

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA BASADA EN RESONANCIA PARA
ENSAYOS DE FATIGA A FLEXION EN PROBETAS METALICAS**

NESTOR PEREZ SAMACA

JONATHAN FORERO NARANJO



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2009**

**DESARROLLO DE UNA METODOLOGIA BASADA EN RESONANCIA PARA
ENSAYOS DE FATIGA A FLEXION EN PROBETAS METALICAS**

NESTOR PEREZ SAMACA

JONATHAN FORERO NARANJO

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR
ALFONSO SANTOS JAIMES
Ingeniero Mecánico
Msc. Diseño de Maquinas**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA
2009**

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Septiembre de 2009

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo de grado, ante todo, a Dios, que me ha acompañado a lo largo de la vida, quien me guía y me protege de todas las adversidades que se presentan día a día , por darme salud, inteligencia, sabiduría, fuerza y serenidad.

A mis padres Hildebrando Pérez y Myriam Samacá por enseñarme lo importante y bello que es la vida, quienes me han formado con valores y cualidades que son importantes en la educación de una persona sin dejar de confiar y creer en mí para poder obtener triunfos y metas en la vida.

A mi hermana Zulma Pérez que siempre ha sido mi gran consejera, confidente y amiga siendo la persona que más animo y valentía me da para enfrentar retos en este mundo.

A mi esposa Lady Pérez quien me apoyo emocionalmente en los momento más difíciles que se interponen para la culminación de un logro y una meta acompañándome en cada instante.

A mis abuelos, tíos, primos, etc. Que también confiaron y creyeron en mí y de una u otra manera hacen parte de esta meta alcanzada.

A toda la gente que me acompañó en esta etapa de mi vida. Docentes, amigos y compañeros que me brindaron su amistad y fueron parte de mi formación personal y profesional.

Néstor Pérez Samacá

DEDICATORIA

A Dios gracias por que ha sido mi guía en este proceso de formación profesional gozando siempre de buena salud, sabiduría, entendimiento, paciencia y después de tanto esfuerzo y dedicación, he culminado uno de los logros que me propuse. También te agradezco por la oportunidad que me diste de ser padre y tener ahora un motivo más para continuar en este largo transcurrir.

Con todo mi corazón les ofrezco este título a mis padres, a mi papá Martin Forero porque con todo su sufrimiento, su dedicación al trabajo, han hecho de mí una persona honesta, sencilla y responsable. Padre querido gracias por haberme dado la oportunidad de estudiar, he aquí el resultado de tus esfuerzos durante estos años.

Para mi mamá Marina Naranjo con todo mi amor, este título es una de las cosas más pequeñas que puedo brindarte pero con toda la felicidad que me embarga, porque con todo el amor que me has dado no existe regalo para agradecerte todo lo que has hecho por mí. Gracias por tus consejos, por estar conmigo en los momentos más difíciles de mi vida, gracias por ser mi amiga, consejera y sobretodo una buena mamá.

A mis hermanos para que continúen con cada uno de sus sueños, tal como algún día lo hice yo y cumpliendo con lo que me propuse. A mi hermanita Leidy y mi hermano Ferney gracias por ser tan buenos hermanos y tíos, por apoyarme cuando tuve problemas, porque me dieron animo cuando lo necesite, gracias por hacerme reír con su forma de ser. Este no solo es motivo de felicidad para mí sino también para todas aquellas personas que confiaron en mí el día que salí de casa, a la memoria de mis abuelos, a mis tíos, primos y quienes a pesar de no ser de la familia me apoyaron moralmente .

A ti mi Amor Claudia Marcela Díaz por tenerme tanta paciencia, a ti mi psicóloga de confianza por haber llegado a mi vida y amarme como tú lo haces, a ti por darme el regalo más lindo que un papa quisiera tener.

A Sarita mi princesa quien colma mi corazón de felicidad y por quien de ahora en adelante mi sacrificio será más grande para que crezcas en un hogar rodeado de unos lindos padres como los tengo yo.

Jonathan Forero Naranjo

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ingeniero Alfonso Santos por su colaboración como director de proyecto por su constante apoyo en el desarrollo de esta metodología y por brindarnos su amistad. Al ingeniero Gilberto Fontecha por la orientación dada en el tema de vibraciones, a sus amplios conocimientos en la industria y por compartir el laboratorio de sonido y vibraciones para llevar a cabo el proyecto .Al Ingeniero Edwin Córdoba por la experiencia y sus amplio conocimientos en el área de la automatización y control a su preocupación en la evolución del proyecto, a su excelente forma de ser .Al Ingeniero Emil Hernández quien nos colaboró en el proceso estadístico a los Ingenieros Wilson Jaimes, Miguel Ángel Reyes, Javier castellanos y Jorge Santamaría por las recomendaciones y a todos aquellos docentes que nos enseñaron las bases fundamentales en este proceso de formación profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS	19
1.1	Objetivo General	19
1.2	Objetivos Específicos	19
2.	MARCO TEORICO	21
2.1	TERMINOLOGÍA USADA	21
2.1.1	Fatiga	21
2.1.2	Diagrama S - N	21
2.1.3	Regímenes de fatiga	22
2.1.4	Esfuerzo de flexión	22
2.1.5	Momento de inercia	23
2.1.6	Resonancia	23
2.1.7	Cargas por fatiga.	23
2.1.8	Frecuencia natural de vibración	25
2.2	RESISTENCIA ESTÁNDAR A LA FATIGA POR ROTACIÓN Y FLEXIÓN.	25
2.3	MODOS DE VIBRACIÓN	28
2.4	MOMENTO INTERNO DE FLEXIÓN	29
2.5	ESTIMACIÓN DE LA MUESTRA O INTERVALO DE CONFIANZA.	33
3.	METODOLOGIA	35
3.1	METODOLOGÍA GENERAL	35
3.2	DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	36
3.2.1	Revisión bibliográfica sobre teorías de fatiga	36
3.2.2	Selección de los parámetros de la probeta	37
3.2.2.1	Material de las probetas	37

3.2.3	Dimensiones de las probetas _____	38
3.2.3.1	Longitud y diámetro _____	38
3.2.4	Selección del montaje para la evaluación de la probeta _____	46
3.2.4.1	Equipos e instrumentos usados para el montaje _____	46
3.2.4.2	Tipos de apoyos usados para el montaje _____	51
3.2.4.2.1	Empotrada en ambos extremos _____	51
3.2.4.2.2	Simplemente apoyada _____	52
3.2.4.2.3	Apoyo libre _____	53
3.2.4.3	Ubicación de los equipos e instrumentación _____	54
3.2.4.3.1	Ubicación del shaker _____	54
3.2.4.3.2	Ubicación de los sensores PCB 352C34 _____	54
3.2.4.3.3	Ubicación del sensor de fuerza PCB 208C02 _____	55
3.2.5	Montaje final para la realización de pruebas _____	56
3.2.6	Procesamiento de la información _____	57
4.	RESULTADOS Y ANALISIS _____	58
4.1	CALCULOS _____	58
4.1.1	Tamaño de muestra _____	58
4.1.2	Estimación del esfuerzo ultimo a tensión. _____	63
4.1.3	Estimación de la resistencia teórica a la fatiga _____	64
4.1.4	Calculo de resistencia a la fatiga Corregida _____	65
4.1.5	Factores de corrección aplicables a la resistencia a la fatiga _____	65
4.2	RESULTADOS PRUEBAS _____	69
5.	CONCLUSIONES _____	78
6.	RECOMENDACIONES _____	80
7.	BIBLIOGRAFIA _____	81
8.	ANEXOS _____	83
8.1	ANEXO 1: GRAFICAS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS REALIZADAS _____	83

8.2	ANEXO 2: MANUAL SHAKER_____	100
8.3	ANEXO 3: MANUAL FUENTE AMPLIFICADORA MB500VI _____	102
8.4	ANEXO 4: MANUAL TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE SONIDO Y VIBRACION NI9233 _____	103
8.5	ANEXO 5: MANUAL TARJETA DE GENERACION DE DATOS NI9263 _____	108
8.6	ANEXO 6: MANUAL SENSOR DE FUERZA PCB 208C02 _____	110
8.7	ANEXO 7: MANUAL SENSOR DE ACELERACION PCB 352C34 _____	117
8.8	ANEXO 8: PROGRAMACION REALIZADA EN LABVIEW PARA LA GENERACION DE LA GRAFICA DE FATIGA. _____	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: gráfica representativa S Vs. N. _____	21
Figura 2: gráficas de esfuerzos totalmente alternantes, repetidos y fluctuantes. _____	24
Figura 3: Maquina de R.R. Moore para pruebas de fatiga rotatoria – flexión _____	26
Figura 4: Diagrama S-N o de vida –resistencia de wohler. _____	26
Figura 5: Gráfica de fatiga con información sobrepuesta con los puntos de fractura de diferentes probetas. _____	27
Figura 6: representación de modos de vibración en una cuerda _____	28
Figura 7: Deformación de la probeta en el primer modo de vibración. _____	29
Figura 8: Diagrama de la probeta donde se denota la posición $X=0$ _____	30
Figura 9: Metodología General _____	35
Figura 10: Probetas con las cuales se realizaron las pruebas. _____	39
Figura 11: Resultados obtenidos de la probeta # 1. _____	40
Figura 12: Resultados obtenidos de la probeta # 2 _____	42
Figura 13: Resultados obtenidos de la probeta # 3 _____	44
Figura14: foto del shaker con el cual se realizaron las pruebas. _____	47
Figura 15: foto del chasis NI CompactDAQ NIcDAQ-9172 con el cual se realizaron las pruebas. _____	49
Figura 16: foto de la tarjeta de adquisicion NI 9233 con la cual se realizaron las pruebas. _____	49

