor potenciométrico lineal



5 ACONDICIONAMIENTO DEL HARDWARE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Los elementos usados para el montaje de la adquisición de datos son los siguientes

- Tarjeta de adquisición de datos.
- Tarjeta PCB.
- Sensor potenciométrico lineal.
- Transductor de presión.
- Fuente externa de alimentación.
- Ordenador.

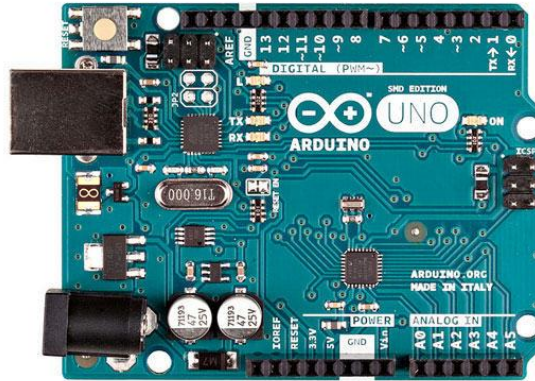
5.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN “ARDUINO UNO”

Para el procesamiento de las señales entregadas por los dos sensores instalados, se escogió la placa Arduino UNO. Dentro de sus características y especificaciones señala 10 bits de resolución en sus salidas digitales. Arduino recibe la señal de entrada en valores de tensión, lo digitaliza y almacena en paquetes de 10 bits o 1023 datos, valor de resolución en número decimal. La tarjeta se comunica con la interfaz gráfica de usuario mediante uno de los puertos USB del ordenador. La placa posee una fuente de voltaje interna que cumple la función de energizar los sensores.

$$\frac{5 [V]}{x} = \frac{1023 [bit]}{1 [bit]}; x = 4,8 mV$$

La resolución mínima de lectura para una placa Arduino UNO es de 4,8 mV.

Figura 13. Placa ARDUINO UNO



Fuente: www.arduino.cc

5.2 ORDENADOR

Es una maquina compuesta por un hardware y un software, capaz de recibir y procesar datos para convertirlos en información. Funcionalmente compuesta por una unidad de procesamiento, una memoria principal y periféricos de entrada y salida.

El ordenador es usado para soportar la interfaz gráfica diseñada en labview, procesar cada cálculo inscrito en la misma y arrojar una respuesta visual y cómoda al usuario.

Tabla 3. Especificaciones del ordenador.

Marca	ETI SYSTEMS
Procesador	LCP 12-25
Memoria RAM	5 volts
Disco duro	infinita
Sistema Operativo	1 pulgada

Figura 14. Ordenador de escritorio.

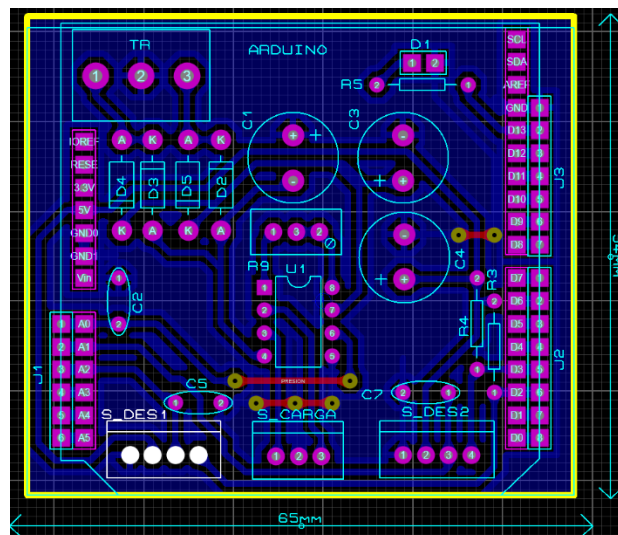


5.3 TARJETA PCB PARA ACONDICIONAMIENTO

Para la comunicación entre los sensores y la tarjeta de adquisición es necesario diseñar un montaje óptimo teniendo en cuenta los requerimientos y necesidades de cada sensor, sin obviar la capacidad de la tarjeta.

Para la adquisición de datos se diseñó una tarjeta PCB de fácil comprensión, aprovechando las características de los sensores como el voltaje de alimentación y la señal de salida dada en unidades de voltaje, no requieren de acondicionamientos extra. Para reducir el rizado o ruido eléctrico y estabilización de la fuente de alimentación al haber cambios bruscos de tensión, fue necesario usar cable con apantallamiento y condensadores o capacitores.

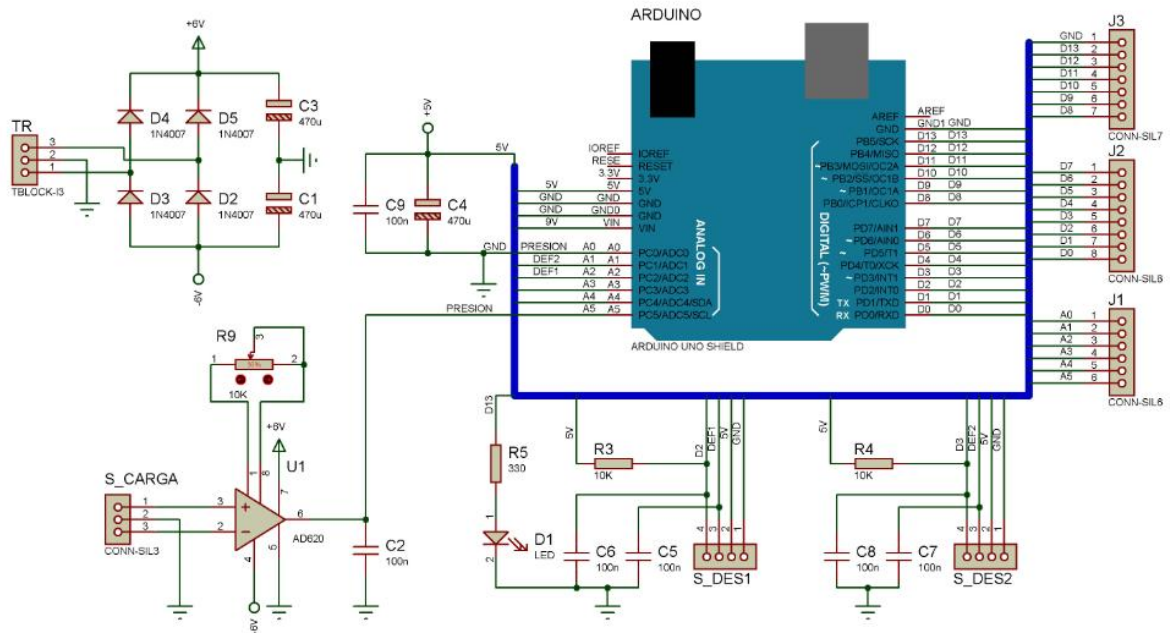
Figura 15. Placa PCB de acondicionamiento.



El circuito de acondicionamiento básicamente se divide en tres partes.

- Líneas de alimentación para los sensores
- Acondicionamiento del sensor potenciométrico lineal.
- Acondicionamiento del transductor de presión.

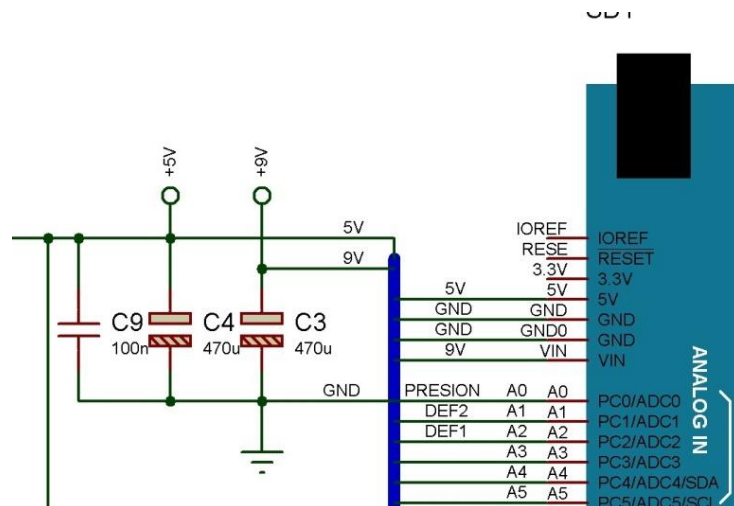
Figura 16. Circuito representativo de acondicionamiento



5.3.1 Líneas de alimentación para los sensores.

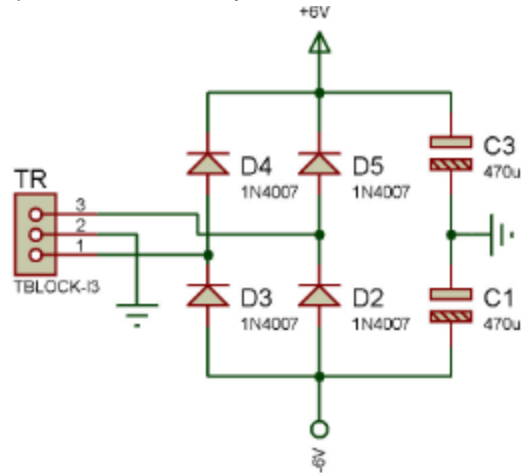
El diseño de alimentación para el sensor que mide la deformación de la probeta es básico, la placa Arduino uno posee salida de alimentación de 5 volts, con esta línea se energiza el sensor y se agrega el capacitor encargado de disminuir el ruido eléctrico y estabilizar la tensión, anteriormente ya se había mencionado.

Figura 17. Circuito representativo de alimentación a los sensores



Para energizar el amplificador de instrumentación AD 620, encargado de generar ganancia y amplificar la señal proveniente del transductor de presión, se requiere tensión de + 6 volts y -6 volts, por esto, se usa un transformador capaz de cumplir estas condiciones de trabajo.

Figura 18. Acondicionamiento para fuente de +6 y -6 volts

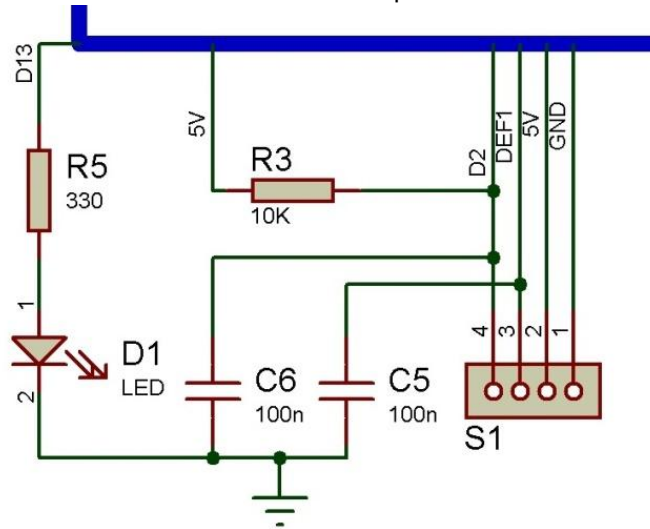


5.3.2 Acondicionamiento del sensor potenciométrico lineal.

Es un circuito básico, el sensor se alimenta a 5 V por el pin dos (2), el pin uno (1) es la referencia o tierra y la variación de la señal que está entre 0 y 5 V entra por el pin tres (3). Según lo anterior y recordando que la placa posee una resolución de 1023 bits, se aplica la misma regla de tres para encontrar el valor de resolución mínima de lectura para el sensor de desplazamiento.

$$\frac{25,4 [mm]}{x} = \frac{1023 [bit]}{1 [bit]} ; x = 0,0248 mm = 0,976378 mil$$

Figura 19. Circuito de acondicionamiento del sensor potenciométrico.



5.3.3 Acondicionamiento del transductor de presión.

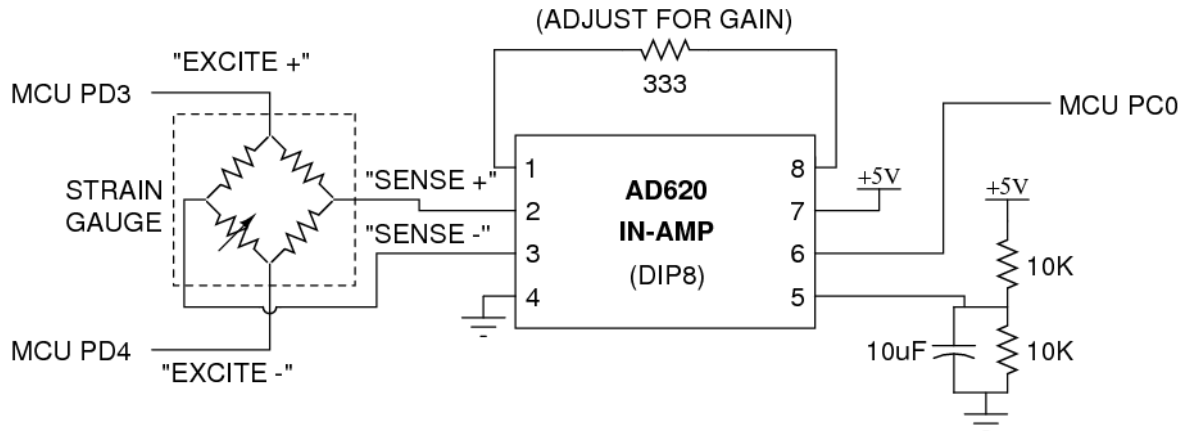
Para este transductor si fue necesario un montaje un poco más sofisticado, se requería amplificar la señal que arroja el sensor, con el fin de conseguir la resolución mencionada en los objetivos, para esto, se usó un amplificador de instrumentación AD620.

5.3.3.1 Amplificador de instrumentación AD620:

El AD620 es una instrumentación de bajo costo y alta precisión, amplificador que requiere sólo una resistencia externa para ganancias de 1 a 10.000. Además, el AD620 dispone de un encapsulado de 8 derivaciones, que es más pequeño que otros diseños discretos y ofrece menor potencia (sólo corriente de alimentación máxima de 1,3 mA), apto para aplicaciones portátiles (o remotas) con pilas. El AD620, con su alta precisión, es ideal para su uso en la adquisición de datos de precisión como básculas de pesaje e interfaces de transductores. Además, el bajo nivel de ruido, la baja corriente de polarización de entrada y la baja potencia hacen al AD620 muy adecuado para aplicaciones médicas, tales como Como ECG y monitores de presión arterial no invasiva. Además, el AD620 está bien adecuado para aplicaciones multiplexadas con un tiempo de sedimentación de 15 μ s a

0,01%, y su costo es lo suficientemente bajo como para permitir diseños con una entrada de amplificación por canal¹⁷.

Figura 20. Amplificador de instrumentación AD620.



Fuente: <https://i.stack.imgur.com/zzWky.png>

A continuación se muestra el acondicionamiento para las señales del sensor y los pines usados en la placa Arduino UNO. La configuración del amplificador es explícita, muestra que las señales provenientes del sensor ingresan por los pines 2 y 3, la ganancia se logra ubicando un trimmer entre los pines 1 y 8, la alimentación del amplificador se hace por los pines 4 y 7, y por último, la señal amplificada y diferenciada sale por el pin 6 del amplificador, entrando a la placa Arduino UNO por el pin digital A0.

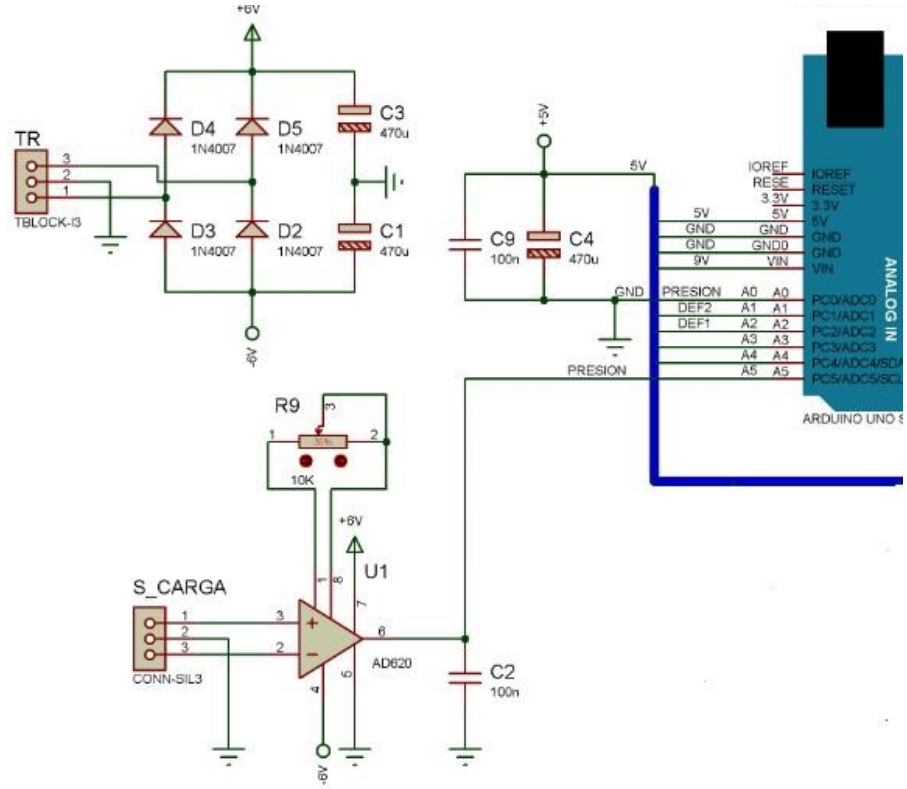
Para la resolución de la carga se tiene que por cada 100 mV hay 100 KN, a esto se le adiciona la amplificación o ganancia de 10 veces la señal procedente del sensor, entonces:

$$\frac{100 \text{ mV} * 10}{4,8 \text{ mV}} = \frac{100 \text{ KN}}{x \text{ KN}} = 0,48 \text{ KN} = 48,94638 \text{ kgf}$$

La resolución para la carga es de 48,94638 kgf.