Figura 17: foto de la tarjeta de generacion de datos con la cual se realizaron las pruebas.	50
Figura 18: foto sensor de aceleracion	50
Figura 19: foto sensor de fuerza	51
Figura 20: Probeta empotrada en ambos extremos	52
Figura 21: Probeta sostenida en un apoyo simple	53
Figura 22: Probeta con apoyos libres	53
Figura 23: Posicion adecuada del shaker	54
Figura 24: Posicion del acelerometro en el extremo de la probeta.	55
Figura 25: Sensor de fuerza se ubica en la mitad de la probeta.	55
Figura 26: Montaje final para realización de pruebas de fatiga	56
Figura 27. foto de la maquina universal	63
Figura 28. Probetas usadas para el ensayo a tracción	64
Figura 29: gráfica teórica de esfuerzo Vs. número de ciclos.	68
Figura 30. Foto de falla por fatiga de probeta AISI 1020.	69
Figura 31. Probeta de acero AISI 1020 finalizada	70
Figura 32. Evidencia de pruebas realizadas en 17 Probeta de acero AISI 1020. Con falla por fatiga	71
Figura 33: gráfica de esfuerzo Vs. Numero de ciclos de una prueba de fatiga a flexión basada en resonancia.	72

Figura 34: Visualización de la grieta causada por fatiga _____75

Figura 35: Propagación de la grieta causada por fatiga _____76

Figura 36: Probeta fracturada en la cual se pueden ver las marcas dejadas por la fatiga. _____76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades químicas del acero AISI 1020. _____	37
Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero AISI 1020. _____	38
Tabla 3: Frecuencias Naturales encontradas en Labview comparadas con las frecuencias naturales encontradas en Ansys _____	46
Tabla 4. Especificaciones del MODAL 50 A EXCITER. _____	48
Tabla 5: valores de esfuerzo promedio y desviación estándar de 5 pruebas realizadas. _____	60
Tabla 6: numero de ciclos de la probeta antes de fracturarse en cinco pruebas para determinar el esfuerzo promedio y la desviación estándar. _____	61
Tabla 7: número de pruebas que se deben realizar según el margen de error para el número de ciclos _____	62
Tabla 8: datos obtenidos en la prueba de tracción realizada en el laboratorio de resistencia de materiales. _____	63
Tabla 9: Coeficiente para la ecuación de factor superficial. _____	66
Tabla 10: Factor de confiabilidad para reducción de la resistencia _____	67
Tabla11: Datos teóricos para graficar el esfuerzo Vs. El numero de ciclos _____	69
Tabla 12: Resultados obtenidos según la prueba realizada _____	73

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA BASADA EN RESONANCIA PARA ENSAYOS DE FATIGA A FLEXIÓN EN PROBETAS METÁLICAS.

AUTORES: Jonathan Forero Naranjo.
Néstor Pérez Samacá

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Mecánica

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

RESUMEN

Este trabajo de grado está enfocado hacia el desarrollo de una metodología, para la elaboración de ensayos de fatiga a flexión basados en el uso de la frecuencia natural de vibración, haciendo que la probeta entre en resonancia con el fin de realizar ensayos de fatiga reduciendo el tiempo de duración de la prueba y obtener un resultado similar a los de una prueba de fatiga a flexión convencional. Las pruebas de fatiga a flexión tienden a durar largos periodos de tiempo alrededor de 14 días en una máquina capaz de realizar 5000 rpm para completar 10^8 ciclos usado el método de la viga rotatoria de RR. Moore. Por tal razón se experimentara una nueva metodología de fatiga a flexión mediante resonancia que pueda cumplir las mismas condiciones que la viga rotativa a flexión, la cual es sometida a tensión y compresión en los puntos más alejados del centro de la probeta produciendo un esfuerzo cíclico. Se obtiene una grafica en la cual se pueda conocer el esfuerzo al que fue sometida la probeta junto con el número de ciclos transcurridos antes de que la probeta falle. Se realizarán diversas pruebas variando las dimensiones de la probeta y los apoyos, para encontrar la forma más adecuada de realizar el ensayo. Los resultados obtenidos en la grafica se comparan con la grafica teórica de fatiga para el tipo de acero de la probeta y de

este modo evaluar si el método de resonancia es apropiado para, el estudio de las cargas cíclicas o cargas de fatiga a flexión en materiales metálicos.

PALABRAS CLAVES: Fatiga, Resonancia, Esfuerzo, Frecuencia natural, Numero de ciclos, Carga cíclica.

GENERAL ABSTRACT OF WORK OF DEGREE

TITLE: DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY BASED ON RESONANCE FOR FATIGUE TESTING OF A METAL BENDING SPECIMENS.

AUTHOR: Jonathan Forero Naranjo
Néstor Pérez Samacá

FACULTY: Faculty of Mechanical Engineering

DIRECTOR: Alfonso Santos Jaimes

ABSTRACT

This graduate work is focused on developing a methodology for the development of flexural fatigue tests based on the use of the natural frequency of vibration, to which the specimen enters into resonance with the aim of reducing fatigue testing the duration of the test, the simplicity to be assembled and have a similar result to a test of conventional flexural fatigue. The flexural fatigue tests tend to last long periods around 14 days on a machine capable of 5000 rpm to complete 10^8 cycles used the rotating-beam method of RR. Moore. For this reason, experience a new methodology for flexural resonance fatigue that may meet the same conditions as the rotating beam bending, which is under tension and compression at points farther from the center of the specimen producing a cyclical stress. You get a graph in which to know the effort that was put the test tube along with the number of cycles elapsed before the specimen fails. Various tests were performed by varying the dimensions of the specimen and the supports, to find the most appropriate way to perform the test. The results in figure compares with the theoretical graph of fatigue for the material which comprises the probe and thereby

assess whether the resonance method is suitable for the study of cyclic loading and fatigue loading in bending metallic materials.

KEYWORDS: Fatigue, Resonance, Stress, Natural frequency, Number cycles, Cyclic loading.

INTRODUCCION

La falla por fatiga en materiales metálicos es una de las causas de daño de maquinas más comunes en la industria, por tal motivo se ha investigado como se produce este daño y las técnicas que existen para comprender el fenómeno.

En este libro se puede encontrar el desarrollo de una metodología basada en resonancia para ensayos de fatiga a flexión en probetas metálicas comenzando en los primeros capítulos con el conocimiento de los conceptos básicos que se devén saber para entender el posterior desarrollo del proyecto. En los capítulos siguientes se encuentra la metodología que se llevo a cabo para la realización de las pruebas y la obtención de los resultados con su respectivo análisis, finalizando con las conclusiones y recomendaciones.

Este estudio se realiza para comparar los resultados obtenidos en la grafica de fatiga utilizando el método de resonancia con la gráfica teórica de fatiga y decir si este nuevo método es viable para la realización de dicha prueba, teniendo como soporte el estudio de las vibraciones y la frecuencia de resonancia para producir una falla por fatiga en menor tiempo y saber la vida útil del material cuando es sometido a una carga cíclica.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo General

- Desarrollar una metodología para la elaboración de ensayos de fatiga a flexión en probetas metálicas cilíndricas de acero AISI 1020 mediante resonancia, obteniendo una grafica de Esfuerzo vs. número de ciclos que sea comparable con la gráfica teórica para ensayos de fatiga. La validación de esta nueva metodología podría reducir de una forma significativa el tiempo de duración de estos ensayos.

1.2 Objetivos Específicos

- Encontrar la bibliografía e información referente a los ensayos de fatiga rotativa a flexión según wohler. Resultado: obtener la gráfica de Esfuerzos vs. Numero de ciclos de los materiales AISI 1020 o la gráfica teórica para ensayos de fatiga. Indicador: El ensayo debe ser a flexión y el material debe coincidir con el del proyecto.
- Diseñar ensayos en probetas metálicas cilíndricas sometidos a resonancia, que generen una gráfica de esfuerzos vs. número de ciclos. Resultado: obtener la gráfica S vs. N Indicador: Las gráficas deben ser comparables con las graficas teóricas de fatiga para acero AISI 1020. Comparar la gráfica obtenida en el ensayo con la grafica teórica de fatiga

- Comparar la gráfica obtenida en el ensayo con la grafica teórica de fatiga
Resultado: Análisis comparativo Indicador: Validar estadísticamente los resultados con los de la gráfica de wohler.