¹⁷ ONE TECHNOLOGYWAY. AD 620. [en línea] < <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf> > [Citado 10 de enero del 2017]

Figura 21. Circuito de acondicionamiento para el transductor de presión



6 DISEÑO DE INTERFAZ DE USUARIO EN LABVIEW

6.1 LABVIEW¹⁸

LabVIEW es un entorno de desarrollo integrado y diseñado específicamente para ingenieros y científicos. Nativo de LabVIEW es un lenguaje de programación gráfica (G) que utiliza un modelo de flujo de datos en lugar de líneas secuenciales de código de texto, lo que le permite escribir código funcional utilizando un diseño visual que se asemeja a su proceso de pensamiento. Esto significa que usted emplea menos tiempo preocupándose por el por punto y coma y la sintaxis y más tiempo resolviendo los problemas que importan.

6.2 INTERFAZ GRAFICA

Con el fin de asegurar la correcta comunicación entre el usuario y la máquina, se diseñó una interfaz de adquisición y procesamiento de datos, desarrollada en el software labview, que retiene la información recolectada por cada sensor y con esto generar documentación específica de una prueba de laboratorio representativa a un ensayo de tracción. La interfaz en general pretende dos cosas.

- Adquirir la data carga-deformación, exportarla a un archivo tipo Excel sirviendo de información base para el desarrollo del laboratorio, hallando gráficas y determinando sobre ellas las zonas y puntos clave que definen las propiedades de los materiales.
- Tomar la información adquirida por hardware instalado, procesarla para generar graficas carga-deformación, esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril y esfuerzo real-deformación real en tiempo real. Presentar resultados finales en donde se incluyan: limite elástico (σ_e), esfuerzo máximo (σ_{max}), esfuerzo de ruptura (σ_w) y porcentaje de elongación ($\%E$).

¹⁸ LABVIEW. [en línea] <<http://www.ni.com/labview/esa/>> [Citado 10 de enero del 2017]

Inicialmente se presenta en la ventana principal la solicitud de dos entradas, diámetro inicial (D_0) y longitud inicial de la probeta (L_0) que el usuario debe ingresar para iniciar la prueba.

Figura 22. Datos de entrada



El formulario muestra dos campos de entrada de texto. El primer campo está etiquetado como "Longitud (m)" y el segundo como "Diámetro (m)". Debajo de estos campos, hay un campo de entrada etiquetado como "MATERIAL".

En la ventana principal se observa en cuadros de texto los datos ingresados, en otros indicadores se presentara el muestreo de la carga y esfuerzos en KN y MPa respectivamente, del alargamiento en mm y deformación ingenieril y real en m/m, simultáneamente al desarrollo de la prueba. Adicionalmente se presentan cuatro pulsadores, uno representando final de la prueba, cortando la entrada de señal de los sensores "STOP", otro nombrado "START" dando inicio a la prueba y los otros dos nombrados "Estudiante" y "Docente" que más adelante se aclarara su función.

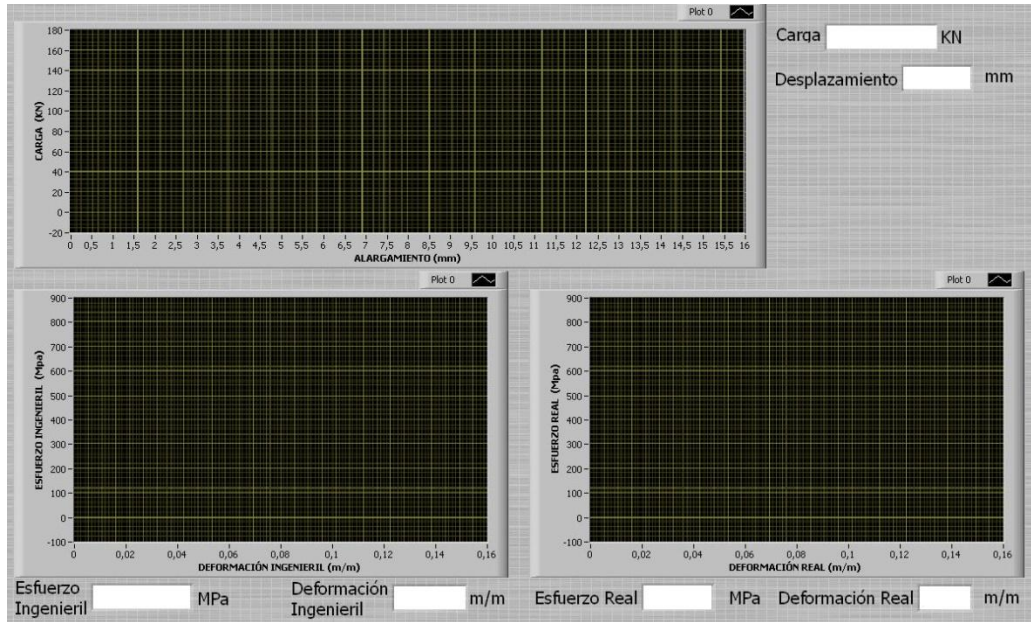
Figura 23. Pulsadores.



El panel de control contiene un menú desplegable etiquetado "Puerto" con un icono de luz verde y el valor "COM3" seleccionado. A la derecha hay cuatro botones: un botón "START" con un triángulo verde, un botón "STOP" con un cuadrado rojo, un botón "GUARDAR DATOS" con el texto "ESTUDIANTE" debajo, y un botón "DOCENTE" con un fondo amarillo.

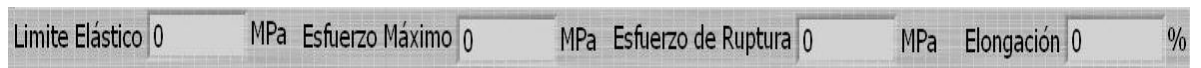
Como se ha mencionado, las gráficas se dibujan simultáneamente al desarrollo de la prueba, dando una visión más clara al usuario de lo sucedido en una prueba de tracción.

Figura 24. Gráfica y muestreo de las señales entrantes



Por último, al momento de fracturarse la probeta, el usuario debe detener la prueba pulsando “STOP” con esto el programa no recibirá más datos procedentes de los sensores. Al finalizar, la interfaz muestra las gráficas representativas de carga-deformación, esfuerzo ingenieril-deformación ingenieril y esfuerzo real-deformación real, adicionalmente se exhiben en bloques de salida, los siguientes datos: límite elástico, esfuerzo máximo, esfuerzo de ruptura y porcentaje de elongación, correspondientes a las propiedades mecánicas del material tratado en el ensayo.

Figura 25. Resultados finales de la prueba.



Según el tipo de usuario que realizó el ensayo, se presentan dos pulsadores u opciones. Al pulsar “Estudiante”, automáticamente se genera un archivo tipo Excel con una tabla mostrando cada dato de carga (KN) y deformación o alargamiento (m). Al elegir la segunda opción, “Docente”, inmediatamente terminada la prueba se exportara un archivo tipo Excel conteniendo una tabla con las datos de: carga (KN), longitud calibrada (m), delta de longitud (m), deformación unitaria ingenieril e (m/m), deformación unitaria real ε (m/m), esfuerzo ingenieril σ MPa y σ_{real} esfuerzo real MPa .

Tabla 4. Muestreo forma "DOCENTE"

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
8391	171.41	0.10265	0.0026	0.0265	0.01135895	831.60337	853.640866
8392	171.41	0.10265	0.0026	0.0265	0.01135895	831.60337	853.640866
8393	171.85	0.10267	0.0026	0.0267	0.01144356	833.73805	855.998863
8394	171.85	0.10265	0.0026	0.0265	0.01135895	833.738057	855.8321158

Tabla 5. Muestreo forma "ESTUDIANTE"

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)
33791	164.73	0.10218
33792	164.73	0.10218
33793	165.18	0.10221
33794	165.18	0.10221

7 PRUEBAS DEL SISTEMA Y RESULTADOS

Para demostrar la utilidad real de todos y cada uno de los puntos planteados a lo largo del proyecto, en este capítulo se presentan algunas de las pruebas de tracción realizadas en la maquina universal de ensayos marca TREBEL.

Como se mencionó anteriormente, la maquina está capacitada para proporcionar una carga máxima de 40 toneladas y una deformación o desplazamiento máximo de 25,4 mm.

Con el fin de demostrar la funcionalidad de los sensores, muestreo y procesamiento de la tarjeta, capacidad de cálculo de la interfaz, se realizaron pruebas en probetas de acero 1045 y acero estructural A36.

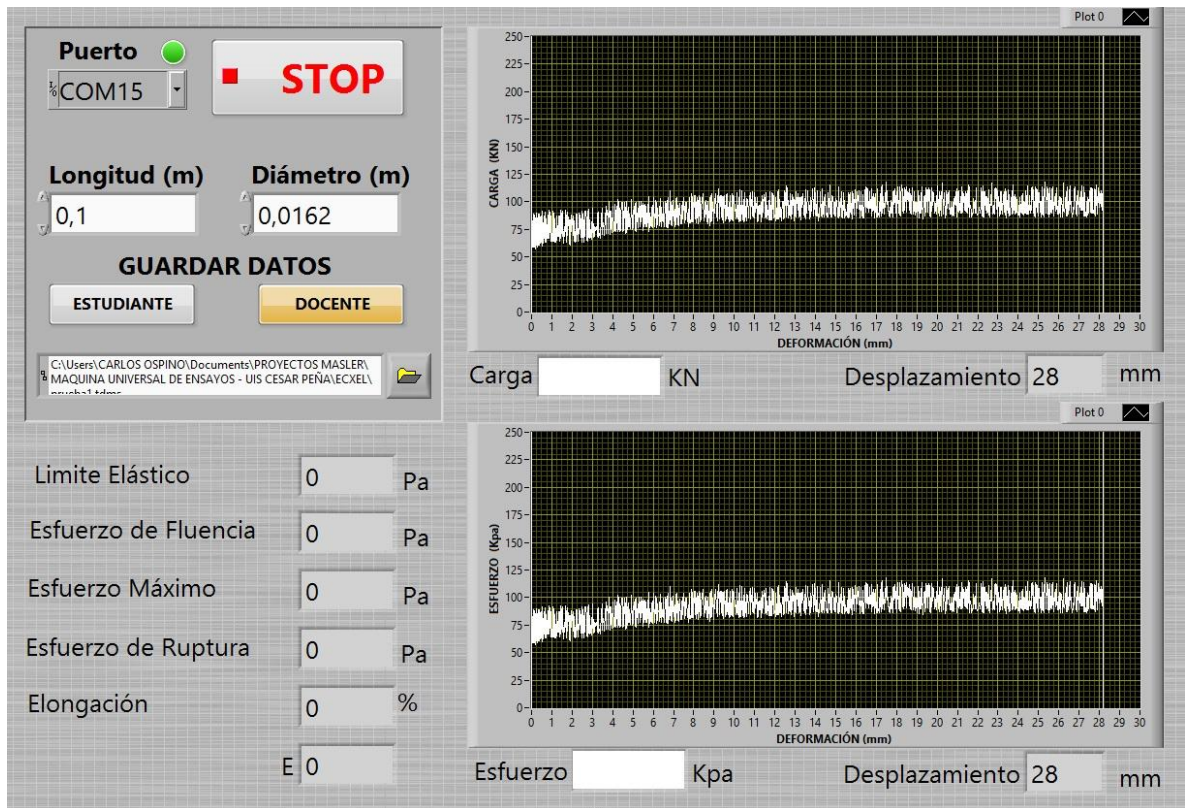
7.1 PRUEBAS INICIALES

Figura 26. Probeta de acero estructural A36



Inicialmente se realizó el ensayo en un acero estructural, este material por su composición y en una prueba estándar de tracción alcanza un porcentaje de deformación aproximado de 30%, el sensor instalado muestrea hasta 28,2 mm de deformación, quiere decir que es posible medir la deformación elástica para este material. La longitud inicial de la probeta fue de 0.1 m y el diámetro inicial de 0,0162 m. Quiere decir que la longitud final aproximada es de más o menos 30 mm.

Figura 27. Prueba para acero estructural A36.



Como se había indicado anteriormente, se ingresa el valor inicial de la longitud y área transversal de la probeta, en seguida se selecciona el tipo de Excel que se requiere (estudiante o docente).

Al iniciar la prueba, automáticamente inician a dibujarse los gráficos carga-deformación y esfuerzo-deformación. Justamente debajo de cada una de las gráficas se puede evidenciar el valor para la carga y la deformación en cada instante de tiempo.

La figura mostrada se tomó luego de finalizar la prueba, por esto el valor máximo de deformación es de 28 mm, dado a que es el rango máximo del sensor instalado y la probeta alcanzo un valor más alto en deformación.

Figura 28. Falla de la probeta de acero estructural.



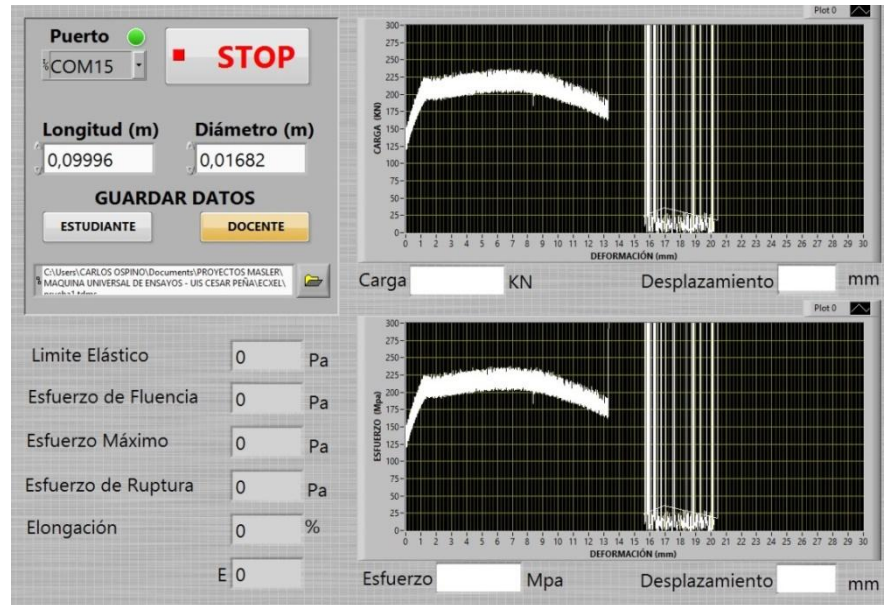
Como se evidencia en la imagen, se logra la estricción de la probeta. Al momento de la fractura se observa la forma de ruptura sin anomalía.

Figura 29. Probetas de acero 1045.



El acero 1045 tiene un porcentaje de deformación mucho menor que el acero estructural, aproximadamente del 12 %. Dicho lo anterior, el sensor de deformación instalado logra tomar la información de inicio a fin para la prueba del acero 1045, mostrando la elongación máxima en el momento de la fractura.

Figura 30. Prueba para acero 1045.



Las condiciones iniciales para la probeta de acero 1045 son: una longitud inicial de 0,09996 m y diámetro inicial de 0,01682 m.

La figura muestra un proceso normal de ensayo de tracción, con deformación máxima de más o menos 13 mm. Los picos y fluctuaciones encontradas más delante de la ruptura se deben a que en el momento de fracturarse la probeta se generan señales y ruidos debido a las altas cargas suministradas por la máquina y que en un instante de tiempo muy corto se vuelven cero.

Figura 31. Falla de la probeta de acero 1045



Figura 32. Falla de las probetas ensayadas.



Los datos y graficas mostrados anteriormente fueron tomados en las primeras pruebas comprobando el buen funcionamiento de los sensores.

A pesar de que el muestreo fue exitoso y se lograron las resoluciones esperadas y mencionadas en los objetivos como se muestra en la tabla 4, los gráficos se muestran distorsionados y no muy limpios.

Tabla 6. Muestreo prueba uno para acero 1045.

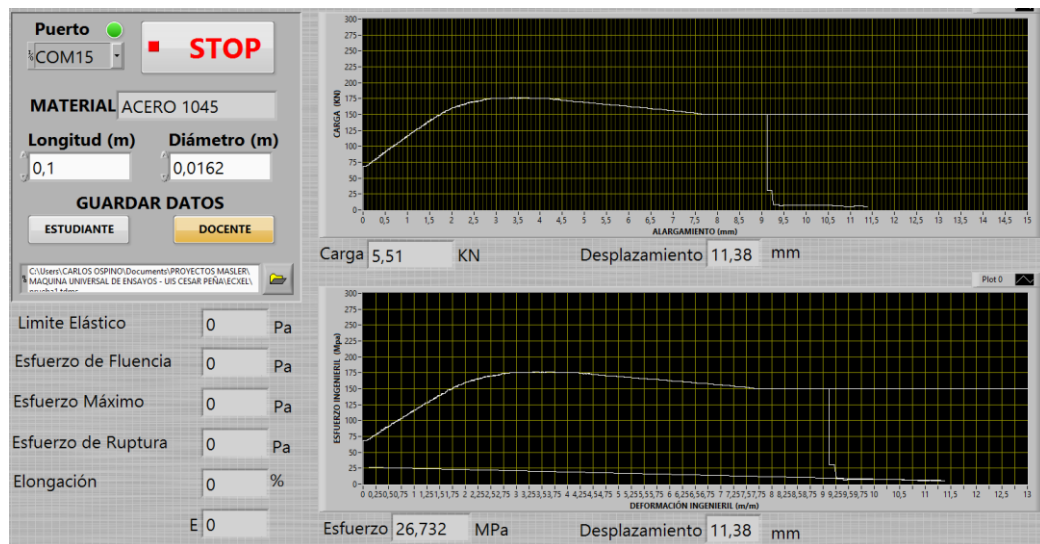
Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
1806	84.23	0.10036	0.00036	0.0036	0.00156065	408.645659	410.1167838
1807	84.23	0.10039	0.00039	0.0039	0.00169045	408.645659	410.2393775
1808	84.67	0.10039	0.00039	0.0039	0.00169045	410.780339	412.3823826
1809	84.67	0.10036	0.00036	0.0036	0.00156065	410.780339	412.2591485
1810	84.67	0.10036	0.00036	0.0036	0.00156065	410.780339	412.2591485

La tabla anterior muestra las variaciones de carga y deformación para cada sensor, se puede observar una variación en carga de 0.44 KN equivalentes a 44.867 kgf y de 0.03 mm para la deformación, cumpliendo con los objetivos específicos planteados con respecto a la resolución de cada uno de estos.

7.2 PRUEBAS FINALES

Con la verificación del muestreo, el paso siguiente es aumentar el número de datos registrados bajando el margen de error. Dentro del muestreo se hacen paquetes de datos (20) adquiridos en periodos de tiempo específicos (2 milisegundos), se encuentra el valor promedio de ese paquete de datos y dicho valor será el que se grafique. Este proceso se hace tanto para el muestreo de carga como el de deformación, generando un gráfico más limpio y detallado como lo muestra la figura 37.

Figura 33. Prueba 2 para acero 1045.



Un tramo de la tabla de datos generada al hacer la segunda prueba para el acero 1045, en el momento en que la carga comienza a descender se muestra a continuación:

Tabla 7. Muestreo prueba dos para acero 1045.

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
9702	173.63	0.10444	0.00444	0.0444	0.01886686	842.373808	879.775205
9703	173.63	0.10444	0.00444	0.0444	0.01886686	842.373808	879.775205
9704	172.74	0.10444	0.00444	0.0444	0.01886686	838.055933	875.265616
9705	172.74	0.10444	0.00444	0.0444	0.01886686	838.055933	875.265616

Luego de un ajuste a la ventana principal de la interfaz gráfica, se realiza una tercera prueba para el acero 1045, visualizando un comportamiento coherente para los datos adquiridos por el programa.

Figura 34. Prueba 3 para acero 1045.



En cada gráfica, al finalizar la prueba y dándose el punto de ruptura de la probeta, se genera una fuerte vibración en la maquina generando una serie de trazos que se deben omitir. Se puede evidenciar que la prueba da fin justo en el instante que se inicia un trazo horizontal.

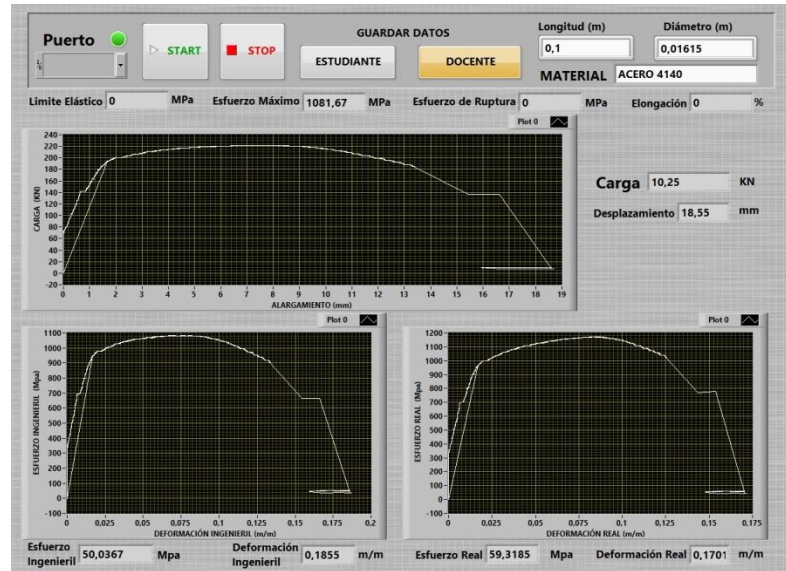
La tabla obtenida para esta tercera prueba en el instante que la carga empieza a disminuir se muestra a continuación:

Tabla 8. Muestreo prueba tres para acero 1045.

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
36746	170.07	0.10306	0.0030	0.0306	0.03014116	825.102307	850.3504373
36747	170.07	0.10306	0.0030	0.0306	0.03014116	825.102307	850.3504373
36748	169.18	0.10306	0.0030	0.0306	0.03014116	820.784431	845.900435
36749	169.18	0.10306	0.0030	0.0306	0.03014116	820.784431	845.900435

Se realiza una última prueba para un acero 4140. El grafico 35 muestra un comportamiento normal para un acero de este tipo.

Figura 35. Prueba Acero 4140



7.3 GRÁFICOS REPRESENTATIVOS PARA LOS DIFERENTES MATERIALES ENSAYADOS

7.3.1 Acero A36

Al comparar los resultados arrojados por la interfaz y los representativos para este acero, se muestra un sector de fluencia y representación gráfica común del acero. Los datos registrados tienen una leve variación debido a que fueron las primeras pruebas sin calibración de los sensores. La carga máxima que se obtiene en la interfaz está alrededor de los 100 KN con alargamiento máximo de 28.2 mm. Los datos que se desean obtener están con una carga máxima de alrededor 83 KN y alargamiento máximo de 31.7 mm.

- Datos de la interfaz:

Carga maxima = 100 KN

D inicial = 0.0162 m

Alargamiento maximo = 28.2 mm

Esfuerzo maximo = 485.1545 Mpa

- Datos esperados:

Carga maxima = 83.35 KN

D inicial = 0.016 m

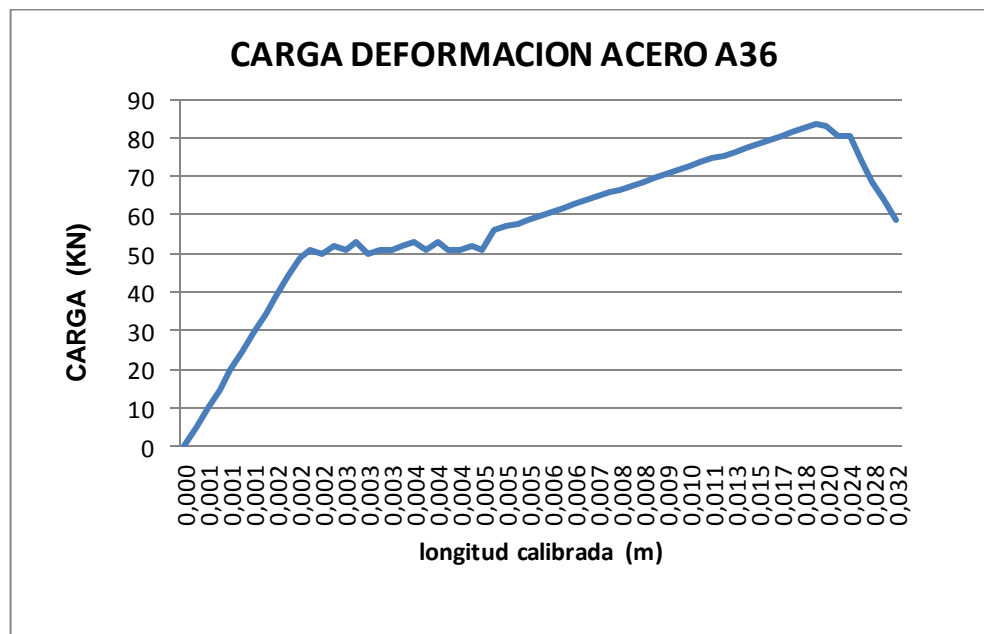
Alargamiento maximo = 31.75 mm

Esfuerzo maximo = 412.14 Mpa

Tabla 9. Datos esperados acero A36.

CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Esfuerzo (Mpa)
82.37586	0.0182626	409.7029579
83.356525	0.0190246	414.5803741
82.8661925	0.0201676	412.141666
80.41453	0.022606	399.9481256
80.41453	0.023622	399.9481256

Figura 36. Grafico carga vs alargamiento esperado acero A36



7.3.2 Acero 1045:

Las pruebas realizadas sobre el acero 1045 se hicieron con los sensores calibrados y sin calibrar, demostrando la amplia variación pero aun así el comportamiento normal al trazar el grafico. En total se hicieron 3 tomas de las cuales, la primera sin haber calibrado sensores mostro un valor de error amplio con distorsión de trazado. Para las dos pruebas restantes se calibraron los sensores y se varió la velocidad de muestreo, esto ayudo a tomar valores más precisos y cercanos a una data común para este acero.

- Datos de la interfaz ensayo 2:

Carga maxima = 174.52 KN

D inicial = 0.0162 m

Alargamiento maximo = 7.64 mm

Esfuerzo maximo = 846.6916 Mpa

Tabla 10. Datos de la interfaz acero 1045 ensayo dos.

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
9618	174.52	0.010427	0.0042	0.0427	0.01815937	846.6916	882.845418
9619	174.52	0.010427	0.0042	0.0427	0.01815937	846.6916	882.845418
9620	174.07	0.010427	0.0042	0.0427	0.01815937	844.5084	880.569000
9621	174.07	0.010427	0.0042	0.0427	0.01815937	844.5084	880.569000
9622	174.07	0.010427	0.0042	0.0427	0.01815937	844.5084	880.569000

- Datos de la interfaz ensayo 3:

Carga maxima = 170.07 KN

D inicial = 0.0162 m

Alargamiento maximo = 7.11 mm

Esfuerzo maximo = 847.38 Mpa

Tabla 11. Datos de la interfaz acero 1045 ensayo tres.

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
36080	170.07	0.1027	0.0027	0.027	0.02664193	825.10230	847.380069
36081	170.07	0.10267	0.00267	0.0267	0.02634978	825.10230	847.1325383
36082	169.63	0.10267	0.00267	0.0267	0.02634978	822.96762	844.9408624
36083	169.63	0.10267	0.00267	0.0267	0.02634978	822.96762	844.9408624
36084	169.63	0.10267	0.00267	0.0267	0.02634978	822.96762	844.9408624

- Datos esperados:

Carga maxima = 184.365 KN

D inicial = 0.01608 m

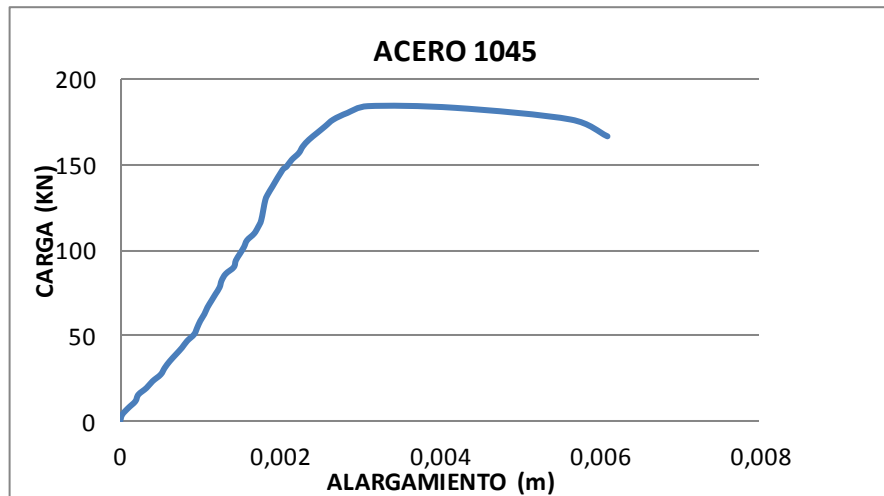
Alargamiento maximo = 6.096 mm

Esfuerzo maximo = 907.853 Mpa

Tabla 12. Datos esperados acero 1045.

Carga (KN)	Longitud Calibrada (m)	Esfuerzo (Mpa)
180.44236	0.0028448	888.5369911
184.36502	0.0030988	907.8530126
183.384355	0.004191	903.0240072
176.5197	0.0056388	869.2209695

Figura 37. Grafico carga vs alargamiento esperado acero 1045.



7.3.3 Acero 4140:

Para el acero 4140 se hizo una sola toma de datos, la data y gráficos trazados por la interfaz se asemeja en un alto porcentaje a lo esperado.

- Datos de la interfaz:

Carga maxima = 221.58 KN

D inicial = 0.01615 m

Alargamiento maximo = 11.4 mm

Esfuerzo maximo = 1169.61 Mpa

Tabla 13. Datos de la interfaz acero 4140.

Time*	CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Delta L (m)	Deformación Ingenieril (m/m)	Deformación Real (m/m)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real (MPa)
55149	221.58	0.1081	0.0081	0.081	0.07788654	1081.67209	1169.287528
55150	221.58	0.10813	0.0081	0.0813	0.07816402	1081.67209	1169.612029
55151	221.13	0.1081	0.0081	0.081	0.07788654	1079.47535	1166.912858
55152	221.13	0.10813	0.0081	0.0813	0.07816402	1079.47535	1167.2367
55153	221.13	0.10813	0.0081	0.0813	0.07816402	1079.47535	1167.2367

- Datos esperados:

Carga maxima = 215.746 KN

D inicial = 0.0162 m

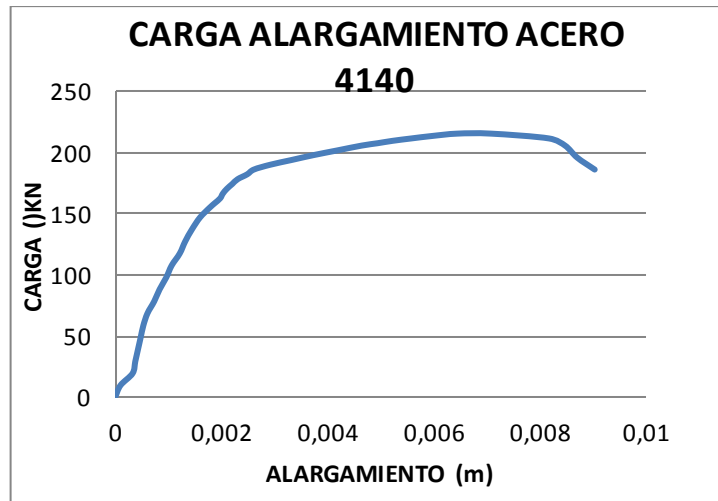
Alargamiento maximo = 9.0424 mm

Esfuerzo maximo = 1046.7004 Mpa

Tabla 14. Datos esperados acero 4140.

CARGA (KN)	Longitud Calibrada (m)	Esfuerzo (Mpa)
213.78497	0.005969	1037.185038
215.7463	0.0064516	1046.700497
215.7463	0.0070866	1046.700497
211.82364	0.0081788	1027.669579
205.93965	0.0084836	999.1232017

Figura 38. Grafico carga vs alargamiento esperado acero 4140



7.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS:

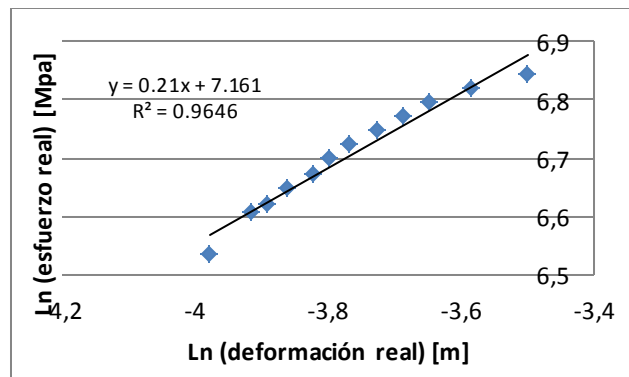
7.4.1 Acero 1045

- A continuación se presentan los valores patrón o teóricos para el acero 1045.

Tabla 15. Valores teóricos para acero 1045.

Acero 1045 valores teóricos							
σ Máximo real [MPa]	σ Ruptura real [MPa]	Longitud inicial [m]	Longitud final [m]	Elongación %	Ln(k)	k [MPa]	n
940.56939	870.5778	0.1008	0.106896	6.04762	7.161	1228.84	0.21

Figura 39. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045.



- Valores experimentales para el acero 1045.

Tabla 16. Valores experimentales para acero 1045.

Acero 1045 valores experimentales								
	σ máximo real [MPa]	σ ruptura real [MPa]	Longitud inicial [m]	Longitud final [m]	Elongación %	Ln(k)	k [MPa]	n
1	853.144	788.2916	0.1	0.10764	7.64	6.983	1078.15	0.187
2	851.691	740.4999	0.1	0.10708	7.08	7.015	1113.26	0.205

Figura 40. Figura 39. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045 probeta 1.

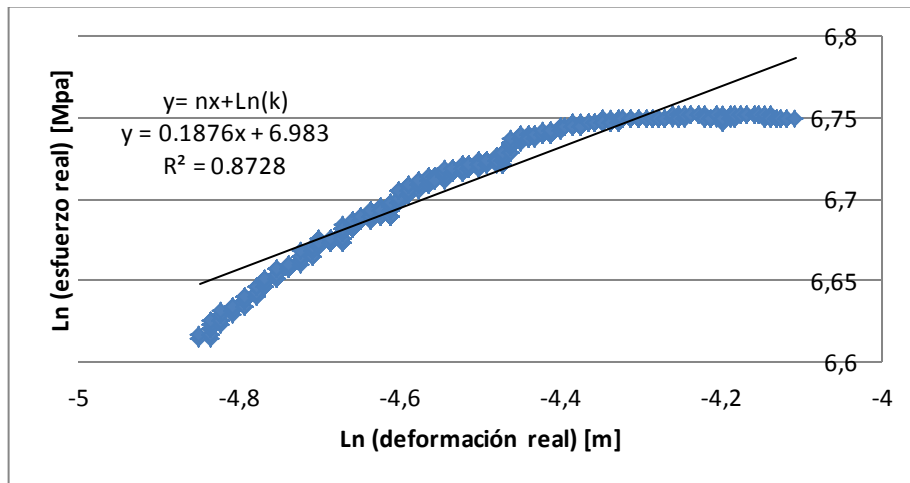


Figura 41. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 1045 probeta 2.

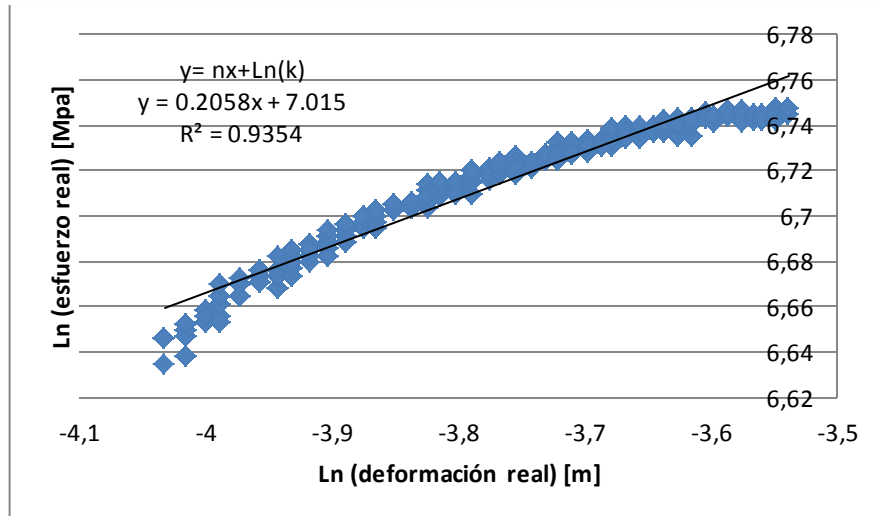


Tabla 17. Porcentajes de error para acero 1045 probeta 1.