- Realizar pruebas en ANSYS para optimizar las dimensiones de las probetas tomando como referencia las graficas teóricas de fatiga para la simulación.
Resultado: Obtener gráfica con las dimensiones correspondientes de las probetas Indicador: El porcentaje de error entre los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos con ANSYS

2. MARCO TEORICO

2.1 TERMINOLOGÍA USADA

Para el desarrollo de una metodología basada en resonancia para ensayos de fatiga a flexión se deben conocer conceptos importantes y útiles para entender el objetivo del proyecto

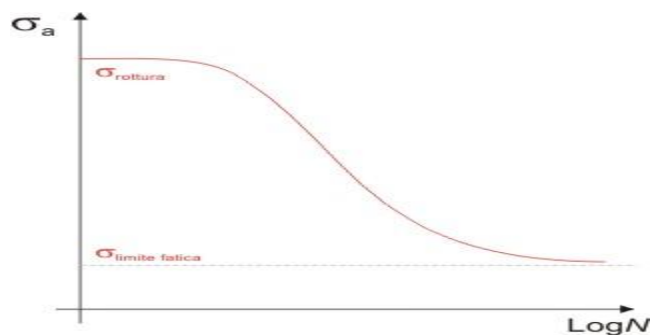
2.1.1 Fatiga

Fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual se da la ruptura de los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas o fuerzas repetidas aplicadas sobre el material. La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes. Su principal peligro es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática y se produzca una fractura en el material anticipadamente. [1], [14], [15]

2.1.2 Diagrama S - N

Es un método estándar para presentar información relativa a fatiga en un material. Este diagrama está representado en una grafica que se puede ver en la figura 1 cuyos valores son el esfuerzo que soporta la probeta contra el logaritmo del número de ciclos a la falla. [1], [18]

Figura 1: gráfica representativa S Vs. N.



Tomado de: AVILÉS González Rafael. Análisis de fatiga en maquinas. Thomson Learning. México año 2000. 476p

2.1.3 Regímenes de fatiga

En los diagramas de fatiga se indican diferentes tipos de comportamientos en la medida que se incrementan el número de ciclos a la falla. Hay dos tipos de régimen que son fatiga de bajo y alto ciclaje, en la cual se tiene en cuenta el número de ciclos u oscilación que realice la probeta; también se puede hacer la diferenciación entre vida finita y vida infinita. [1], [18]

❖ Fatiga de bajo ciclaje

Se dice fatiga de bajo ciclaje cuando una carga causa la falla por debajo de 1000 ciclos. [1]

❖ Fatiga de alto ciclaje

Fatiga de alto ciclaje es cuando la vida útil de la probeta esta en el rango de 10^3 y 10^6 ciclos. La gran mayoría de ocasiones se encuentran los componentes trabajando a este régimen. [1]

❖ Vida finita

Un componente tiene vida finita cuando su rango de duración se encuentra entre 10^3 y 10^6 ciclos. Este valor se puede aumentar hasta un poco antes de 10^7 ciclos dependiendo del material con el cual se fabricó la pieza. [1]

❖ Vida infinita

Vida infinita es cuando una pieza o componente sobrepasa los 10^7 ciclos. Se entiende que si sobrepasa este rango la pieza va a tener una vida infinita lo que quiere decir que nunca llega a la ruptura. [1]

2.1.4 Esfuerzo de flexión

Es la combinación de tensiones fuerzas de tracción y compresión que se desarrollan en la sección transversal de un elemento estructural para resistir una fuerza transversal. Las cuales se pueden calcular con la ecuación 1 que involucra al momento flector y el momento de inercia. [1], [18]

$$\sigma = \frac{M * c}{I} \quad \text{Ecuación 1}$$

M = momento flector

I = inercia

C = distancia a la fibra más lejana

2.1.5 Momento de inercia

El momento de inercia es una magnitud escalar que refleja la distribución de masas de un cuerpo o un sistema de partículas en rotación, respecto al eje de giro. El momento de inercia sólo depende de la geometría del cuerpo y de la posición del eje de giro; pero no depende de las fuerzas que intervienen en el movimiento. El momento de inercia para una barra cilíndrica esta dado por la ecuación 2 que está en función del diámetro. [2], [18]

$$I = \frac{\pi * D^4}{64} \quad \text{Ecuación 2}$$

2.1.6 Resonancia

El fenómeno de resonancia en un sistema de un grado de libertad tiene lugar cuando el sistema se somete a una excitación externa cuya frecuencia es próxima a la frecuencia natural de vibración, produciéndose en este caso un incremento progresivo de la amplitud de la vibración que puede llegar a ser peligroso para la integridad del sistema. El incremento de la vibración tiende a infinito en el caso de un sistema no amortiguado y es tanto menos grave cuando mayor es el amortiguamiento existente en el mismo. [4], [20],

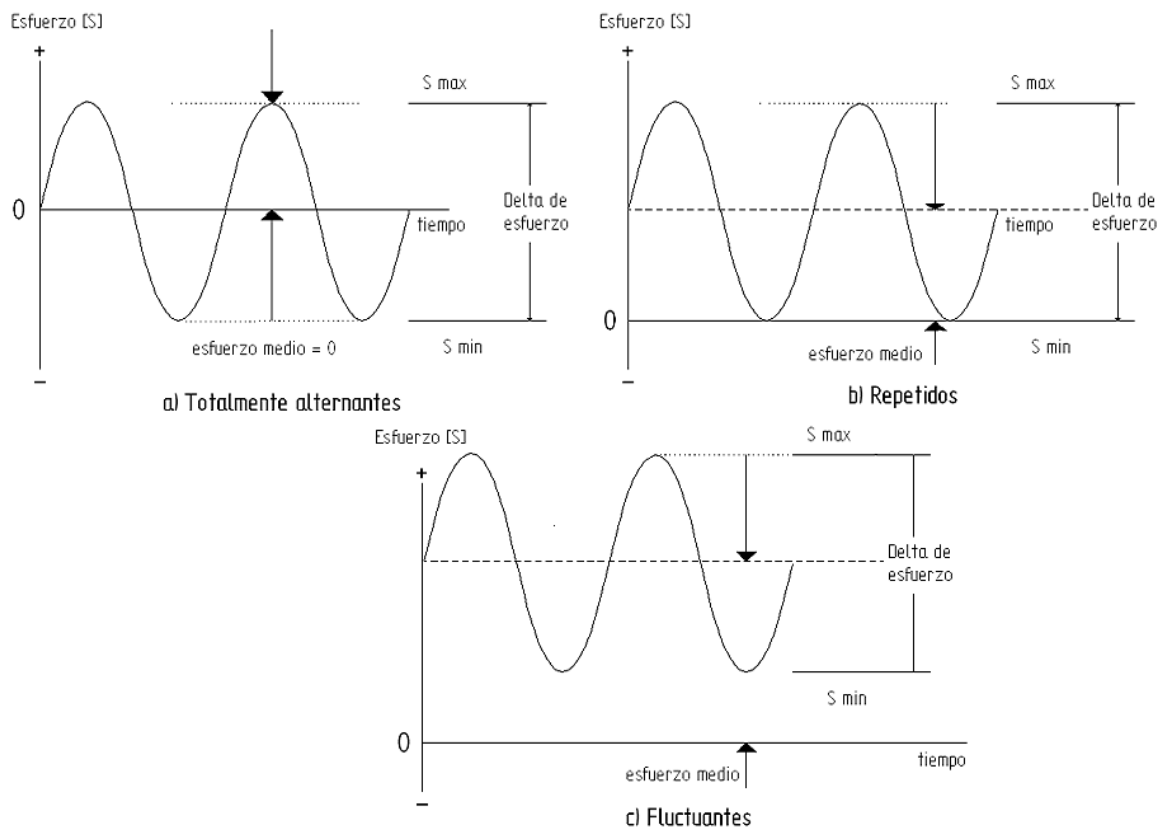
2.1.7 Cargas por fatiga.

Cualquier carga que varié con el tiempo puede causar falla por fatiga. Por ello se deben tener en cuenta la manera como se aplica, la cual hace que la pieza o elemento de una máquina que está soportando una fuerza que este en variación

con el tiempo genere esfuerzos totalmente alternantes, repetidos y fluctuantes como se ve en la figura 2 teniendo un efecto significativo en la vida por fatiga. [3],[18]

- **Esfuerzo totalmente alternante:** Es cuando el valor medio del esfuerzo que varia con el tiempo es igual a cero. [3], [18]
- **Esfuerzo repetido:** Es cuando la onda sinusoidal del esfuerzo que varia con el tiempo va desde 0 hasta un máximo con un valor medio igual al componente alterno. [3], [18]
- **Esfuerzo fluctuante:** Es un esfuerzo fluctuante cuando todos los componentes de la onda sinusoidal son distintos de cero. [3], [18]

Figura 2: gráficas de esfuerzos totalmente alternantes, repetidos y fluctuantes.



Tomada de: NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000. pág. 347

2.1.8 Frecuencia natural de vibración

Es la frecuencia a la cual vibra un sistema mecánico libremente cuando se le separa de su posición de equilibrio y se deja vibrar sin excitación externa. Para sistemas con amortiguamiento la vibración libre es un movimiento no armónico, disminuyendo su amplitud con el tiempo y una frecuencia ligeramente inferior a la frecuencia natural. [4], [13], [20]

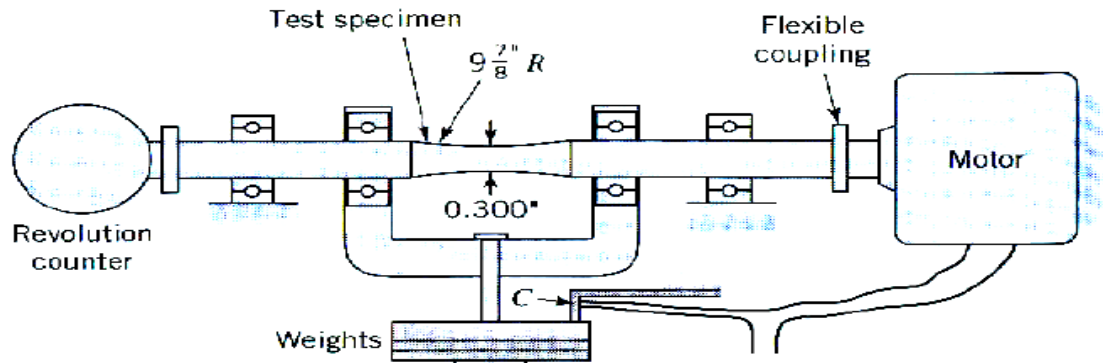
2.2 RESISTENCIA ESTÁNDAR A LA FATIGA POR ROTACIÓN Y FLEXIÓN.