σ máximo real [MPa]		σ ruptura real [MPa]		n		k [MPa]	
Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
940.56	853.144	870.577	788.2916	0.21	0.1876	1228.842	1078.1479
9.293 % error		9.45 % error		10.66 % error		12.26 % error	

Tabla 18. Porcentajes de error para acero 1045 probeta 2.

σ máximo real [MPa]		σ ruptura real [MPa]		n		k [MPa]	
Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
940.569	851.691	870.577	740.4999	0.21	0.2058	1228.842	1113.2067
9.44 % error		14.9 % error		2 % error		9.41 % error	

Para las tablas anteriores se evidencian las variaciones en porcentaje de las medidas teóricas y experimentales para el acero 1045.

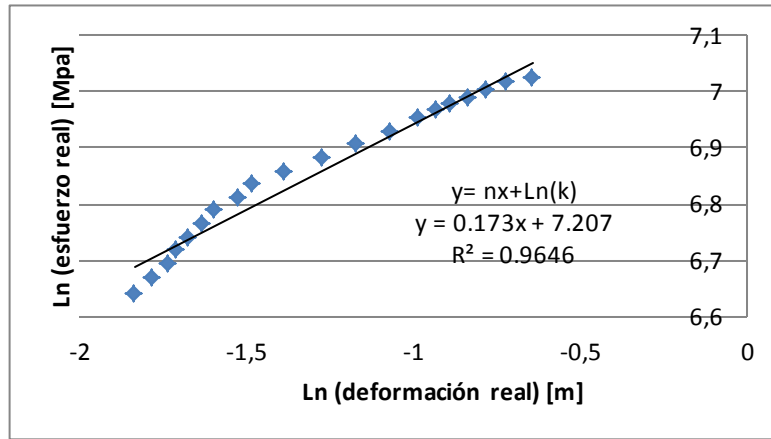
7.4.2 Acero 4140.

- A continuación se presentan los valores patrón o teóricos para el acero 4140.

Tabla 19. Valores teóricos para acero 4140.

Acero 4140 valores teóricos							
σ máximo real [MPa]	σ ruptura real [MPa]	Longitud inicial [m]	Longitud final [m]	Elongación %	Ln(k)	k [MPa]	n
1046.7	903.97	0.1012	0.1084	7.115	7.207	1349.4	0.173

Figura 42. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 4140.



- Valores experimentales para el acero 4140.

Tabla 20. Valores experimentales para acero 4140.

Acero 4140 valores experimentales							
σ máximo real [MPa]	σ ruptura real [MPa]	Longitud inicial [m]	Longitud final [m]	Elongación %	Ln(k)	k [MPa]	n
1172.163	1020.63	0.1	0.1134	13.37	7.38	1608.29	0.157

Figura 43. Curva de plasticidad linealizada para obtener n y k acero 4140.

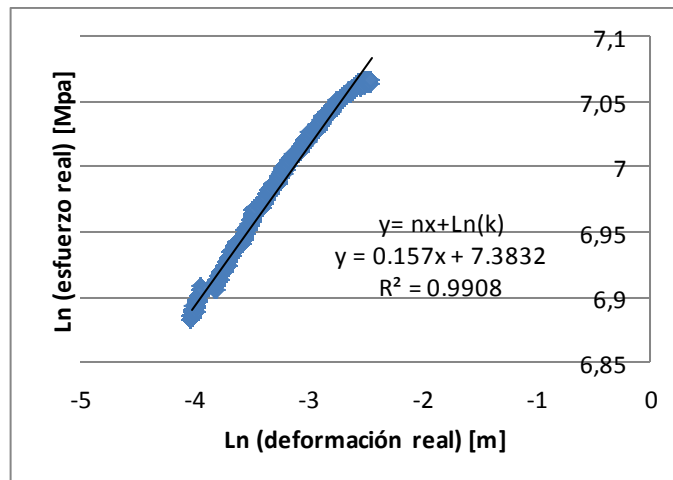


Tabla 21. Porcentajes de error para acero 4140.

σ máximo real [MPa]		σ ruptura real [MPa]		n		k [MPa]	
Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
1046.7	1172.163	903.97	1020.63	0.173	0.157	1349.38	1608.294
11.98 % error		12.9 % error		9.248 % error		19.187 % error	

Para las tablas anteriores se evidencian las variaciones en porcentaje de las medidas teóricas y experimentales para el acero 1045.

8 CONCLUSIONES

- Se evidencia la correcta instalación de los sensores y tarjeta seleccionada, el muestreo de señales para los valores de carga y deformación es exitoso, cumpliendo con resolución de 0.025 mm para deformación y 0.48 KN para carga.
- Según lo esperado, el comportamiento de las gráficas y señales de carga y deformación de los sensores se asemejan a pruebas patrón realizadas a los distintos materiales tratados, teniendo un margen aproximado de variación de 10%.
- Con la implementación del sistema automatizado de adquisición de data, es evidente la reducción de tiempo y operarios necesarios para la realización de las pruebas de tracción.
- Con la realización de este proyecto, se crea una herramienta útil que facilita las actividades académicas, capaz de muestrear los cambios de carga y deformación para cada ensayo de tracción, generando informes tabulados de lo sucedido durante la prueba.
- La interfaz gráfica diseñada cumple con los datos y graficas necesarias para obtener la información correcta acerca de las propiedades mecánicas de la probeta metálica tratada.

9 BIBLIOGRAFÍA

ASKELAND. Donald R. Ciencia e ingeniería de los materiales, tercera edición. Universidad de Missouri-Rolla. International Thomson Editores, 1998.

ESPITIA GONZÁLES, Christian Hernando. Sistema de adquisición de datos en una máquina de fatiga para el estudio de materiales con memoria de forma. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2006. 159 p.

JAMES BALUCHO, Diana Carolina y GONZALES MUÑOZ, Oscar Enrique. Automatización de la adquisición de datos de una máquina de tracción lenta. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2007. 179 p.

LEÓN FONSECA, Wilmer Alexander y JOYA CABRERA, Juan Sebastián. Recuperación y automatización de la maquina instron serie 1125 de la escuela de ingeniería civil. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electrónico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2010. 176 p. 80

LOAEZA BECERRIL, Alfonso David. Obtención de curvas esfuerzo-deformación verdaderas del PP y copolímeros en bloque a velocidad de deformación constante aplicando correlación de imágenes digitales. Trabajo de grado maestría en ciencia e ingeniería de los materiales. Barcelona: Escuela técnica superior de ingeniería industrial de Barcelona. 2014. p.23, 24.

MATUSEVICH, Ariel; MANCINI, Reinaldo. *DETERMINACIÓN DEL EXPONENTE "n" DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN MEDIANTE UN ALGORITMO DE MÍNIMOS CUADRADOS PONDERADOS*. Segundo Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica. San Juan: Departamento de Estructuras, Facultad de C. E. F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Laboratorio de Ensayos Mecánicos, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Centro Regional Córdoba. 2010. p.2

ANEXOS

ANEXO A. Norma ASTM.

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: E8/E8M – 16a

American Association of State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T68
An American National Standard

Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹

This standard is issued under the fixed designation E8/E8M; 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 approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or approval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope*

1.1 These test methods cover the tension testing of metallic materials in any form at room temperature, specifically, the methods of determination of yield strength, yield point elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area.

1.2 The gauge lengths for most round specimens are required to be 4D for E8 and 5D for E8M. The gauge length is the most significant difference between E8 and E8M test specimens. Test specimens made from powder metallurgy (P/M) materials are exempt from this requirement by industry-wide agreement to keep the pressing of the material to a specific projected area and density.

1.3 Exceptions to the provisions of these test methods may need to be made in individual specifications or test methods for a particular material. For examples, see Test Methods and Definitions A370 and Test Methods B557, and B557M.

1.4 Room temperature shall be considered to be 10 to 38°C [50 to 100°F] unless otherwise specified.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as separate from inch/pound units. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.6 *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 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 Aug. 1, 2016. Published September 2016. Originally approved in 1924. Last previous edition approved 2016 as E8/E8M – 16. DOI: 10.1520/E0008_10008M-16A.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

A356/A356M Specification for Steel Castings, Carbon, Low Alloy, and Stainless Steel, Heavy-Walled for Steam Turbines

A370 Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products

B557 Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products

B557M Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products (Metric)

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing

E29 Practice for Using Significant Digits in Test Data to Determine Conformance with Specifications

E83 Practice for Verification and Classification of Extensometer Systems

E345 Test Methods of Tension Testing of Metallic Foil

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E1012 Practice for Verification of Testing Frame and Specimen Alignment Under Tensile and Compressive Axial Force Application

D1566 Terminology Relating to Rubber

E1856 Guide for Evaluating Computerized Data Acquisition Systems Used to Acquire Data from Universal Testing Machines

E2658 Practices for Verification of Speed for Material Testing Machines

3. Terminology

3.1 Definitions of Terms Common to Mechanical Testing—

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard

Copyright © ASTM International, 100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19380-2962, United States

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Feb 2 10:11:17 EST 2017
Downloaded/printed by

Universidad Industrial de Santander (Universidad Industrial de Santander) pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

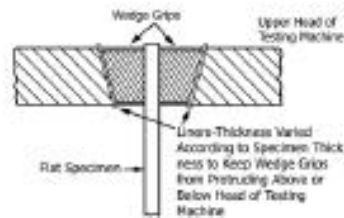


FIG. 2 Wedge Grips with Liners for Flat Specimens

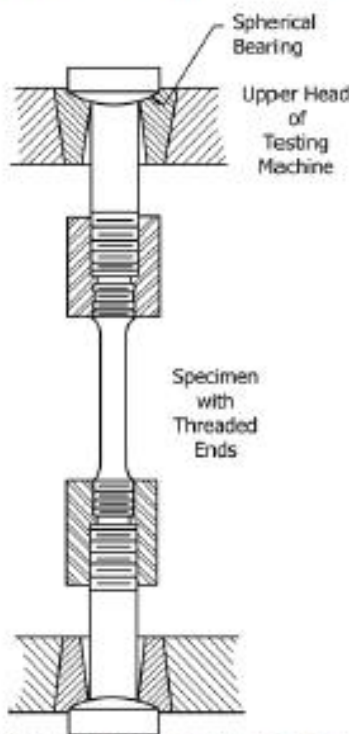


FIG. 3 Gripping Device for Threaded-End Specimens

6.3 Sheet-Type Specimens:

6.3.1 The standard sheet-type test specimen is shown in Fig. 1. This specimen is used for testing metallic materials in the form of sheet, plate, flat wire, strip, band, hoop, rectangles, and shapes ranging in nominal thickness from 0.13 to 19 mm [0.005 to 0.750 in.]. When product specifications so permit, other types of specimens may be used, as provided in 6.2, 6.4, and 6.5.

Note 5—Test Methods E345 may be used for tension testing of materials in thickness up to 0.15 mm [0.0059 in.].

6.3.2 Pin ends as shown in Fig. 7 may be used. In order to avoid buckling in tests of thin and high-strength materials, it may be necessary to use stiffening plates at the grip ends.

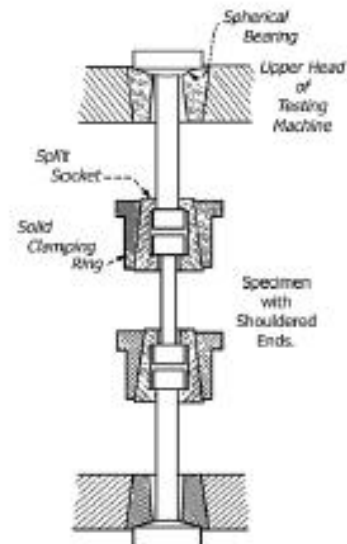


FIG. 4 Gripping Device for Shouldered-End Specimens

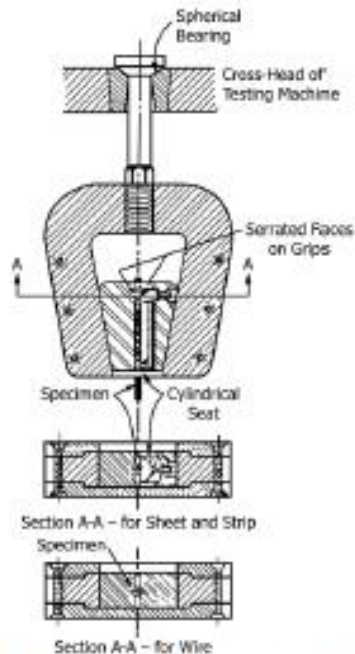

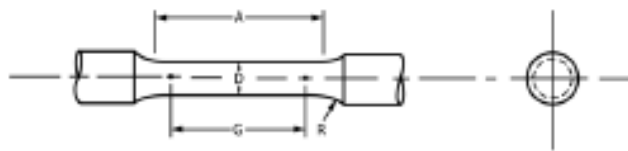


FIG. 5 Gripping Devices for Sheet and Wire Specimens

6.4 Round Specimens:

 E8/E8M - 16a



Dimensions, mm [in.]
For Test Specimens with Gauge Length Four Times the Diameter [E8]

	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	30.0 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	36.0 ± 0.1 [1.400 ± 0.005]	24.0 ± 0.1 [1.000 ± 0.005]	16.0 ± 0.1 [0.640 ± 0.005]	10.0 ± 0.1 [0.450 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.005]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced parallel section, min (Note 2)	56 [2.25]	45 [1.75]	30 [1.25]	20 [0.75]	16 [0.625]

Dimensions, mm [in.]
For Test Specimens with Gauge Length Five Times the Diameter [E8M]

	Standard Specimen		Small-Size Specimens Proportional to Standard		
	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
G—Gauge length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	45.0 ± 0.1 [1.750 ± 0.005]	30.0 ± 0.1 [1.250 ± 0.005]	20.0 ± 0.1 [0.800 ± 0.005]	12.5 ± 0.1 [0.505 ± 0.005]
D—Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	9.0 ± 0.1 [0.350 ± 0.007]	6.0 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]	4.0 ± 0.1 [0.160 ± 0.003]	2.5 ± 0.1 [0.113 ± 0.005]
R—Radius of fillet, min	10 [0.375]	8 [0.25]	6 [0.188]	4 [0.156]	2 [0.094]
A—Length of reduced parallel section, min (Note 2)	75 [3.0]	54 [2.0]	36 [1.4]	24 [1.0]	20 [0.75]

Note 1—The reduced parallel section may have a gradual taper from the ends toward the center, with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center (controlling dimension).

Note 2—If desired, the length of the reduced parallel section may be increased to accommodate an extensometer of any convenient gauge length. Reference marks for the measurement of elongation should, nevertheless, be spaced at the indicated gauge length.

Note 3—The gauge length and fillets may be as shown, but the ends may be of any form to fit the holders of the testing machine in such a way that the force shall be axial (see Fig. 9). If the ends are to be held in wedge grips it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

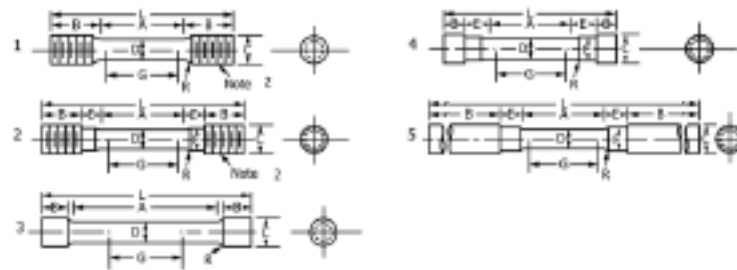
Note 4—On the round specimens in Figs. 8 and 9, the gauge lengths are equal to four [E8] or five times [E8M] the nominal diameter. In some product specifications other specimens may be provided for, but unless the 4-to-1 [E8] or 5-to-1 [E8M] ratio is maintained within dimensional tolerances, the elongation values may not be comparable with those obtained from the standard test specimen.

Note 5—The use of specimens smaller than 6-mm [0.250-in.] diameter shall be restricted to cases when the material to be tested is of insufficient size to obtain larger specimens or when all parties agree to their use for acceptance testing. Smaller specimens require suitable equipment and greater skill in both machining and testing.

Note 6—For inch/pound units only: Five sizes of specimens often used have diameters of approximately 0.505, 0.357, 0.252, 0.160, and 0.113 in., the reason being to permit easy calculations of stress from loads, since the corresponding cross-sectional areas are equal or close to 0.200, 0.100, 0.0500, 0.0200, and 0.0100 in.², respectively. Thus, when the actual diameters agree with these values, the stresses (or strengths) may be computed using the simple multiplying factors 5, 10, 20, 50, and 100, respectively. (The metric equivalents of these five diameters do not result in correspondingly convenient cross-sectional areas and multiplying factors.)

FIG. 8 Standard 12.5-mm [0.500-in.] Round Tension Test Specimen and Examples of Small-Size Specimens Proportional to the Standard Specimen

E8/E8M - 16a



Dimensions, mm [in.]
For Test Specimens with Gauge Length Four Times the Diameter [E8]

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<i>G</i> —Gauge length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
<i>A</i> —Length of reduced parallel section	56 [2.25] min	56 [2.25] min	100 [4] approximate	56 [2.25] min	56 [2.25] min
<i>L</i> —Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
<i>B</i> —Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
<i>C</i> —Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]
<i>E</i> —Length of shoulder and fillet section, approximate	20 [0.75]	15 [0.625]	20 [0.75]	20 [0.75]	15 [0.625]
<i>F</i> —Diameter of shoulder	20 [0.75]	15 [0.625]	20 [0.75]	15 [0.625]	15 [0.625]

Dimensions, mm [in.]
For Test Specimens with Gauge Length Five Times the Diameter [E8M]

	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4	Specimen 5
<i>G</i> —Gauge length	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]	62.5 ± 0.1 [2.500 ± 0.005]
<i>D</i> —Diameter (Note 1)	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]	12.5 ± 0.2 [0.500 ± 0.010]
<i>R</i> —Radius of fillet, min	10 [0.375]	10 [0.375]	2 [0.0625]	10 [0.375]	10 [0.375]
<i>A</i> —Length of reduced parallel section	75 [3] min	75 [3] min	75 [3] approximate	75 [3] min	75 [3] min
<i>L</i> —Overall length, approximate	145 [5]	155 [5.5]	155 [5.5]	140 [4.75]	255 [9.5]
<i>B</i> —Length of end section (Note 3)	35 [1.375] approximate	25 [1] approximate	20 [0.75] approximate	15 [0.5] approximate	75 [3] min
<i>C</i> —Diameter of end section	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]	20 [0.75]
<i>E</i> —Length of shoulder and fillet section, approximate	20 [0.75]	15 [0.625]	20 [0.75]	20 [0.75]	15 [0.625]
<i>F</i> —Diameter of shoulder	20 [0.75]	15 [0.625]	20 [0.75]	15 [0.625]	15 [0.625]


Note 1—The reduced parallel section may have a gradual taper from the ends toward the center with the ends not more than 1 % larger in diameter than the center.