Los ensayos de fatiga estándares sometidos a flexión se realizan manteniendo la probeta girando mientras se aplica una carga en los extremos lo cual causa una deflexión en el centro de la probeta. Así funciona la máquina estándar de R.R. Moore que se puede observar en la figura 3, la cual tiene una carga aplicada en los extremos de la probeta y sobre ella actúe una fuerza de flexión pura para que el centro de la probeta pase por un ciclo de tensión- compresión- tensión con cada rotación de la flecha.

El nivel más alto del esfuerzo esta en el centro donde el diámetro de la probeta normalizada estándar es de 0.300 pulgadas. El gran radio de curvatura evita la concentración de esfuerzos en lugares diferentes al centro de la probeta, y se escogen y determinan diversos pesos para dar los niveles de esfuerzo deseado.

La velocidad del motor es de aproximadamente 1750 rpm. Cuando falla la probeta el peso cae desconectando los puntos de contacto para detener el motor, y el número de ciclos hasta el momento de la falla lo indica un contador de revoluciones. [3]

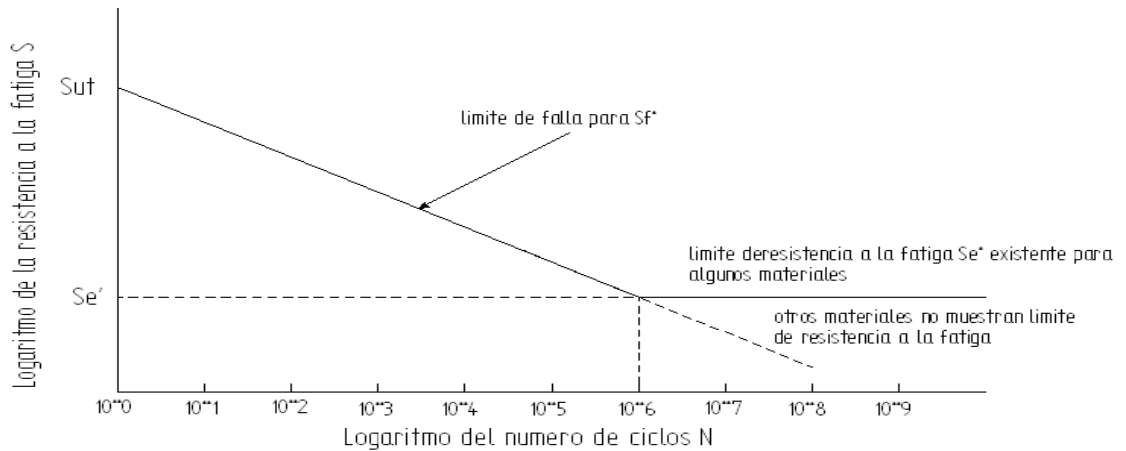
Figura 3: Maquina de R.R. Moore para pruebas de fatiga rotatoria – flexión



Tomada de: NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000.

Para realizar pruebas de fatiga por este método se deben utilizar especímenes muy similares y tan idénticos como sea posible para obtener un error muy pequeño en cada repetición de la prueba. La gráfica teórica de fatiga se calcula sabiendo el valor del esfuerzo último a tensión y el límite de resistencia a la fatiga para una cantidad determinada de ciclos como se puede observar en la figura 4. Numerosas pruebas han establecido que materiales ferrosos tienen un límite de resistencia a la fatiga definido como el nivel más alto de esfuerzos alternantes que pueden soportarse indefinidamente sin falla. [3]

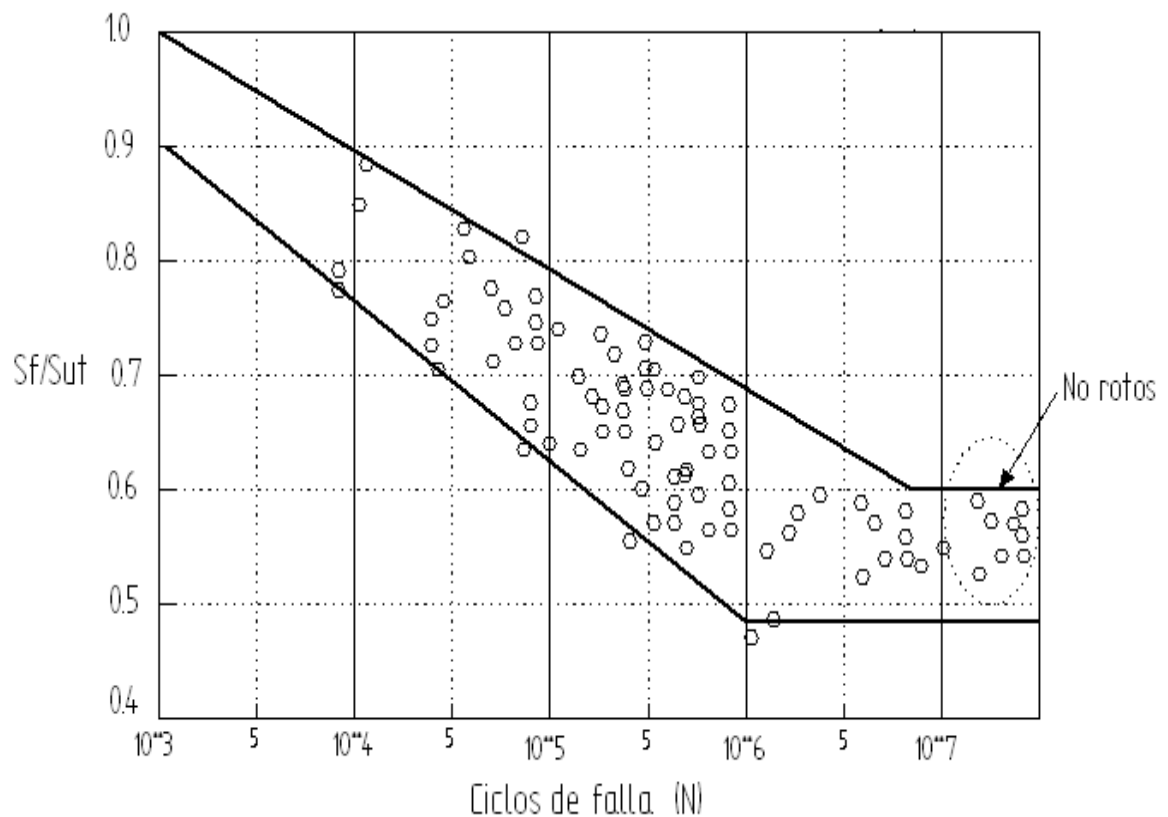
Figura 4: Diagrama S-N o de vida –resistencia de wohler.



Tomado de: NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000. Pág.348.

Es costumbre hacer la suposición moderada de que los materiales ferrosos no deben someterse a esfuerzos arriba del límite de resistencia a la fatiga si se quiere una vida de 10^6 o más ciclos. Debido a que las fallas por fatiga se originan en puntos locales de relativa debilidad los resultados de pruebas de fatiga tienen mayor dispersión que los de las pruebas estáticas como se observa en la figura 5 por tal motivo el enfoque estadístico para definir la resistencia tiene mucha importancia. [3]

Figura 5: Gráfica de fatiga con información sobrepuesta con los puntos de fractura de diferentes probetas.

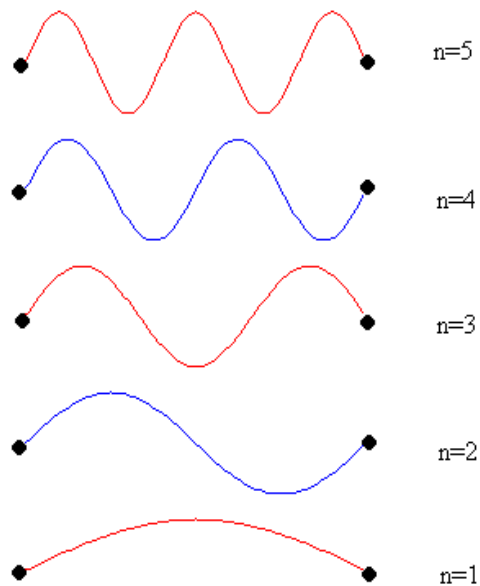


Tomado de: NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000. pág. 360

2.3 MODOS DE VIBRACIÓN

Un modo de vibración es un patrón o forma característica en el que vibrará un sistema mecánico, como se puede observar en la Figura 6. La mayoría de los sistemas tienen infinitos modos de vibración y es la tarea del análisis modal determinar la forma de esos modos. La vibración de una estructura es siempre la combinación de todos los modos de vibración. Pero no todos están excitados al mismo grado. [4], [13], [20]

Figura 6: representación de modos de vibración en una cuerda



Tomada de: BALACHANDRAN Balakumar y MAGRAB Edward B. Vibraciones. Thomson Learning. Australia año 2006.

Una vez que encontramos la frecuencia del primer modo de vibración, se pueden buscar rápidamente los restantes: la frecuencia del segundo modo es el doble que la del modo fundamental, la frecuencia del tercer modo es triple, y así sucesivamente como se observa a continuación. [4]

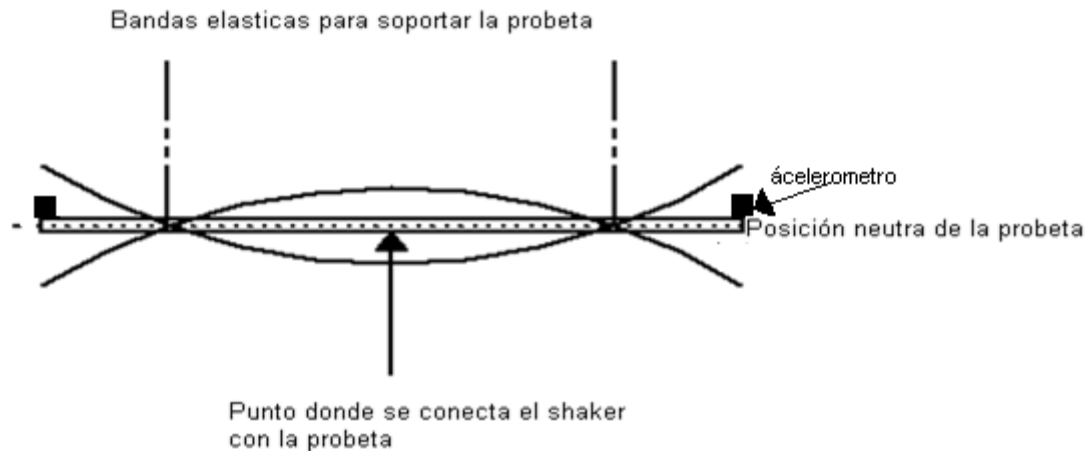
f_1 = modo fundamental

$f_n = nf_1$ armónicos $n=2, 3, 4, \dots$

2.4 MOMENTO INTERNO DE FLEXIÓN

El momento interno de flexión es una incógnita muy importante ya que es una variable de la cual depende el valor de esfuerzo que soporta la probeta. Para este caso no se puede hallar de manera estática por que la probeta se encuentra en movimiento. En la figura 7 se observa la manera como la probeta de acero 1020 se deforma debido a que se encuentra oscilando a la frecuencia natural de vibración junto con la fuerza aplicada por el shaker (ver ítem 3.2.3.1) causando un momento interno. [3], [18]

Figura 7: Deformación de la probeta en el primer modo de vibración.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Para calcular el momento interno en la probeta es necesario recurrir a la ecuación 3 que se llama ecuación de ondas de pando (bending waves). La única variable conocida es la aceleración que se toma del acelerómetro que se instalaría en la probeta.

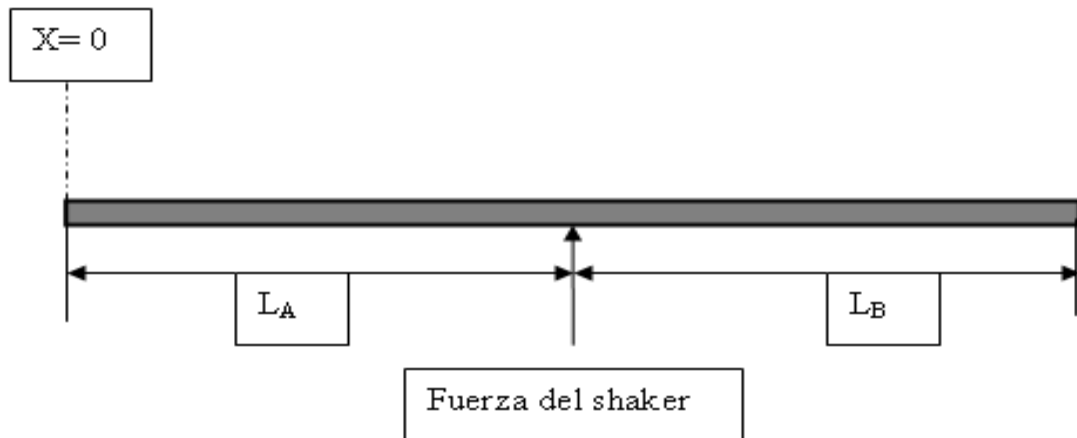
Con las ecuaciones de ondas de pandeo se puede obtener el desplazamiento o deformación en la mitad de la probeta en función del tiempo y la posición siempre y cuando se pueda medir la aceleración en el extremo.

La ecuación de deformación en función del tiempo y la posición es la siguiente: [5], [13]

$$\eta_{(x,t)} = \left(\hat{\eta}_+ * e^{-jkx} + \hat{\eta}_- * e^{jkx} + \eta_{j+} * e^{-kx} + \eta_{-j} * e^{+kx} \right) * e^{j\omega t} \quad \text{Ecuación 3 [5]}$$

En la figura 8 se puede observar la posición inicial o punto neutro de la longitud de la probeta para hallar las condiciones de frontera.

Figura 8: Diagrama de la probeta donde se denota la posición X=0



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

$\eta_{(x,t)}$: Es la deformación máxima en el centro de la probeta $X= L_A$

$\hat{\eta}_+$: Es la deformación que produce la onda hacia la derecha o también la máxima de formación en el extremo derecho.

$\hat{\eta}_{-}$: Es la deformación que produce la onda hacia la izquierda o también la máxima deformación en el extremo izquierdo.

η_{j+} Y η_{-j} : son los campos cercanos al punto de excitación que no son de interés para el propósito de este trabajo por consiguiente estos valores se pueden despreciar. Para estudios de sonido son muy importantes ya que son la deformación imaginaria de la onda.

K: Modulo de rigidez
$$K = \sqrt[4]{\frac{\omega^2 * \rho * S * L}{B}}$$

X: Es la posición en cualquier punto de la probeta.

J: Es la componente imaginaria del numero complejo.

t: Tiempo

ω : Frecuencia natural del sistema

ρ : Densidad de la probeta

S: Área de la sección transversal
$$S = \frac{\pi * D^2}{4}$$

D: Diámetro de la probeta

B: modulo de elasticidad * Inercia de la varilla

I: Inercia de la varilla
$$I = \frac{\pi * D^4}{64}$$

Cuando se obtiene la deformación en el centro de la probeta es posible hallar el momento interno que está soportando la probeta con la ecuación 4 que se encuentra en función del tiempo y la posición : [5]

$$M_{(x,t)} = \left[\left(\left(\hat{\eta}_{+} * e^{-jkx} + \hat{\eta}_{-} * e^{jkx} + \eta_{j+} * e^{-kx} + \eta_{-j} * e^{+kx} \right) * e^{j\omega t} \right) * BK^2 \right] \text{Ecuación 4}$$

Para que el momento se pueda aplicar a esta metodología tiene que cumplir las siguientes condiciones de frontera: [5]

1. Que la deformación en los dos extremos sean iguales

$$\eta_{A(X=0)} = \eta_{B(X=L_B)}$$

2. Momento en los extremos sea igual a cero

$$M_{A(X=0)} = M_{B(X=L_B)} = 0$$

3. El momento de A en el centro de probeta sea igual al momento de B en el centro de la probeta.

$$M_{A(X=L_A)} = M_{B(X=0)}$$

4. La fuerza que se aplica en A mas la fuerza que se aplica en B es igual a la fuerza que aplica el shaker.

$$F_{A(X=L_A)} + F_{B(X=0)} = F_{shaker}$$

5. La deformación en el centro de la probeta tiene que ser igual para A y B

$$\eta_{A(X=L_A)} = \eta_{B(X=0)}$$

6. Las fuerzas en los extremos de la probeta tienen que ser iguales a cero

$$F_{A(X=0)} = F_{B(X=L_B)} = 0$$

Si se cumplen estas condiciones se puede utilizar el momento interno para hallar el esfuerzo que se encuentra soportando la probeta utilizando la ecuación 1.