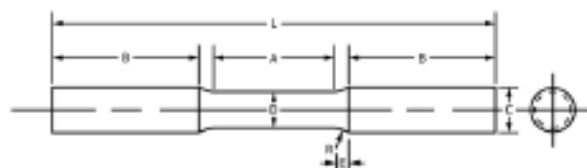
Note 2—On Specimens 1 and 2, any standard thread is permissible that provides for proper alignment and aids in assuring that the specimen will break within the reduced parallel section.

Note 3—On Specimen 5 it is desirable, if possible, to make the length of the grip section great enough to allow the specimen to extend into the grips a distance equal to two thirds or more of the length of the grips.

Note 4—The values stated in SI units in the table for Fig. 9 are to be regarded as separate from the inch/pound units. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore each system must be used independently of the other.

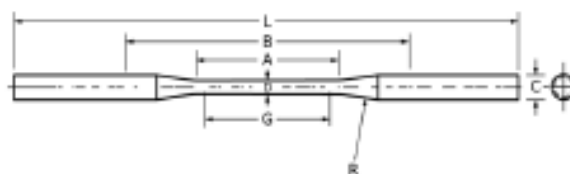
FIG. 9 Various Types of Ends for Standard Round Tension Test Specimens

 E8/E8M - 16a



Dimensions, mm [in.]	
D—Diameter	16 [0.625]
R—Radius of fillet	8 [0.312]
A—Length of reduced parallel section	64 [2.5]
L—Overall length	190 [7.5]
B—Length of end section	64 [2.5]
C—Diameter of end section	20 [0.75]
E—Length of fillet	5 [0.188]

FIG. 17 Standard Tension Test Specimen for Malleable Iron



Dimensions, mm [in.]	
G—Gauge length	50 ± 0.1 [2.000 ± 0.005]
D—Diameter (see Note)	6.4 ± 0.1 [0.250 ± 0.005]
R—Radius of fillet, min	75 [3]
A—Length of reduced parallel section, min	60 [2.35]
L—Overall length, min	230 [9]
B—Distance between grips, min	115 [4.5]
C—Diameter of end section, approximate	10 [0.375]

Note 1—The reduced parallel section may have a gradual taper from the end toward the center, with the ends not more than 0.1 mm [0.005 in.] larger in diameter than the center.

FIG. 18 Standard Tension Test Specimens for Die Castings

7.6.3.5 Free-Running Crosshead Speed—The allowable limits for the rate of movement of the crosshead of the testing machine, with no force applied by the testing machine, shall be specified in mm per mm [inches per inch] of length of reduced parallel section (or distance between grips for specimens not having reduced sections) per second [minute]. The limits for the crosshead speed may be further qualified by specifying different limits for various types and sizes of specimens. The average crosshead speed can be experimentally determined by using suitable length-measuring and timing devices.

Note 19—For machines not having crossheads or having stationary crossheads, the phrase “free-running crosshead speed” may be interpreted to mean the free-running rate of grip separation.

7.6.4 Speed of Testing When Determining Yield Properties—Unless otherwise specified, any convenient speed of testing may be used up to one half the specified minimum yield strength or up to one quarter of the specified minimum tensile strength, whichever is smaller. The speed above this point shall be within the specified limits. If different speed limitations are required for use in determining yield strength, yield point

elongation, tensile strength, elongation, and reduction of area, they should be stated in the product specifications. In all cases, the speed of testing shall be such that the forces and strains used in obtaining the test results are accurately indicated. Determination of mechanical properties for comparison of product properties against a specification value should be run using the same control method and rate used to determine the specification value unless it can be shown that another method yields equivalent or conservative results. In the absence of any specified limitations, one of the following control methods shall be used. Appendix X4 provides additional guidance on selecting the control method.

Note 20—In the previous and following paragraphs, the yield properties referred to include yield strength, yield point, and yield point elongation.

7.6.4.1 Control Method A—Rate of Stressing Method for Determining Yield Properties—In this method, the testing machine shall be operated such that the rate of stress application in the linear elastic region is between 1.15 and 11.5 MPa/s [10 000 and 100 000 psi/min]. The speed of the testing machine

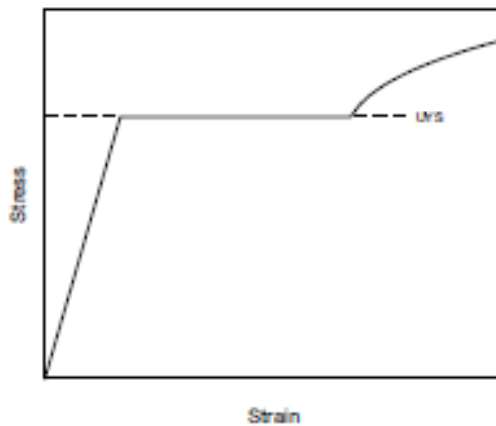


FIG. 22 Stress-Strain Diagram Showing Upper Yield Strength Corresponding with Top of Knee

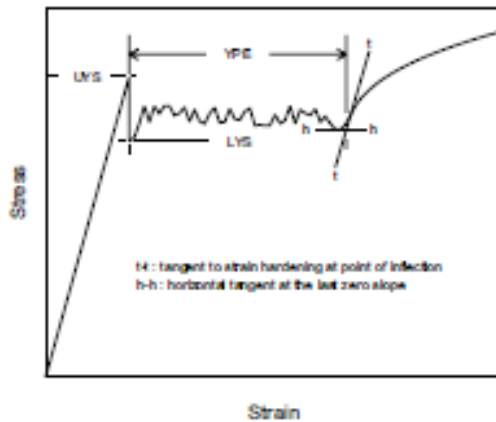


FIG. 23 Stress-Strain Diagram Showing Yield Point Elongation (YPE) and Upper (UYS) and Lower (LYS) Yield Strengths

7.7.3.3 Where large-strain data are needed to facilitate measurement of yield point elongation for materials that may exhibit discontinuous yielding, Class C extensometers may be employed. When this is done but the material exhibits no discontinuous yielding, the extension-under-load yield strength may be determined instead, using the stress-strain curve (see Extension-Under-Load Method).

7.7.4 *Halt-of-the-Force Method for materials that exhibit discontinuous yielding*—Apply an increasing force to the specimen at a uniform deformation rate. When the force hesitates, record the corresponding stress as the upper yield strength.

NOTE 36—The Halt-of-the-Force Method was formerly known as the Halt-of-the-Pointer Method, the Drop-of-the-Beam Method, and the Halt-of-the-Load Method.

7.8 *Yield Point Elongation*—Calculate the yield point elongation from the stress-strain diagram or data by determining the difference in strain between the upper yield strength (first zero slope) and the onset of uniform strain hardening (see definition of YPE in Terminology E6 and Fig. 23).

NOTE 37—The stress-strain curve of a material exhibiting only a hint of the behavior causing YPE may have an inflection at the onset of yielding with no point where the slope reaches zero (Fig. 24). Such a material has no YPE, but may be characterized as exhibiting an inflection. Materials exhibiting inflections, like those with measurable YPE, may in certain applications acquire an unacceptable surface appearance during forming.

7.9 *Uniform Elongation (if required)*:

7.9.1 Uniform elongation shall include both plastic and elastic elongation.

7.9.2 Uniform elongation shall be determined using autographic methods with extensometers conforming to Practice E83. Use a class B2 or better extensometer for materials having a uniform elongation less than 5%. Use a class C or better extensometer for materials having a uniform elongation greater than or equal to 5% but less than 50%. Use a class D or better extensometer for materials having a uniform elongation of 50% or greater.

7.9.3 Determine the uniform elongation as the elongation at the point of maximum force from the force elongation data collected during a test.

7.9.3.1 Some materials exhibit a yield point followed by considerable elongation where the yield point is the maximum force achieved during the test. In this case, uniform elongation is not determined at the yield point, but instead at the highest force occurring just prior to necking (see Fig. 25).

7.9.3.2 Stress-strain curves for some materials exhibit a lengthy, plateau-like region in the vicinity of the maximum force. For such materials, determine the uniform elongation at the center of the plateau as indicated in Fig. 26 (see also Note 38 below).

NOTE 38—When uniform elongation is being determined digitally, noise in the stress-strain data generally causes many small, local peaks and valleys to be recorded in the plateau region. To accommodate this, the following procedure is recommended:

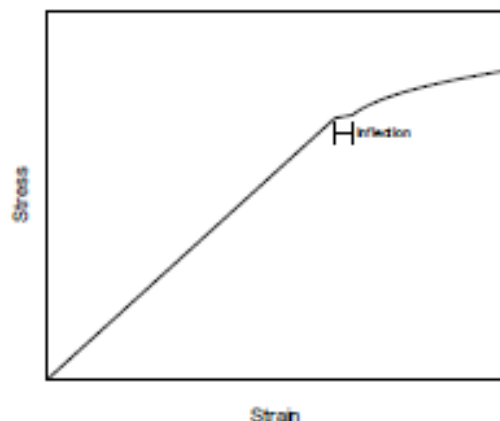


FIG. 24 Stress-Strain Diagram With an Inflection, But No YPE

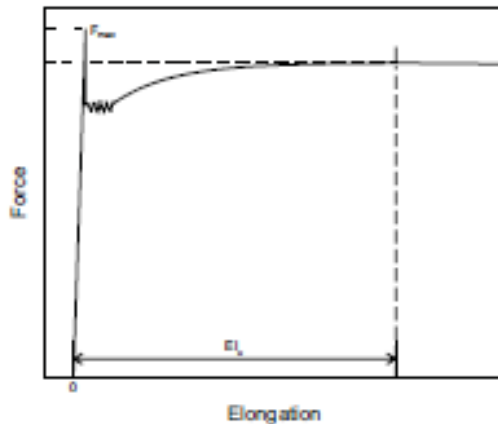


FIG. 25 Stress-Strain Diagram in Which the Upper Yield Strength Is the Maximum Stress Recorded Method

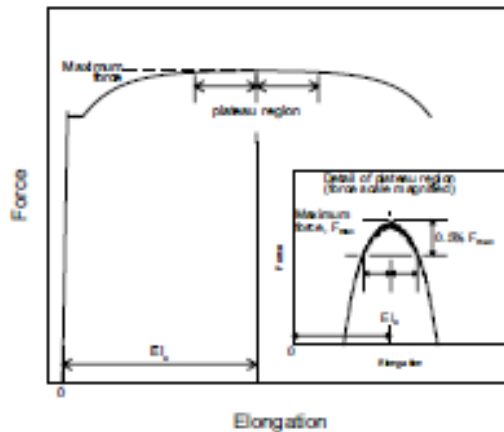


FIG. 26 Force-Elongation Diagram for Determination of Uniform Elongation of Steel Shot Materials Exhibiting a Plateau at Maximum Force

- Determine the maximum force recorded (after discontinuous yielding).
- Evaluate the sequence of force values recorded before and after the maximum force.
- Digitally define the “plateau” as consisting of all consecutive data points wherein the force value is within 0.5 % of the magnitude of the peak force value.
- Determine the uniform elongation as the strain at the mid-point of the “plateau.”

7.9.3.3 Discussion—The 0.5 % value of Note 38 has been selected arbitrarily. In actual practice, the value should be selected so as to be the minimum figure that is large enough to effectively define the force plateau. This may require that the percentage be about five times the amplitude of the force fluctuations occurring due to noise. Values ranging from 0.1 % to 1.0 % may be found to work acceptably.

7.10 Tensile Strength (also known as Ultimate Tensile Strength)—Calculate the tensile strength by dividing the maximum force carried by the specimen during the tension test by the original cross-sectional area of the specimen.

Note 39—If the upper yield strength is the maximum stress recorded, and if the stress-strain curve resembles that of Fig. 25, it is recommended that the maximum stress after discontinuous yielding be reported as the tensile strength. Where this may occur, determination of the tensile strength should be in accordance with the agreement between the parties involved.

7.11 Elongation:

7.11.1 Elongation may be calculated from elongation-after-fracture measurements or directly from elongation-at-fracture measurements. Either value may be reported, but the method used shall be reported. When disagreements arise over the elongation results, the parties shall agree on which method to use to obtain the results.

Note 40—Elongation results are very sensitive to variables such as (a) speed of testing, (b) specimen geometry (gauge length, diameter, width, and thickness), (c) heat dissipation (through grips, extensometers, or other devices in contact with the reduced parallel section), (d) surface finish in reduced parallel section (especially burrs or notches), (e) alignment, and (f) fillets and tapers. Elongation at fracture and elongation after fracture are not interchangeable parameters. Results from the elongation-at-fracture method are generally more repeatable. Parties involved in comparison or conformance testing should standardize the above items. The use of ancillary devices, such as extensometer supports, that may remove heat from the specimen should be avoided. See Appendix X1 for additional information on the effects of these variables.

7.11.2 Measurement of elongation after fracture:

7.11.2.1 Follow the gauge length marking procedures and requirements of 7.3 and the gauge length tolerance requirements shown in Fig. 1, Fig. 7, Fig. 8, Fig. 13, Fig. 15, Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19, or Fig. 20 as appropriate. Pay particular attention to requirements for low-elongation materials.

7.11.2.2 Measure the elongation after fracture by fitting the two halves of the test specimen together and measuring the distance between gauge marks that were applied before the test.

7.11.2.3 When the specified elongation is greater than 3 %, fit ends of the fractured specimen together carefully and measure the distance between the gauge marks to the nearest 0.25 mm [0.01 in.] for gauge lengths of 50 mm [2 in.] and under, and to at least the nearest 0.5 % of the gauge length for gauge lengths over 50 mm [2 in.]. A percentage scale reading to 0.5 % of the gauge length may be used.

7.11.2.4 When the specified elongation is 3 % or less, remove partly torn fragments that will interfere with fitting together the ends of the fractured specimen or with making the final measurement. Fit the fractured ends together with matched surfaces and apply a force along the axis of the specimen sufficient to close the fractured ends together. This force may then be removed carefully, provided the specimen remains intact. Measure the final gauge length to the nearest 0.05 mm [0.002 in.], and report the elongation to the nearest 0.2 %. The procedure given in 7.11.2.3 may be used instead when the measured elongation is greater than 3 %.

Note 41—The use of a force generating a stress of approximately 15 MPa [2000 psi] has been found to give satisfactory results on test specimens of aluminum alloy.

TABLE X1.1 Precision Statistics—Tensile Strength, MPa [ksi]

NOTE 1— \bar{X} is the average of the cell averages, that is, the grand mean for the test parameter,
 s_r is the repeatability standard deviation (within-laboratory precision) in MPa [ksi],
 s_r/\bar{X} is the coefficient of variation in %,
 s_R is the reproducibility standard deviation (between-laboratory precision) in MPa [ksi],
 s_R/\bar{X} is the coefficient of variation, %,
 r is the 95 % repeatability limits in MPa [ksi],
 R is the 95 % reproducibility limits in MPa [ksi].

Material	\bar{X}	s_r	s_r/\bar{X} , %	s_R	s_R/\bar{X} , %	r	R
EC-H19	176.9 [25.66]	4.3 [0.63]	2.45	4.3 [0.63]	2.45	12.1 [1.76]	12.1 [1.76]
2024-T351	491.3 [71.26]	6.1 [0.88]	1.24	6.6 [0.96]	1.34	17.0 [2.47]	18.5 [2.68]
ASTM A105	596.9 [86.57]	4.1 [0.60]	0.69	8.7 [1.27]	1.47	11.6 [1.68]	24.5 [3.55]
AISI 316	804.6 [100.75]	2.7 [0.39]	0.39	8.4 [1.22]	1.21	7.5 [1.09]	23.4 [3.39]
Inconel 600	625.9 [90.45]	2.9 [0.42]	0.43	5.0 [0.72]	0.72	8.2 [1.19]	13.9 [2.02]
SAE 51410	1253.0 [181.73]	0.25 [0.46]	0.25	7.9 [1.14]	0.63	8.9 [1.29]	22.1 [3.20]
		Averages:		0.91	1.30		

TABLE X1.2 Precision Statistics—0.02 % Yield Strength, MPa [ksi]

Material	\bar{X}	s_r	s_r/\bar{X} , %	s_R	s_R/\bar{X} , %	r	R
EC-H19	111.4 [16.16]	4.5 [0.65]	4.00	8.2 [1.19]	7.37	12.5 [1.81]	23.0 [3.33]
2024-T351	354.2 [51.38]	5.8 [0.84]	1.64	6.1 [0.89]	1.73	16.3 [2.36]	17.2 [2.49]
ASTM A105	411.1 [59.66]	8.3 [1.20]	2.02	13.1 [1.90]	3.18	23.2 [3.37]	38.6 [5.31]
AISI 316	336.1 [48.75]	16.7 [2.42]	4.97	31.9 [4.62]	9.49	46.1 [6.68]	80.0 [12.01]
Inconel 600	267.1 [38.74]	3.2 [0.46]	1.18	5.2 [0.76]	1.96	8.8 [1.26]	14.7 [2.13]
SAE 51410	723.2 [104.00]	16.6 [2.40]	2.29	21.9 [3.17]	3.02	46.4 [6.73]	61.2 [8.88]
		Averages:		2.68	4.46		

TABLE X1.3 Precision Statistics—0.2 % Yield Strength, MPa [ksi]

Material	\bar{X}	s_r	s_r/\bar{X} , %	s_R	s_R/\bar{X} , %	r	R
EC-H19	158.4 [22.98]	3.3 [0.47]	2.06	3.3 [0.46]	2.07	9.2 [1.33]	9.2 [1.33]
2024-T351	362.9 [52.64]	5.1 [0.74]	1.41	5.4 [0.76]	1.49	14.3 [2.08]	15.2 [2.20]
ASTM A105	402.4 [58.36]	5.7 [0.83]	1.42	9.9 [1.44]	2.47	15.9 [2.31]	27.8 [4.03]
AISI 316	481.1 [69.76]	6.6 [0.95]	1.36	19.5 [2.83]	4.06	18.1 [2.63]	54.7 [7.93]
Inconel 600	265.3 [38.91]	2.5 [0.36]	0.93	5.8 [0.85]	2.17	7.0 [1.01]	16.3 [2.37]
SAE 51410	967.5 [140.33]	8.9 [1.28]	0.92	15.9 [2.30]	1.64	24.8 [3.60]	44.5 [6.45]
		Averages:		1.35	2.32		

TABLE X1.4 Precision Statistics—% Elongation in 4D for E8 Specimens

NOTE 1—Length of reduced parallel section = 6D.