2.5 ESTIMACIÓN DE LA MUESTRA O INTERVALO DE CONFIANZA.

El intervalo de confianza tiene dos características básicas que determinan su calidad: su nivel de confianza y su ancho. Es preferible que el intervalo tenga un alto nivel de confianza y que sea exacto y estrecho a la vez. Mientras más alto sea el nivel de confianza, más probable es que el intervalo contenga al parámetro y mientras más estrecho sea el intervalo, más exacta es la estimación. [6], [16], [19]

Es lógico afirmar que a mayor número de muestras se va a obtener un menor error por lo cual es indispensable conocer el margen de error para saber con veracidad el número total de muestras que conlleven a un intervalo de confianza. Hay que saber que el margen de error lo da la persona que está realizando la prueba ya que él sabe o estima con aproximación el error posible causado por instrumentos de medición, montaje, cálculos matemáticos y otros. [6]

Los límites de confianza para la media poblacional están dados por: $\mu = \bar{X} \pm Z\sigma_x$

μ = media de la población

\bar{X} = media aritmética

Z = coeficiente de confianza

σ_x = desviación estándar de la población

El tamaño de la muestra y el margen de error se pueden calcular con la ecuación 5. [6]:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

n = numero de muestras

e = margen de error

σ^2 = desviación estándar de la población

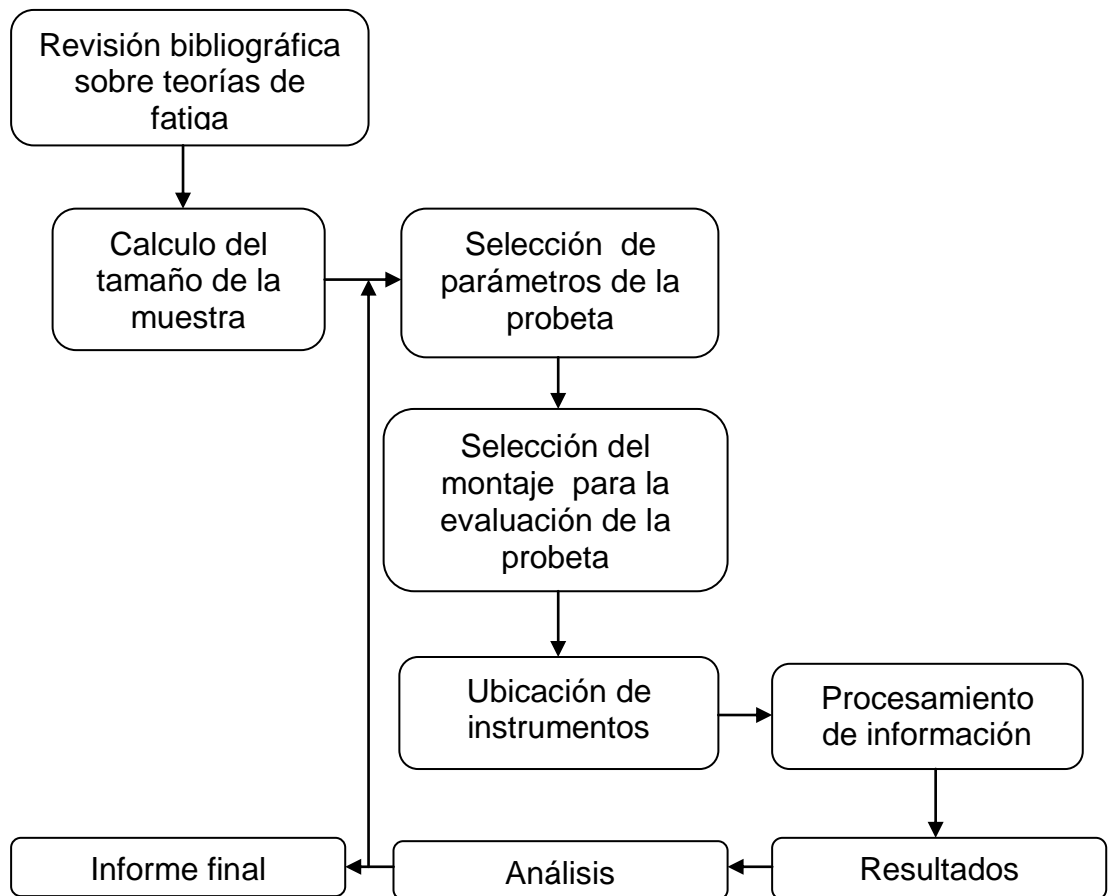
- a) **Error máximo e:** Es estimado por el investigador
- b) **Coeficiente de confianza Z:** Determinado por el nivel de confianza.
- c) **Desviación estándar:** Es una constante generalmente desconocida y se puede hallar un valor aproximado por medio de un muestreo.
- d) **Tamaño de la población n:** es el tamaño que rige el número de muestras que se deben tener en cuenta en el experimento. [6]

3. METODOLOGIA

3.1 METODOLOGÍA GENERAL

La forma en la cual se llevo a cabo el desarrollo del proyecto y los procedimientos que se deben aplicar para le realización de una metodología basada en resonancia para ensayos de fatiga a flexión en materiales metálicos, se presenta en la figura 9.

Figura 9: Metodología General



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

El desarrollo de esta metodología se explicara a continuación para cada uno de los ítems que se presentaron en el esquema anterior. Las características para la selección de las probetas de acero comercial de bajo carbono.

- Después de haber realizado un estudio estadístico para el diseño de experimentos se obtuvo el número de pruebas que se deben realizar para obtener resultados con un porcentaje de error admisible en los ensayos que para el caso que se estudio son de tipo destructivo.
- Realización del montaje adecuado para la elaboración de las pruebas teniendo en cuenta un montaje sencillo y eficiente.
- se ubican los sensores en la parte de interés de la probeta para obtener la información correspondiente.
- Se realiza el montaje de la probeta con los sensores y se ubica el shaker en la parte inferior de tal forma que se pueda someter a vibración en la mitad de las varillas de acero.
- Obtener un procesamiento de las señales enviadas por los sensores.
- Analizar los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, para conocer el número de ciclos y hacer una correlación en las pruebas.

3.2 DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

Para la realización de las pruebas de fatiga sometida a flexión se devén tener en cuenta factores como material y geometría de la probeta, tipo de apoyos, ubicación sensores de aceleración y fuerza y la frecuencia natural del sistema.

3.2.1 Revisión bibliográfica sobre teorías de fatiga

Se hizo una recopilación de información sobre las teorías de fatiga y se presentaron en el marco teórico de este trabajo dejando en claro las características de daños causados por cargas cíclicas en materiales metálicos con las gráficas que representa la vida de un material.

3.2.2 Selección de los parámetros de la probeta

Existe gran variedad de aceros a los que fácilmente se pueden acceder en el mercado, se clasifican debido a las propiedades características como resistencia, dureza, alargamiento etc. La geometría para el caso de estudio es como generalmente sale de producción

3.2.2.1 Material de las probetas

Se usó un acero AISI 1020 para la selección de las probetas, basados en las propiedades que tienen los aceros de bajo carbono, son comerciales y tienen bajo costo. En las tablas 1 y 2 se puede apreciar la composición química, las propiedades físicas y mecánicas del acero AISI 1020. Este material se utiliza principalmente en maquinaria y partes de vehículos que no estén sometidos a grandes esfuerzos mecánicos.

✓ Composición química AISI 1020

Tabla 1: Propiedades químicas del acero AISI 1020.

Component Elements Properties	Metric	English	Comments
Carbon, C	0.17 - 0.230 %	0.17 - 0.230 %	
Iron, Fe	99.08 - 99.53 %	99.08 - 99.53 %	
Manganese, Mn	0.30 - 0.60 %	0.30 - 0.60 %	
Phosphorous, P	<= 0.040 %	<= 0.040 %	
Sulfur, S	<= 0.050 %	<= 0.050 %	

Tomada de: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab-16b1b69f1cffbb> [9]

✓ Propiedades mecánicas AISI 1020

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero AISI 1020.

Physical Properties	Metric	English	Comments
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in ³	
Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Brinell	121	121	
Hardness, Knoop	140	140	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Rockwell B	68	68	Converted from Brinell hardness.
Hardness, Vickers	126	126	Converted from Brinell hardness.
Tensile Strength, Ultimate	420 MPa	60900 psi	
Tensile Strength, Yield	350 MPa	50800 psi	
Elongation at Break	15.0 %	15.0 %	In 50 mm
Reduction of Area	40.0 %	40.0 %	
Modulus of Elasticity	205 GPa	29700 ksi	Typical for steel
Bulk Modulus	140 GPa	20300 ksi	Typical for steel
Poissons Ratio	0.290	0.290	
Machinability	65 %	65 %	Based on AISI 1212 steel. as 100% machinability
Shear Modulus	80.0 GPa	11600 ksi	Typical for steel

Tomada de: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab-16b1b69f1cffbb> [9]

3.2.3 Dimensiones de las probetas

3.2.3.1 Longitud y diámetro

Para la selección de la longitud adecuada de la probeta se realizaron varias pruebas experimentales, en las que se tomaron probetas de diferentes dimensiones. Con la ayuda del software Labview y Ansys se analizó cuál era la probeta que presentaba una baja frecuencia natural de vibración de tal forma que se pueda aprovechar la fuerza aplicada por el shaker y ayudar a maximizar los esfuerzos (tensión- compresión) en las fibras más lejanas de la probetas. Para la clasificación de la geometría adecuada se seleccionaron diferentes varillas como se puede ver en la figura 10. Cada una de estas varillas presenta diferente diámetro y longitud.

Figura 10: Probetas con las cuales se realizaron las pruebas.