Material	\bar{X}	s_r	s_r/\bar{X} , %	s_R	s_R/\bar{X} , %	r	R
EC-H19	17.42	0.64	3.69	0.92	5.30	1.80	2.59
2024-T351	19.76	0.58	2.94	1.58	7.99	1.65	4.43
ASTM A105	29.10	0.76	2.62	0.98	3.38	2.13	2.76
AISI 316	40.07	1.10	2.75	2.14	5.35	3.09	6.00
Inconel 600	44.28	0.66	1.50	1.54	3.48	1.86	4.31
SAE 51410	14.48	0.48	3.29	0.99	6.83	1.34	2.77
		Averages:		2.80	5.39		

repeatable and reproducible is: % elongation in 4D, % elongation in 5D, % reduction in area, 0.02 % offset yield strength, 0.2 % offset yield strength, and tensile strength. Note that the rankings are in the same order for the repeatability and reproducibility average coefficients of variation and that the reproducibility (between-laboratory precision) is poorer than the repeatability (within-laboratory precision) as would be expected.

X1.6.3 No comments about bias can be made for the interlaboratory study due to the lack of certified test results for these specimens. However, examination of the test results showed that one laboratory consistently exhibited higher than average strength values and lower than average ductility values for most of the specimens. One other laboratory had consistently lower than average tensile strength results for all specimens.

TABLE X1.5 Precision Statistics—% Elongation in 5D for E8M Specimens

Note 1—Length of reduced parallel section = 6D.

Material	\bar{X}	s_x	$s_x / \bar{X}, \%$	s_{Rr}	$s_{Rr} / \bar{X}, \%$	r	R
EC-H19	14.80	0.59	4.07	0.66	4.54	1.65	1.85
2024-T351	17.99	0.63	3.48	1.71	9.51	1.81	4.81
ASTM A105	25.63	0.77	2.99	1.30	5.06	2.15	3.63
AISI 316	35.93	0.71	1.98	2.68	7.45	2.00	7.49
Inconel 800	41.58	0.67	1.61	1.60	3.86	1.88	4.49
SAE 51410	13.39	0.45	3.61	0.96	7.75	1.25	2.89
		Average:	2.96		6.36		

TABLE X1.6 Precision Statistics—% Reduction in Area

Material	\bar{X}	s_x	$s_x / \bar{X}, \%$	s_{Rr}	$s_{Rr} / \bar{X}, \%$	r	R
EC-H19	79.15	1.93	2.43	2.04	2.54	5.44	5.67
2024-T351	30.41	2.09	6.87	3.59	11.79	5.79	10.01
ASTM A105	65.59	0.84	1.28	1.26	1.92	2.35	3.53
AISI 316	71.49	0.99	1.39	1.60	2.25	2.78	4.50
Inconel 800	59.34	0.67	1.14	0.70	1.18	1.89	1.97
SAE 51410	50.49	1.86	3.69	3.95	7.81	5.21	11.05
		Average:	2.80		4.58		

X2. MEASUREMENT OF SPECIMEN DIMENSIONS

X2.1 Measurement of specimen dimensions is critical in tension testing, and it becomes more critical with decreasing specimen size, as a given absolute error becomes a larger relative (percent) error. Measuring devices and procedures should be selected carefully, so as to minimize measurement error and provide good repeatability and reproducibility.

X2.2 Relative measurement error should be kept at or below 1 %, where possible. Ideally, this 1 % error should include not only the resolution of the measuring device but also the variability commonly referred to as repeatability and reproducibility. (Repeatability is the ability of any operator to obtain similar measurements in repeated trials. Reproducibility is the ability of multiple operators to obtain similar measurements.)

X2.3 Formal evaluation of gage repeatability and reproducibility (GR and R) by way of a GR and R study is highly recommended. A GR and R study involves having multiple operators each take two or three measurements of a number of parts—in this case, test specimens. Analysis, usually done by computer, involves comparing the observed measurement variations to a tolerance the procedure is to determine conformance to. High GR and R percentages (more than 20 %) indicate much variability relative to the tolerance, whereas low percentages (10 % or lower) indicate the opposite. The analysis also estimates, independently, the repeatability and reproducibility.

X2.4 GR and R studies in which nontechnical personnel used different brands and models of hand-held micrometers have given results varying from about 10 % (excellent) to nearly 100 % (essentially useless), relative to a dimensional tolerance of 0.075 mm [0.003 in.]. The user is therefore advised to be very careful in selecting devices, setting up measurement procedures, and training personnel.

X2.5 With a 0.075 mm [0.003 in.] tolerance, a 10 % GR and R result (exceptionally good, even for digital hand-held micrometers reading to 0.001 mm [0.00005 in.]) indicates that the total variation due to repeatability and reproducibility is around 0.0075 [0.0003 in.]. This is less than or equal to 1 % only if all dimensions to be measured are greater than or equal to 0.75 mm [0.03 in.]. The relative error in using this device to measure thickness of a 0.25 mm [0.01 in.] flat tensile specimen would be 3 %—which is considerably more than that allowed for force or strain measurement.

X2.6 Dimensional measurement errors can be identified as the cause of many *out-of-control* signals, as indicated by statistical process control (SPC) charts used to monitor tension testing procedures. This has been the experience of a production laboratory employing SPC methodology and the best hand-held micrometers available (from a GR and R standpoint) in testing of 0.45 to 6.35 mm [0.018 to 0.25 in.] flat rolled steel products.

X2.7 Factors which affect GR and R, sometimes dramatically, and which should be considered in the selection and evaluation of hardware and procedures include:

- X2.7.1 Resolution,
- X2.7.2 Verification,
- X2.7.3 Zeroing,
- X2.7.4 Type of anvil (flat, rounded, or pointed),
- X2.7.5 Cleanliness of part and anvil surfaces,
- X2.7.6 User-friendliness of measuring device,
- X2.7.7 Stability/temperature variations,
- X2.7.8 Coating removal,
- X2.7.9 Operator technique, and

X5. CALCULATING THE YIELD STRENGTH WHEN THE STRESS-STRAIN CURVE DEVIATES FROM IDEAL BEHAVIOR

X5.1 In many cases, the stress-strain diagram deviates from the ideal behavior that Fig. 21 illustrates. To compute the yield strength by the offset method (7.7.1) or the extension-under-load method (7.7.2), these deviations should be analyzed appropriately.

X5.2 Fig. X5.1 illustrates a schematic stress-strain diagram with idealized behavior and five types of deviation from ideal behavior. This appendix suggests methods for computing the offset and extension-under-load yield strengths when these deviations occur.

X5.3 Fig. X5.1a shows the ideal behavior. The line OA , superimposed on the straight-line portion of the stress-strain curve, intersects the origin, O , of the stress-strain diagram. For the offset method, the line mn is parallel to OA at a distance X from the intersection of OA with the strain axis. For the extension-under-load method, the line pq extends vertically from the strain axis at a distance Y from the intersection of OA with the strain axis.

X5.4 Fig. X5.1b illustrates behavior that can occur if the extensometer is displaced slightly to negative strains when it is

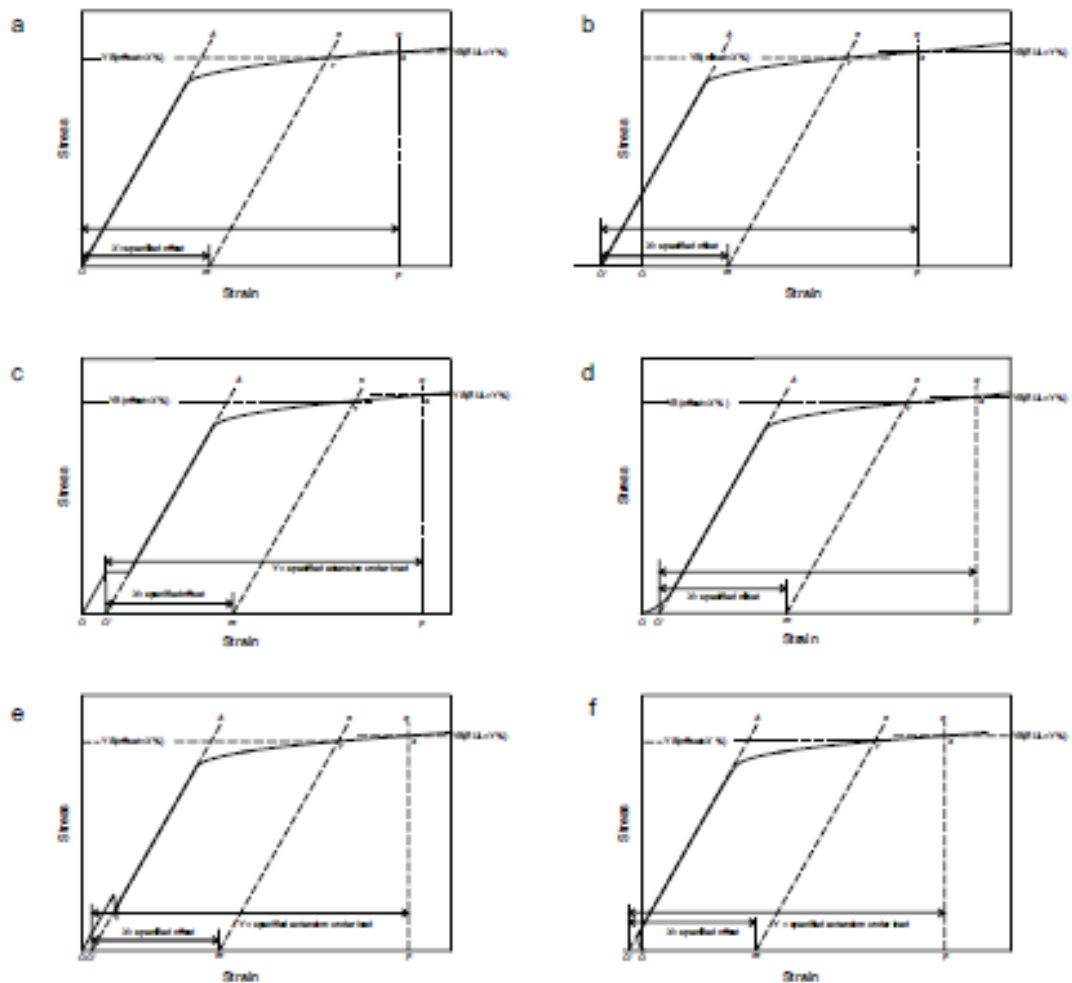
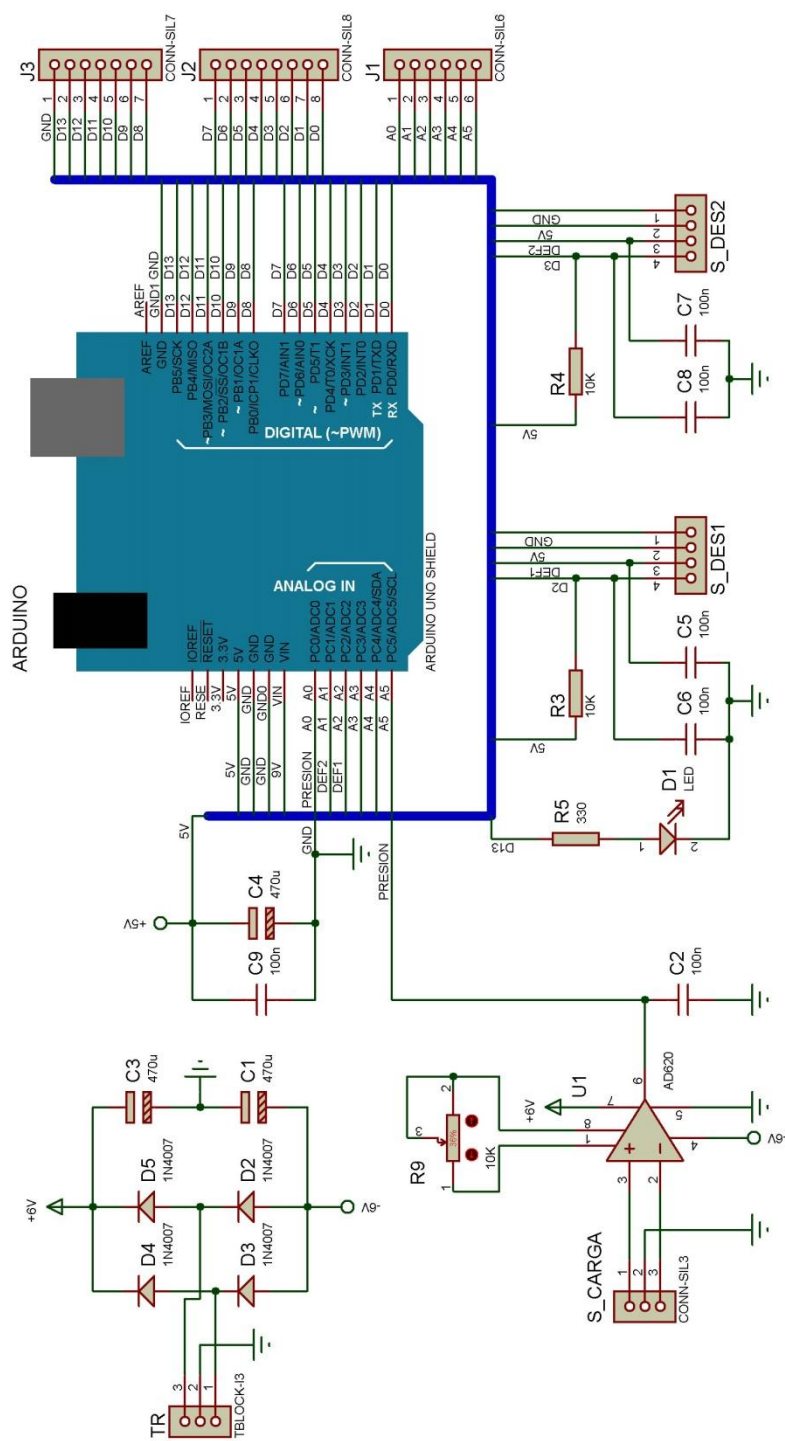


FIG. X5.1 Schematic Stress-strain Diagram

ANEXO B. Circuito de acondicionamiento electrónico.



ANEXO C. Interfaz gráfica en labview

The interface is organized into several functional areas:

- Control Panel:** Includes a 'Puerto' dropdown menu (set to COM3), 'START' (green play button), 'STOP' (red square button), 'GUARDAR DATOS' (yellow button), 'ESTUDIANTE' (white button), and 'DOCENTE' (yellow button).
- Specimen Parameters:** 'Longitud (m)', 'Diámetro (m)', and 'MATERIAL' text boxes.
- Test Parameters:** 'Limite Elástico' (MPa), 'Esfuerzo Máximo' (MPa), 'Esfuerzo de Ruptura' (MPa), and 'Elongación' (%).
- Measurement Fields:** 'Carga' (KN) and 'Desplazamiento' (mm) text boxes.
- Plots:**
 - Plot 1:** 'CARGA (KN)' vs 'ALARGAMIENTO (mm)'. Y-axis: -20 to 180. X-axis: 0 to 16.
 - Plot 2:** 'ESFUERZO REAL (Mpa)' vs 'DEFORMACIÓN REAL (m/m)'. Y-axis: -100 to 900. X-axis: 0 to 0,16.
 - Plot 3:** 'ESFUERZO INGENIERIL (Mpa)' vs 'DEFORMACIÓN INGENIERIL (m/m)'. Y-axis: -100 to 900. X-axis: 0 to 0,16.
- Output Fields:** 'Esfuerzo Real' (MPa), 'Deformación Real' (m/m), 'Esfuerzo Ingenieril' (MPa), and 'Deformación Ingenieril' (m/m).

ANEXO D. Transductor de presión.

Model 625F Pressure Transducers (Transmitters)



Based on BCM strain gauge technology, BCM model 625F pressure transducers (transmitters) are made 100% from stainless steel in mass production. With a small dimensions, it can use at many kinds mechanical equipments, widely used in industries of oil, chemical, water projects, electric power, refrigeration equipments and air compressions etc.

with the all welded constructions, the transducers (transmitters) can be specially used in some flammable environments.

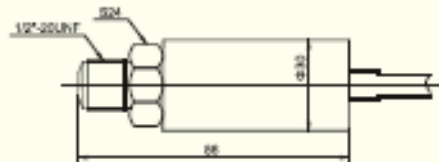
The transducers (transmitters) are compensated in a wide temperature ranges of -10~+80 °C, and have a nice long term stability of less than 0.15% full scale for a year, the output of pressure transducers is millivolts, output of pressure transmitters are amplified signals, such as 1/10 Vdc or 4/20 mA.



Features:

- wide measuring ranges from 0/10 bar to 0/2000 bar
- measuring accuracy of 0.05, 0.1, 0.25, 0.5 selectable
- 100% made from stainless steel, small dimensions and cost effective
- all welded construction, rigid and compact, anti-flammable and explosive-proof
- wide temperature range compensation
- internal shunt calibration signal of 80 %FS

Dimensions:



Specifications:

measuring ranges & type	bar,G	0/5, 0/10, 0/15, 0/30, 0/50, 0/70, 0/100, 0/200, 0/300, 0/500, 0/700, 0/1000, 0/1400, 0/2000
overload pressure	% FS	150 (2100 bar max.)
output signal	mV/V	2, 3 (standard) for pressure transducers
		1/5 V, 1/10 V, 4/20 mA for pressure transmitters
combined error	% FS	0.05, 0.1 (standard), 0.25, 0.5
non-linearity	% FS	0.05, 0.1 (standard), 0.25, 0.5
repeatability	% FS	0.05
zero offset	% FS	±1
input resistance	Ω	350 ± 10% (standard), 1000 ± 10%, for pressure transducers
output resistance	Ω	350 ± 10% (standard), 1000 ± 10%, for pressure transducers
insulation resistance	MΩ	>900 @ 100 Vdc
supply voltage		10 (typical), 12 (max.) for pressure transducers
	V dc	24 (typical), 12-36 (acceptable) for pressure transmitters
temperature effect on ZERO	% FS/10°C	0.5
temperature effect on SPAN	% FS/10°C	0.5
long periods stability	% FS/year	< 0.15
compensated temperature range	°C	-10 ~ 80
working temperature range	°C	-40 ~ 125
internal shunt calibration	% FS	80
anti-explosive marking		exia I CT5
process connection		1/2"-20 UNF (standard), 7/16"-20 UNF, 1/4"-NPT, M18x1.5, M20x1.5
electrical connection		6-pin (standard), 5-pin, 4-pin connector, shield PVC cable; hirschmann connector

The listed specifications are subject to change without pre-notice.

How to order: model - range - pressure type - output - accuracy - process connection - electric connection

example: 625F - 0/700 - G - 4/20 mA - 0.5 %FS - 1/2"-20 UNF - 3 meters shield PVC cable

BCM SENSOR TECHNOLOGIES

IndustriePark, Brechtsebaan 2
B-2800 Schoten - Antwerp, BELGIUM

Tel.: +32-3-238 6469
Fax: +32-3-238 4171

website: www.bcmsensor.com
email: sales@bcmsensor.com

Model 625F Pressure Transducers (Transmitters)



Electrical connections



6-pin connector



5-pin connector



4-pin connector



6-wire shield PVC cable



Hirschmann connector
(DIN 43650)

for 2 mV/V, 3 mV/V output signal

electrical connections	6-pin	5-pin	4-pin	color code of 6-wire PVC cable	Hirschmann connector
signal +	A	not available	not available	blue (bl)	not available
signal -	B	not available	not available	white (wh)	not available
supply +	C	not available	not available	red (rd)	not available
supply -	D	not available	not available	yellow (ye)	not available
calibration	E	not available	not available	black (bk)	not available
calibration	F	not available	not available	brown (br)	not available

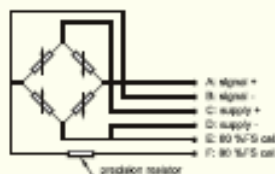
for 1/5 V, 1/10 V amplified output signal

electrical connections	6-pin	5-pin	4-pin	color code of 6-wire PVC cable	Hirschmann connector
signal +	A	A	not available	blue (bl)	not available
signal -/supply -	B	B	not available	white (wh)	not available
supply +	C	C	not available	red (rd)	not available
not connected	D	not available	not available	yellow (ye)	not available
calibration	E	E	not available	black (bk)	not available
calibration	F	F	not available	brown (br)	not available

for 4/20 mA amplified output signal

electrical connections	6-pin	5-pin	4-pin	color code of 6-wire PVC cable	Hirschmann connector
signal +/supply +	A	A	A	blue (bl)	1
signal -/supply -	B	B	B	white (wh)	2
not connected	C	C	not available	red (rd)	not available
not connected	D	not available	not available	yellow (ye)	not available
calibration	E	E	E	black (bk)	3
calibration	F	F	F	brown (br)	4

Bridge Circuit & 80 %FS Calibration with 2 mV/V, 3 mV/V Strain Gauge Output



BCM SENSOR TECHNOLOGIES

IndustriePark, Brechtsebaan 2
B-2900 Schoten - Antwerp, BELGIUM

Tel.: +32-3-238 6469
Fax: +32-3-238 4171

website: www.bcmsensor.com
email: sales@bcmsensor.com

ANEXO F. Tarjeta de adquisición de datos “Arduino UNO”.

Technical specs

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

ANEXO G. Amplificador de instrumentación AD620.



Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier

AD620

FEATURES

Easy to use

- Gain set with one external resistor
(Gain range 1 to 10,000)
- Wide power supply range (± 2.3 V to ± 18 V)
- Higher performance than 3 op amp IA designs
- Available in 8-lead DIP and SOIC packaging
- Low power, 1.3 mA max supply current
- Excellent dc performance (B grade)
- 50 μ V max, input offset voltage
- 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, input offset drift
- 1.0 nA max, input bias current
- 100 dB min common-mode rejection ratio ($G = 10$)

Low noise

- 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 kHz, input voltage noise
- 0.28 μ V p-p noise (0.1 Hz to 10 Hz)

Excellent ac specifications

- 120 kHz bandwidth ($G = 100$)
- 15 μ s settling time to 0.01%

APPLICATIONS

- Weight scales
- ECG and medical instrumentation
- Transducer Interface
- Data acquisition systems
- Industrial process controls
- Battery-powered and portable equipment

CONNECTION DIAGRAM

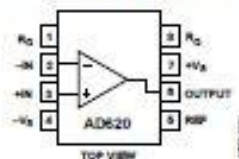


Figure 1. 8-Lead PDIP (A), CERDIP (Q), and SOIC (R) Packages.

PRODUCT DESCRIPTION

The AD620 is a low cost, high accuracy instrumentation amplifier that requires only one external resistor to set gains of 1 to 10,000. Furthermore, the AD620 features 8-lead SOIC and DIP packaging that is smaller than discrete designs and offers lower power (only 1.3 mA max supply current), making it a good fit for battery-powered, portable (or remote) applications.

The AD620, with its high accuracy of 40 ppm maximum nonlinearity, low offset voltage of 50 μ V max, and offset drift of 0.6 μ V/ $^{\circ}$ C max, is ideal for use in precision data acquisition systems, such as weight scales and transducer interfaces. Furthermore, the low noise, low input bias current, and low power of the AD620 make it well suited for medical applications, such as ECG and noninvasive blood pressure monitors.

The low input bias current of 1.0 nA max is made possible with the use of SuperBeta processing in the input stage. The AD620 works well as a preamplifier due to its low input voltage noise of 9 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ at 1 kHz, 0.28 μ V p-p in the 0.1 Hz to 10 Hz band, and 0.1 pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ input current noise. Also, the AD620 is well suited for multiplexed applications with its settling time of 15 μ s to 0.01%, and its cost is low enough to enable designs with one in-amp per channel.

Table 1. Next Generation Upgrades for AD620

Part	Comment
AD8221	Better specs at lower price
AD8222	Dual channel or differential out
AD8226	Low power, wide input range
AD8220	JFET input
AD8228	Best gain accuracy
AD8295	+2 precision op amps or differential out
AD8429	Ultra low noise

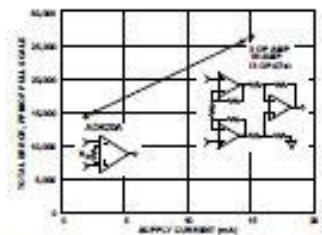


Figure 2. Three Op Amp Designs vs. AD620

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.326.8703 © 2003–2011 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

SPECIFICATIONS

Typical @ 25°C, $V_s = \pm 15$ V, and $R_L = 2$ k Ω , unless otherwise noted.
Table 2.

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
GAIN											
Gain Range	$G = 1 + (49.4 \text{ k}\Omega/R_L)$	1			1			1			
Gain Error ²	$V_{out} = \pm 10$ V	10,000			10,000			10,000			
G = 1			0.03	0.10		0.01	0.02		0.03	0.10	%
G = 10			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 100			0.15	0.30		0.10	0.15		0.15	0.30	%
G = 1000			0.40	0.70		0.35	0.50		0.40	0.70	%
Nonlinearity											
G = 1–1000	$V_{out} = -10$ V to $+10$ V		10	40		10	40		10	40	ppm
G = 1–100	$R_L = 10$ k Ω		10	95		10	95		10	95	ppm
G = 1–100	$R_L = 2$ k Ω		10	95		10	95		10	95	ppm
Gain vs. Temperature											
G = 1			10				10				ppm/°C
Gain > 1 ²			-50				-50				ppm/°C
VOLTAGE OFFSET											
(Total RTI Error = $V_{os} + V_{oc}/G$)											
Input Offset, V_{os}	$V_s = \pm 5$ V to ± 15 V		30	125		15	50		30	125	μ V
Overtolerance	$V_s = \pm 5$ V to ± 15 V		185				85				μ V
Average TC	$V_s = \pm 5$ V to ± 15 V		0.3	1.0		0.1	0.6		0.3	1.0	μ V/°C
Output Offset, V_{oc}	$V_s = \pm 15$ V		400	1000		200	500		400	1000	μ V
Overtolerance	$V_s = \pm 5$ V		1500				750				μ V
Average TC	$V_s = \pm 5$ V to ± 15 V		5.0	15		2.5	7.0		5.0	15	μ V/°C
Offset Referred to the Input vs. Supply (PSR)											
G = 1	$V_s = \pm 2.3$ V to ± 18 V		80	100		80	100		80	100	dB
G = 10			95	120		100	120		95	120	dB
G = 100			110	140		120	140		110	140	dB
G = 1000			110	140		120	140		110	140	dB
INPUT CURRENT											
Input Bias Current			0.5	2.0		0.5	1.0		0.5	2	nA
Overtolerance			2.5				1.5				nA
Average TC			3.0			3.0			8.0		pA/°C
Input Offset Current			0.3	1.0		0.3	0.5		0.3	1.0	nA
Overtolerance			1.5				0.75				nA
Average TC			1.5			1.5			8.0		pA/°C
INPUT											
Input Impedance			10 2				10 2				G Ω , pF
Differential			10 2				10 2				G Ω , pF
Common-Mode			10 2				10 2				G Ω , pF
Input Voltage Range ³	$V_s = \pm 2.3$ V to ± 5 V	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.2$	V
Overtolerance	$V_s = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.3$	V
Overtolerance	$V_s = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 1.9$		$+V_s - 1.4$	V
Overtolerance	$V_s = \pm 5$ V to ± 18 V	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.4$	$-V_s + 2.1$		$+V_s - 1.4$	V

AD620

Parameter	Conditions	AD620A			AD620B			AD620S ¹			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Common-Mode Rejection Ratio DC to 60 Hz with 1 kΩ Source Imbalance	$V_{CM} = 0 \text{ V to } \pm 10 \text{ V}$	$G = 1$	73	90	80	90	73	90			dB
$G = 10$		93	110	100	110	93	110			dB	
$G = 100$		110	130	120	130	110	130			dB	
$G = 1000$		110	130	120	130	110	130			dB	
OUTPUT											
Output Swing	$R_L = 10 \text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 5 \text{ V}$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	$-V_S + 1.1$		$+V_S - 1.2$	V
Overtemperature		$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 1.4$		$+V_S - 1.3$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.3$	V
Overtemperature		$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	$-V_S + 1.2$		$+V_S - 1.4$	V
Overtemperature Short-Circuit Current	$V_S = \pm 5 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.5$	$-V_S + 2.3$		$+V_S - 1.5$	V
			± 18			± 18		± 18			mA
DYNAMIC RESPONSE											
Small Signal -3 dB Bandwidth	10 V Step	$G = 1$		1000		1000		1000			kHz
$G = 10$			800		800		800			kHz	
$G = 100$			120		120		120			kHz	
$G = 1000$			12		12		12			kHz	
Slow Rate		0.75	1.2	0.75	1.2	0.75	1.2			V/ μs	
Settling Time to 0.01%											
$G = 1-100$			15		15		15				μs
$G = 1000$			150		150		150				μs
NOISE											
Voltage Noise, 1 kHz	Total RTI Noise = $\sqrt{(e_n^2) + (e_{nR}/G)^2}$	Input, Voltage Noise, e_n	9	13	9	13	9	13			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Output, Voltage Noise, e_{nR}		72	100	72	100	72	100			nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$	
RTI, 0.1 Hz to 10 Hz	$f = 1 \text{ kHz}$	$G = 1$	3.0		3.0	6.0	3.0	6.0			$\mu\text{V p-p}$
$G = 10$		0.55		0.55	0.8	0.55	0.8			$\mu\text{V p-p}$	
$G = 100-1000$		0.28		0.28	0.4	0.28	0.4			$\mu\text{V p-p}$	
Current Noise		100		100		100		100			fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
0.1 Hz to 10 Hz		10		10		10		10			pA p-p
REFERENCE INPUT											
R_{in}	$V_{REF}, V_{REF} = 0$	20		20		20		20			kΩ
I_{in}		50	60	50	60	50	60				μA
Voltage Range		$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.6$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.6$	$-V_S + 1.6$		$+V_S - 1.6$	V
Gain to Output		1 ± 0.0001		1 ± 0.0001		1 ± 0.0001		1 ± 0.0001			
POWER SUPPLY											
Operating Range ²	$V_S = \pm 2.3 \text{ V to } \pm 18 \text{ V}$	± 2.3		± 18	± 2.3		± 18	± 2.3		± 18	V
Quiescent Current		0.9	1.3	0.9	1.3	0.9	1.3	0.9	1.3		mA
Overtemperature		1.1	1.6	1.1	1.6	1.1	1.6	1.1	1.6		mA
TEMPERATURE RANGE											
For Specified Performance		-40 to +85		-40 to +85		-40 to +85		-55 to +125			°C

¹ See Analog Devices military data sheet for MDD tested specifications.

² Does not include effects of external resistor R_L .

³ One input grounded, $G = 1$.

⁴ This is defined as the same supply range that is used to specify PSR.

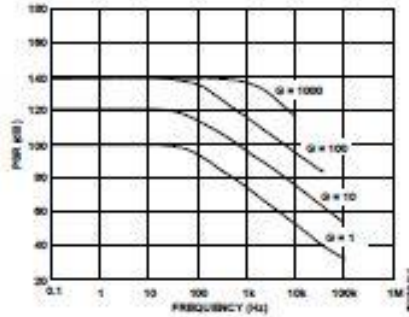


Figure 15. Positive PSR vs. Frequency, RTI (G = 1-1000)

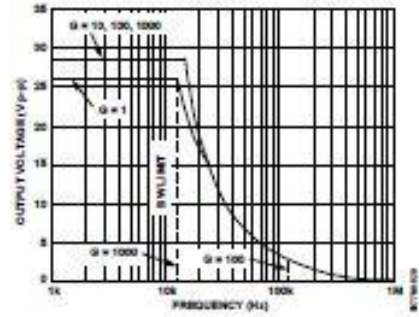


Figure 18. Large Signal Frequency Response

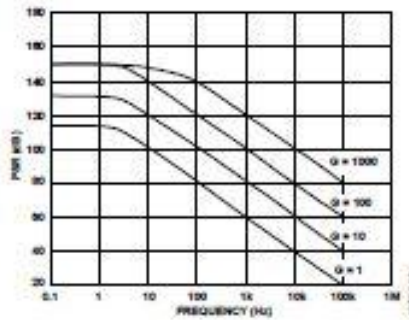


Figure 16. Negative PSR vs. Frequency, RTI (G = 1-1000)

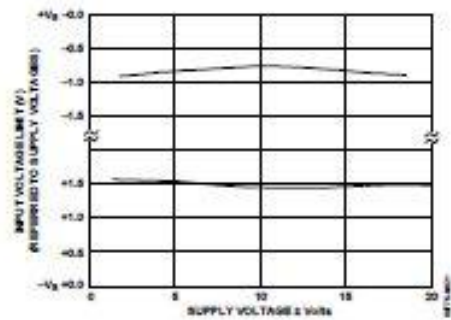


Figure 19. Input Voltage Range vs. Supply Voltage, G = 1

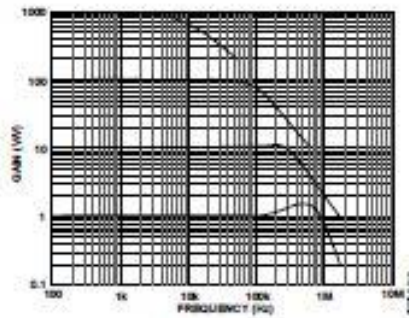


Figure 17. Gain vs. Frequency

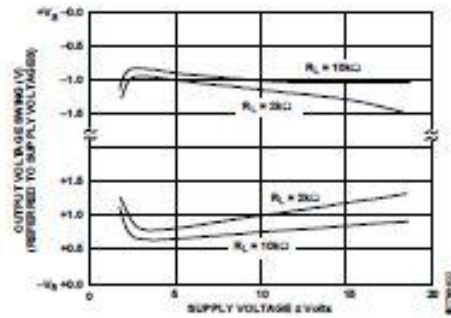


Figure 20. Output Voltage Swing vs. Supply Voltage, G = 10

THEORY OF OPERATION

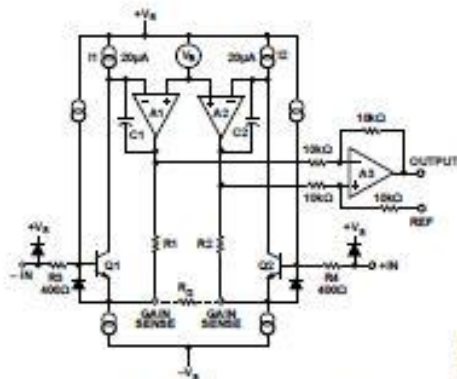


Figure 36. Simplified Schematic of AD620

The AD620 is a monolithic instrumentation amplifier based on a modification of the classic three op amp approach. Absolute value trimming allows the user to program gain accurately (to 0.15% at $G = 100$) with only one resistor. Monolithic construction and laser wafer trimming allow the tight matching and tracking of circuit components, thus ensuring the high level of performance inherent in this circuit.