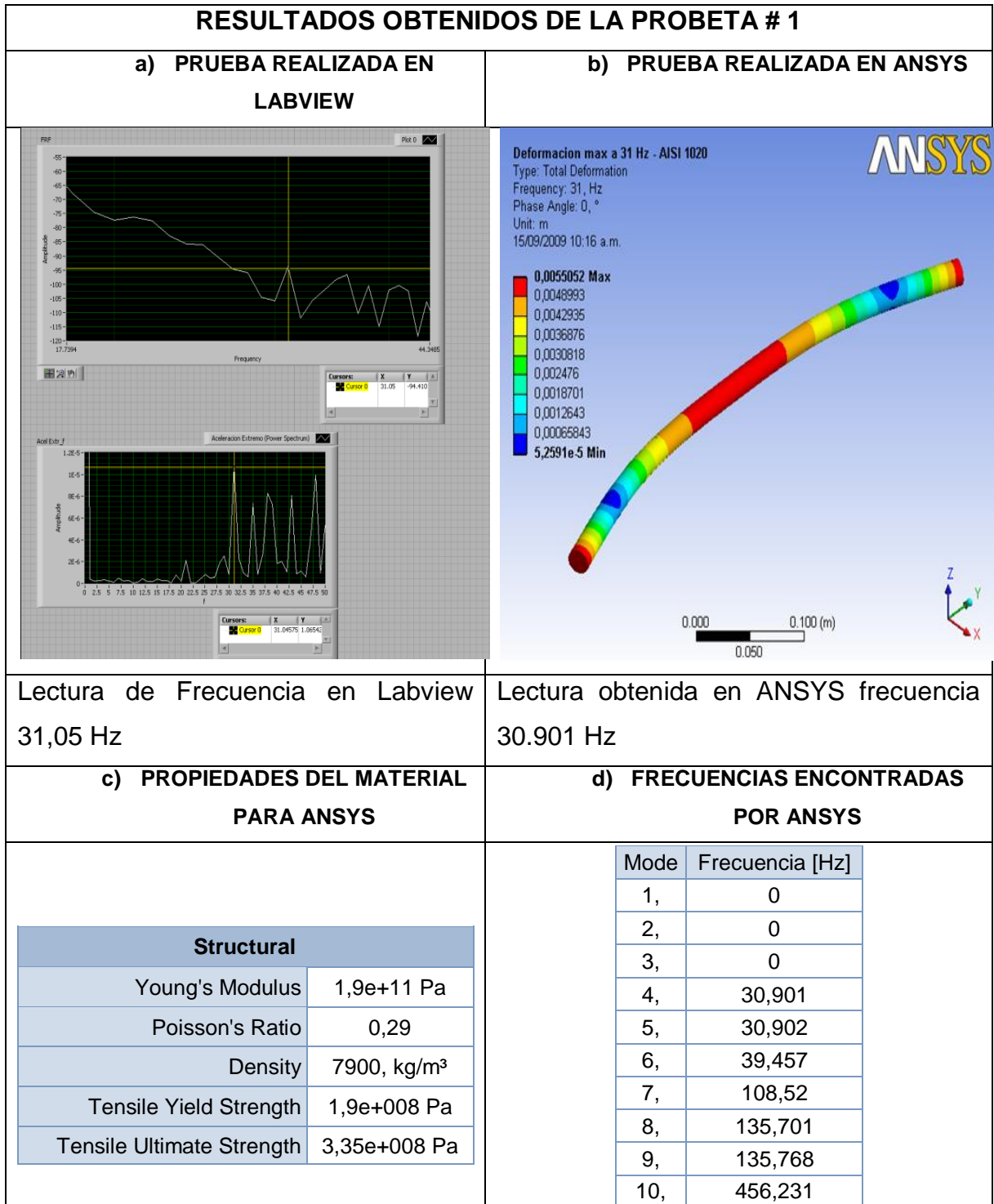


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

✓ **probeta # 1 (longitud 50 cm - diámetro $\frac{3}{4}$ de pulgada)**: la probeta numero 1, presento características que no fueron favorables para el ensayo debido a la rigidez que se tiene con estas dimensiones. Se sometió dicha probeta a resonancia y la frecuencia que se obtuvo fue de 31.05 Hz, Este resultado hizo que la probeta no tuviera una buena deformación por esta razón se descarta la posibilidad de realizar pruebas con esta geometría.

La figura 11 presenta la información resumida de los valores que se obtuvieron por dos métodos diferentes se puede ver que los resultados obtenidos de forma analítica son aproximados a las lecturas realizadas con sensores.

Figura 11: Resultados obtenidos de la probeta # 1.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Información obtenida en Labview 8.5

Los resultados obtenidos son se presentaron en la figura 11 a .se muestra la primera frecuencia natural de vibración por medio de la programación realizada en Labview 8.5. El valor de dicha frecuencia es 31.05 Hz

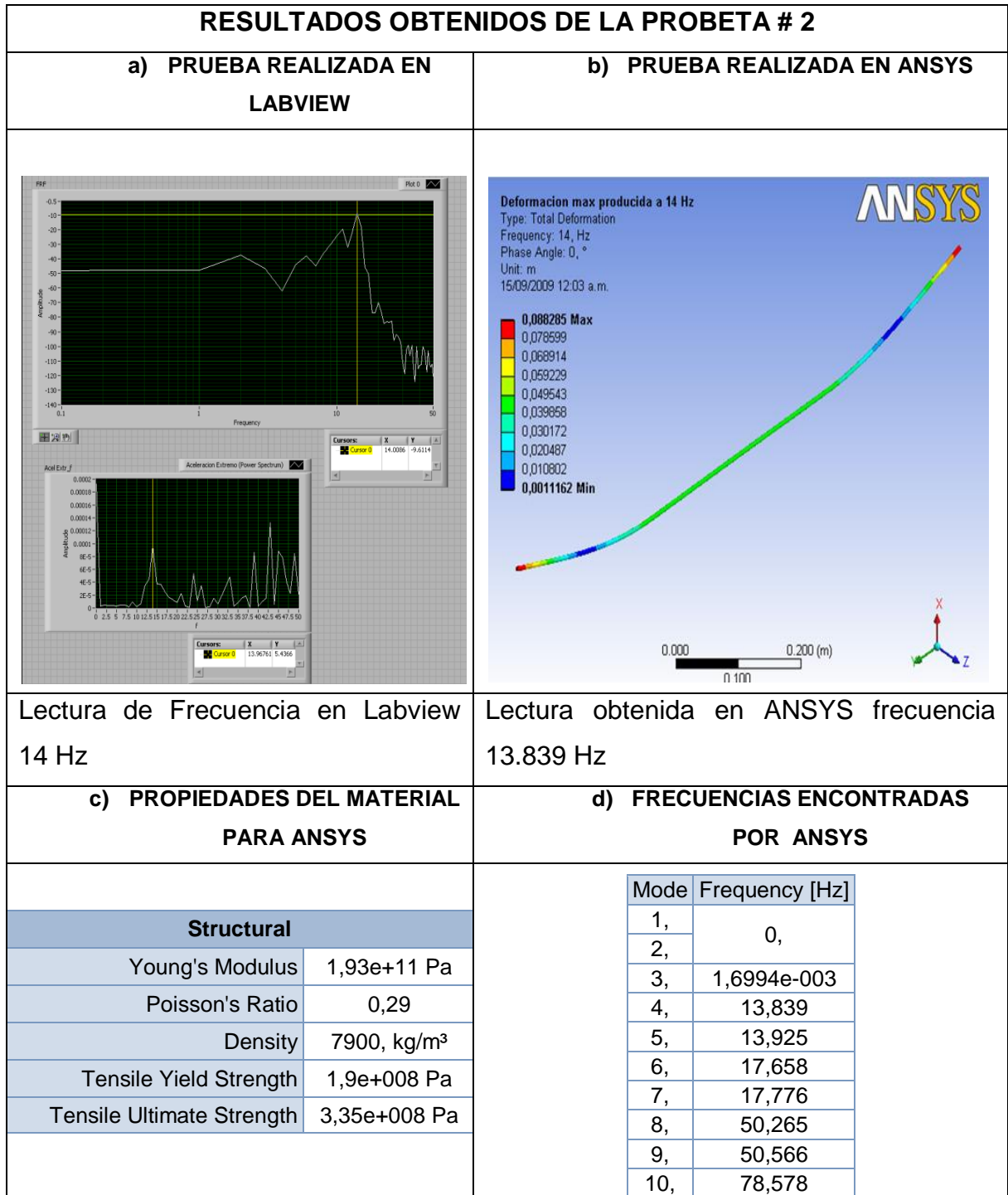
Información obtenida en Ansys 11.

En la figura 11b se presentan las propiedades del material con que se trabajo, considerando algunas variaciones en el modulo de elasticidad debido al proceso de fabricación de la probeta. Para las frecuencias naturales de vibración obtenidas por el método analítico se obtienen valores similares a los que se lograron de forma experimental, gracias al análisis modal se puede conseguir el valor de las frecuencias a las cuales cambia la formas modal de la probeta.

La deformación producida por la frecuencia de 31 Hz presenta un valor de 5,5 mm, por consiguiente se descarto de inmediato la posibilidad de realizar ensayos con esta tipo de probetas, los valores obtenidos en la deformación son prácticamente nulos y teniendo en cuenta que el esfuerzo es función de la deformación para cargas dinámicas el valor del esfuerzo tiende a cero, figura 11b.

- ✓ **Probeta # 2 (longitud 100 cm – diámetro ¼ de pulgada):** se realizaron 5 pruebas con probetas número 2, en este tipo de probetas se busco la frecuencia a la cual entra en resonancia de forma experimental y el resultado que se obtuvo fue de 14 HZ. Ver Figura 12.