The input transistors Q1 and Q2 provide a single differential-pair bipolar input for high precision (Figure 36), yet offer $10\times$ lower input bias current thanks to SuperBeta processing. Feedback through the Q1-A1-R1 loop and the Q2-A2-R2 loop maintains constant collector current of the input devices Q1 and Q2, thereby impressing the input voltage across the external gain setting resistor R_C . This creates a differential gain from the inputs to the A1/A2 outputs given by $G = (R_1 + R_2)/R_C + 1$. The unity-gain subtractor, A3, removes any common-mode signal, yielding a single-ended output referred to the REF pin potential.

The value of R_C also determines the transconductance of the preamp stage. As R_C is reduced for larger gains, the transconductance increases asymptotically to that of the input transistors. This has three important advantages: (a) Open-loop gain is boosted for increasing programmed gain, thus reducing gain related errors. (b) The gain-bandwidth product (determined by C1 and C2 and the preamp transconductance) increases with programmed gain, thus optimizing frequency response. (c) The input voltage noise is reduced to a value of $9\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$, determined mainly by the collector current and base resistance of the input devices.

The internal gain resistors, R1 and R2, are trimmed to an absolute value of 24.7 k Ω , allowing the gain to be programmed accurately with a single external resistor.

The gain equation is then

$$G = \frac{49.4\text{ k}\Omega}{R_C} + 1$$

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

Make vs. Buy: a Typical Bridge Application Error Budget

The AD620 offers improved performance over "homemade" three op amp IA designs, along with smaller size, fewer components, and $10\times$ lower supply current. In the typical application, shown in Figure 37, a gain of 100 is required to amplify a bridge output of 20 mV full-scale over the industrial temperature range of -40°C to $+85^\circ\text{C}$. Table 4 shows how to calculate the effect various error sources have on circuit accuracy.

Regardless of the system in which it is being used, the AD620 provides greater accuracy at low power and price. In simple systems, absolute accuracy and drift errors are by far the most significant contributors to error. In more complex systems with an intelligent processor, an autogain/autozero cycle removes all absolute accuracy and drift errors, leaving only the resolution errors of gain, nonlinearity, and noise, thus allowing full 14-bit accuracy.

Note that for the homebrew circuit, the OP07 specifications for input voltage offset and noise have been multiplied by $\sqrt{2}$. This is because a three op amp type in-amp has two op amps at its inputs, both contributing to the overall input error.

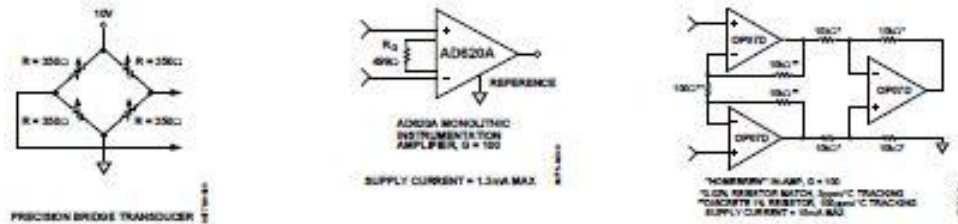


Figure 37. Make vs. Buy

Table 4. Make vs. Buy Error Budget

Error Source	AD620 Circuit Calculation	"Homebrew" Circuit Calculation	Error, ppm of Full Scale	
			AD620	Homebrew
ABSOLUTE ACCURACY at $T_A = 25^\circ\text{C}$				
Input Offset Voltage, μV	125 $\mu\text{V}/20\text{ mV}$	$(150\ \mu\text{V} \times \sqrt{2})/20\text{ mV}$	6,250	10,607
Output Offset Voltage, μV	1000 $\mu\text{V}/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	$(150\ \mu\text{V} \times 2)/100/20\text{ mV}$	500	150
Input Offset Current, nA	2 nA $\times 350\ \Omega/20\text{ mV}$	6 nA $\times 350\ \Omega/20\text{ mV}$	18	53
CMR, dB	110 dB (3.16 ppm) $\times 5\text{ V}/20\text{ mV}$	0.02% Match $\times 5\text{ V}/20\text{ mV}/100$	791	500
		Total Absolute Error	7,559	11,310
DRIFT TO 85°C				
Gain Drift, ppm/ $^\circ\text{C}$	(50 ppm + 10 ppm) $\times 60^\circ\text{C}$	100 ppm/ $^\circ\text{C}$ Track $\times 60^\circ\text{C}$	3,600	6,000
Input Offset Voltage Drift, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	1 $\mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 60^\circ\text{C}/20\text{ mV}$	$(2.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C} \times \sqrt{2} \times 60^\circ\text{C})/20\text{ mV}$	3,000	10,607
Output Offset Voltage Drift, $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	15 $\mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 60^\circ\text{C}/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	$(2.5\ \mu\text{V}/^\circ\text{C} \times 2 \times 60^\circ\text{C})/100\text{ mV}/20\text{ mV}$	450	150
		Total Drift Error	7,050	16,757
RESOLUTION				
Gain Nonlinearity, ppm of Full Scale	40 ppm	40 ppm	40	40
Typ 0.1 Hz to 10 Hz Voltage Noise, μV p-p	0.28 μV p-p/20 mV	$(0.38\ \mu\text{V}$ p-p $\times \sqrt{2})/20\text{ mV}$	14	27
		Total Resolution Error	54	67
		Grand Total Error	14,663	28,134

G = 100, $V_A = \pm 15\text{ V}$.
(All errors are min/max and referred to input.)

Precision V-I Converter

The AD620, along with another op amp and two resistors, makes a precision current source (Figure 40). The op amp buffers the reference terminal to maintain good CMR. The output voltage, V_x , of the AD620 appears across R_1 , which converts it to a current. This current, less only the input bias current of the op amp, then flows out to the load.

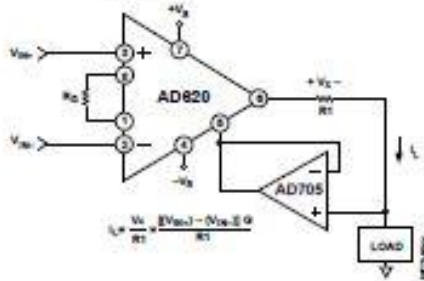


Figure 40. Precision Voltage-to-Current Converter (Operates on 1.8 mA, ±1 V)

GAIN SELECTION

The AD620 gain is resistor-programmed by R_G , or more precisely, by whatever impedance appears between Pins 1 and 8. The AD620 is designed to offer accurate gains using 0.1% to 1% resistors. Table 5 shows required values of R_G for various gains. Note that for $G = 1$, the R_G pins are unconnected ($R_G = \infty$). For any arbitrary gain, R_G can be calculated by using the formula:

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

To minimize gain error, avoid high parasitic resistance in series with R_G ; to minimize gain drift, R_G should have a low TC—less than 10 ppm/°C—for the best performance.

Table 5. Required Values of Gain Resistors

1% Std Table Value of R_G (Ω)	Calculated Gain	0.1% Std Table Value of R_G (Ω)	Calculated Gain
49.9 k	1.990	49.3 k	2.002
12.4 k	4.984	12.4 k	4.984
5.49 k	9.998	5.49 k	9.998
2.61 k	19.93	2.61 k	19.93
1.00 k	50.40	1.01 k	49.91
499	100.0	499	100.0
249	199.4	249	199.4
100	495.0	98.8	501.0
49.9	991.0	49.3	1,003.0

INPUT AND OUTPUT OFFSET VOLTAGE

The low errors of the AD620 are attributed to two sources, input and output errors. The output error is divided by G when referred to the input. In practice, the input errors dominate at high gains, and the output errors dominate at low gains. The total V_{os} for a given gain is calculated as

$$\text{Total Error RTI} = \text{input error} + (\text{output error}/G)$$

$$\text{Total Error RTO} = (\text{input error} \times G) + \text{output error}$$

REFERENCE TERMINAL

The reference terminal potential defines the zero output voltage and is especially useful when the load does not share a precise ground with the rest of the system. It provides a direct means of injecting a precise offset to the output, with an allowable range of 2 V within the supply voltages. Parasitic resistance should be kept to a minimum for optimum CMR.

INPUT PROTECTION

The AD620 safely withstands an input current of +60 mA for several hours at room temperature. This is true for all gains and power on and off, which is useful if the signal source and amplifier are powered separately. For longer time periods, the input current should not exceed 6 mA.

For input voltages beyond the supplies, a protection resistor should be placed in series with each input to limit the current to 6 mA. These can be the same resistors as those used in the RFI filter. High values of resistance can impact the noise and AC CMRR performance of the system. Low leakage diodes (such as the BAV199) can be placed at the inputs to reduce the required protection resistance.

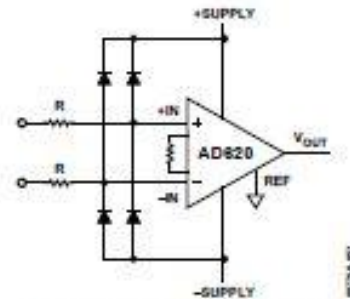
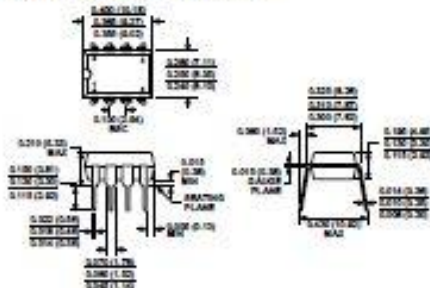


Figure 41. Diode Protection for Voltages Beyond Supply

RF INTERFERENCE

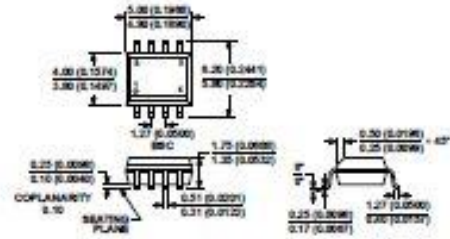
All instrumentation amplifiers rectify small out of band signals. The disturbance may appear as a small dc voltage offset. High frequency signals can be filtered with a low pass R-C network placed at the input of the instrumentation amplifier. Figure 42 demonstrates such a configuration. The filter limits the input

OUTLINE DIMENSIONS



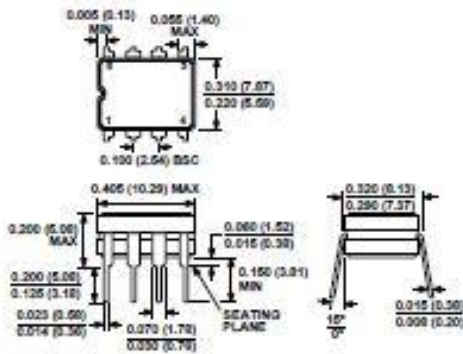
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-001
 CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS
 (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR
 REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.
 COOPER LEAD MAY BE CONSIDERED AS WHOLE OR HALF LEAD.

Figure 50. 8-Lead Plastic Dual In-Line Package (PDIP)
 Narrow Body (N-8)
 Dimensions shown in inches and (millimeters)



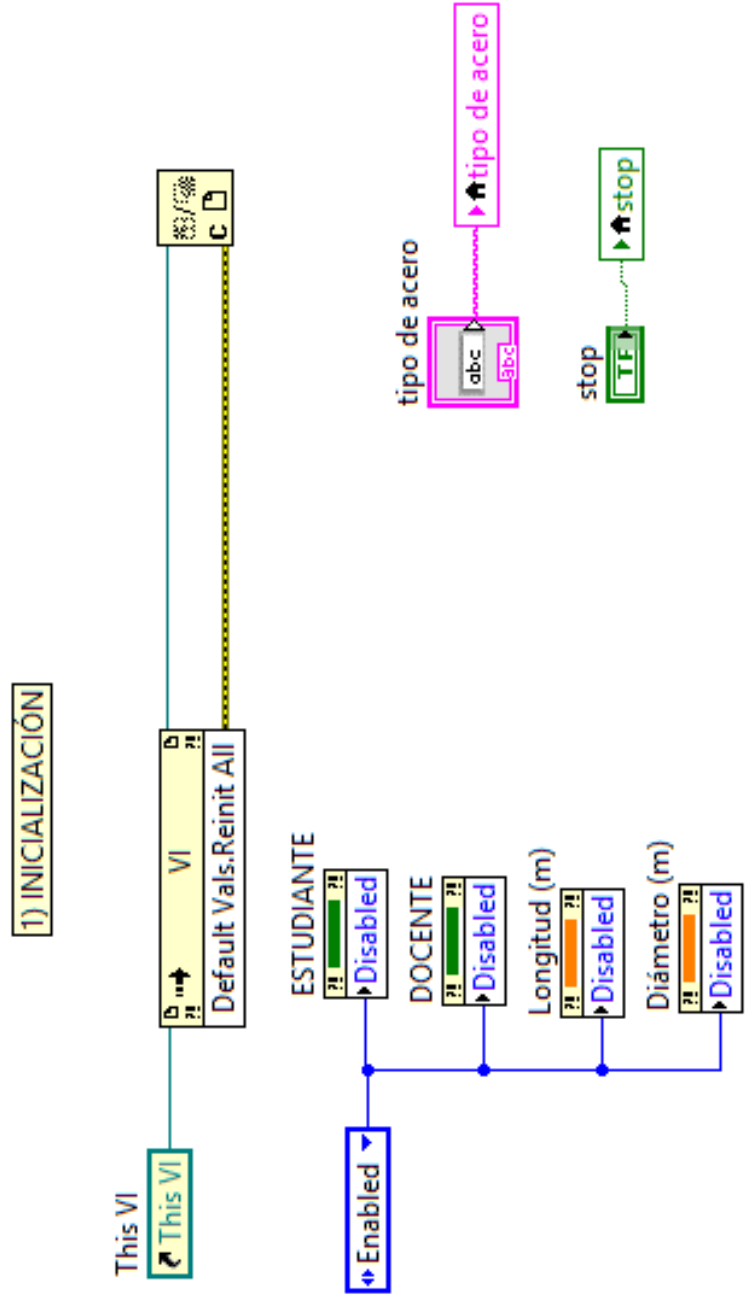
COMPLIANT TO JEDEC STANDARDS MS-012-AA
 CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS; INCH DIMENSIONS
 (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF MILLIMETER EQUIVALENTS FOR
 REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

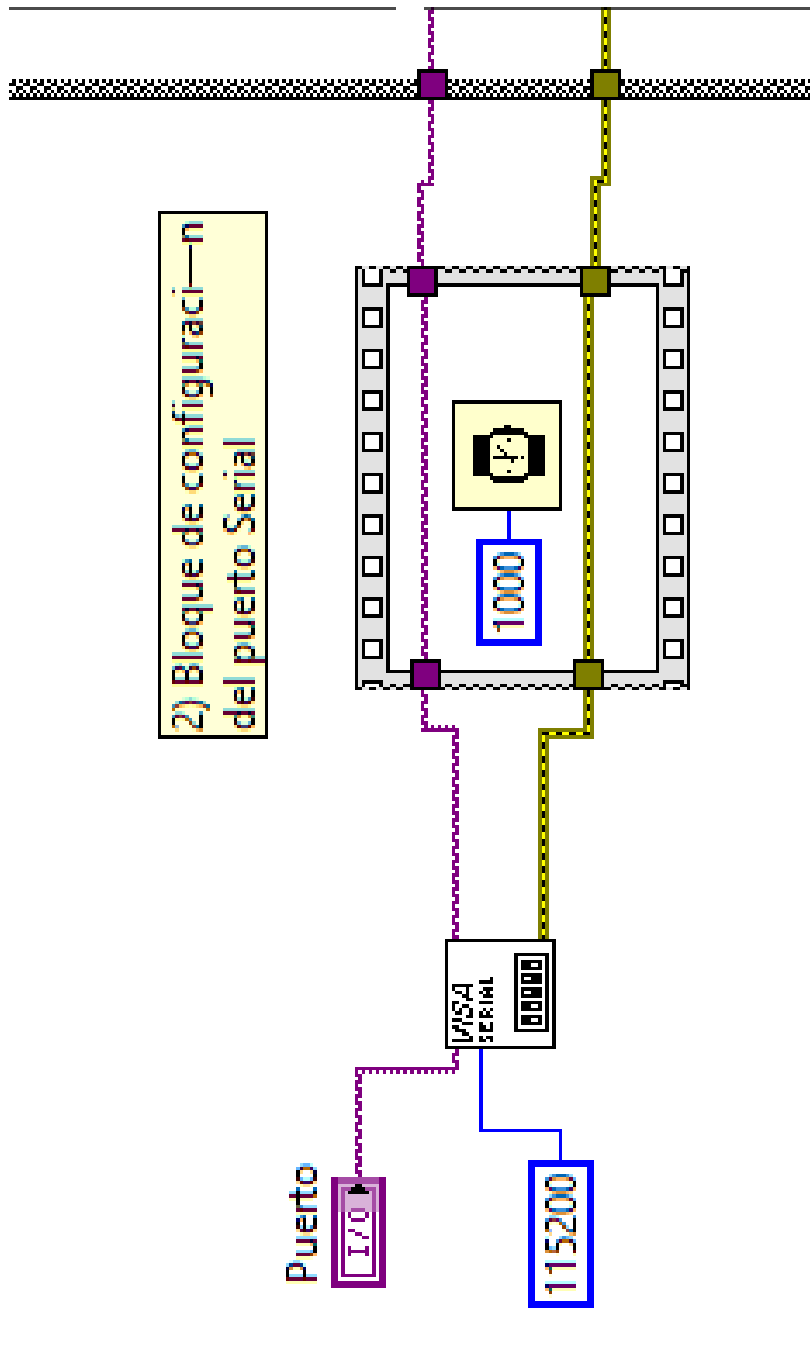
Figure 52. 8-Lead Standard Small Outline Package (SOIC, N)
 Narrow Body (N-8)
 Dimensions shown in millimeters and (inches)



CONTROLLING DIMENSIONS ARE IN INCHES; MILLIMETER DIMENSIONS
 (IN PARENTHESES) ARE ROUNDED-OFF INCH EQUIVALENTS FOR
 REFERENCE ONLY AND ARE NOT APPROPRIATE FOR USE IN DESIGN.

Figure 51. 8-Lead Ceramic Dual In-Line Package (CERDIP)
 (Q-8)
 Dimensions shown in inches and (millimeters)





2) Bloque de configuración del puerto Serial

3) PARAMETROS INICIALES