Figura 12: Resultados obtenidos de la probeta # 2



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Información obtenida en Labview 8.5

Los resultados obtenidos se muestran en la figura 12a. la primera frecuencia natural de vibración por medio de la programación realizada en Labview 8.5. Presento un valor de frecuencia de 14 Hz

Información obtenida en Ansys 11

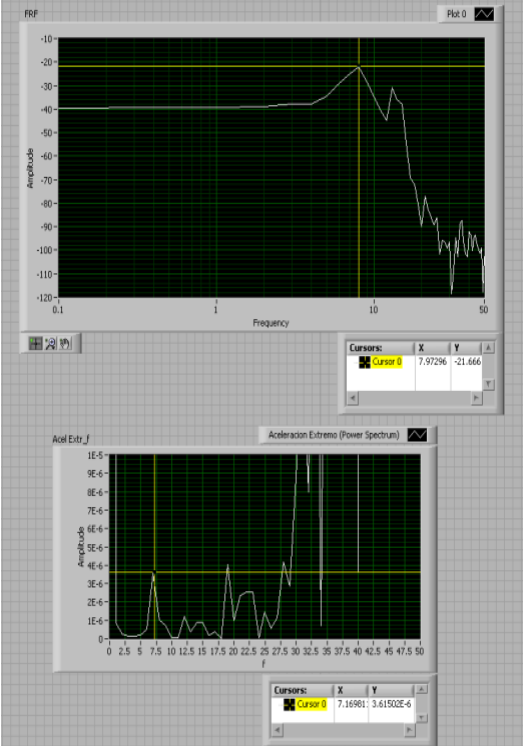
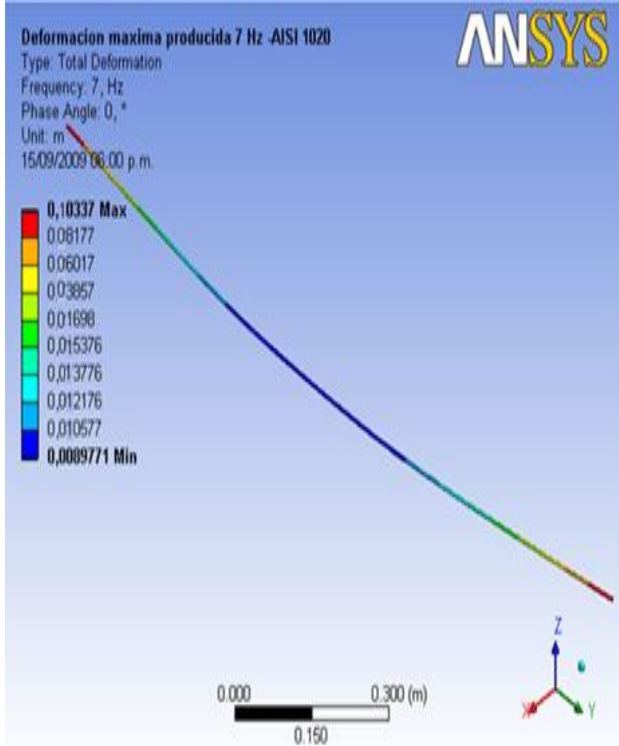
Al realizar el análisis modal para la probeta #2 se usaron las siguientes propiedades del acero AISI 1020 ver grafica 12c. Aunque el método analítico presentó valores similares a los que se obtuvieron de forma experimental Ver Grafica 12d; en la grafica se muestran los resultados obtenidos por medio del análisis modal realizado en Ansys.

La deformación que presentó la probeta # 2 al ser expuesta a dicha frecuencia cambio notablemente en comparación con la probeta anterior, se pudo observar que el sensor de fuerza presentó un incremento en los valores de la magnitud en fuerza debido a la reducción del diámetro y al incremento de la longitud, de este modo se logró una mayor deformación en los extremos de la varilla. Los resultados parecerían prometedores pero después de 7 horas continuas de funcionamiento las probetas no presentaron características de falla por fatiga. Por tal razón se descarto la posibilidad de realizar pruebas con probetas de estas dimensiones, ver figura 12b.

Teniendo en cuenta la deformación presentada por el método analítico, se vio la posibilidad de continuar usando el mismo diámetro pero variando la longitud de la probeta, de tal forma que se pudiera obtener una mayor deformación en los extremos, disminución de la frecuencia y así aplicar mayor fuerza con el shaker ya que esta es inversamente proporcional a la frecuencia.

✓ **Probeta # 3 (longitud 150 cm - diámetro ¼ de pulgada):** Con las dimensiones de la probeta 3; se presentó una reacción favorable cuando se sometió a la frecuencia de resonancia, la deformación que se producía en los extremos de la varilla, presentaba valores de esfuerzo considerable con los que se vio la posibilidad de realizar pruebas para analizar el comportamiento de la probeta con esa geometría. La Primera frecuencia natural de vibración es de 7 Hz; fue hallado de forma experimental como se puede ver en la Figura 13.

Figura 13: Resultados obtenidos de la probeta # 3

RESULTADOS OBTENIDOS DE LA PROBETA # 3	
a) PRUEBA REALIZADA EN LABVIEW	b) PRUEBA REALIZADA EN ANSYS
 <p>The LabVIEW interface displays two plots. The top plot, titled 'FRF', shows Amplitude on the y-axis (ranging from -120 to -10) versus Frequency on the x-axis (logarithmic scale from 0.1 to 50). A peak is visible at approximately 7 Hz. The bottom plot, titled 'Acel Extr. F', shows Acceleration Extrema (Power Spectrum) on the y-axis (ranging from 0 to 1E-5) versus Frequency (F) on the x-axis (ranging from 0 to 50). A sharp peak is also visible at approximately 7 Hz. Both plots include a cursor indicating the peak frequency.</p>	 <p>The ANSYS simulation result shows a color-coded deformation plot of a rod. The text indicates: 'Deformacion maxima producida 7 Hz -AISI 1020', 'Type: Total Deformation', 'Frequency: 7, Hz', 'Phase Angle: 0, °', 'Unit: m', and '15/09/2009 06:00 p.m.'. A color scale on the left ranges from 0.0009771 Min (blue) to 0.10337 Max (red). A scale bar at the bottom indicates 0.000 to 0.300 (m) with a 0.150 (m) marker. A 3D coordinate system (X, Y, Z) is shown in the bottom right corner.</p>
Lectura de Frecuencia en Labview 7 Hz	Lectura obtenida en ANSYS frecuencia 7.55 Hz

c) PROPIEDADES DEL MATERIAL PARA ANSYS		d) FRECUENCIAS ENCONTRADAS POR ANSYS													
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Structural</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Young's Modulus</td> <td>1,93e+11 Pa</td> </tr> <tr> <td>Poisson's Ratio</td> <td>0,29</td> </tr> <tr> <td>Density</td> <td>7900, kg/m³</td> </tr> <tr> <td>Tensile Yield Strength</td> <td>1,9e+008 Pa</td> </tr> <tr> <td>Tensile Ultimate Strength</td> <td>3,35e+008 Pa</td> </tr> </tbody> </table>		Structural		Young's Modulus	1,93e+11 Pa	Poisson's Ratio	0,29	Density	7900, kg/m ³	Tensile Yield Strength	1,9e+008 Pa	Tensile Ultimate Strength	3,35e+008 Pa	Mode	Frecuencia [Hz]
		Structural													
		Young's Modulus	1,93e+11 Pa												
		Poisson's Ratio	0,29												
		Density	7900, kg/m ³												
		Tensile Yield Strength	1,9e+008 Pa												
		Tensile Ultimate Strength	3,35e+008 Pa												
		1,	0,												
		2,													
		3,	8,435e-003												
4,	7,5555														
5,	7,5583														
6,	31,818														
7,	31,825														
8,	40,272														
9,	40,286														
10,	74,458														

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Información obtenida con Labview 8.5

La probeta # 3 cumple con la propuesta que se había hecho de cambiar la geometría hasta lograr una baja frecuencia natural de vibración, para este caso en la grafica 13 a muestra que la frecuencia cambio de 14 Hz a 7 Hz es el que se necesitaba.

Información obtenida en Ansys 11

En forma analítica se presentan las diferentes frecuencias naturales de vibración obtenidas en Ansys, la información se muestra en la grafica 13 d; como se hizo con las probetas anteriores y la información de la deformación en los extremos de la varilla se puede ver en la figura 13 b.

La información presentada en la tabla 3; es una recopilación para la selección de la probeta adecuada para el desarrollo de una metodología basada en resonancia para ensayos de fatiga a flexión en probetas metálicas.

Tabla 3: Frecuencias Naturales encontradas en Labview comparadas con las frecuencias naturales encontradas en Ansys

Tipo de probeta	Diámetro [in]	Longitud [m]	Frecuencia encontradas con Labview [Hz]	Frecuencia encontradas con Ansys [Hz]	Porcentaje de error entre los dos métodos
Probeta # 1	$\frac{3}{4}$	0.5	31.05	30.905	% 0,46
Probeta #2	$\frac{1}{4}$	1	14	13.839	% 0.0115
Probeta # 3	$\frac{1}{4}$	1.5	7.92	7.55	% 4.67

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Se observa en la tabla 3 los valores de las frecuencias halladas de forma experimental y analítica, de tal forma que para la selección de la probeta adecuada se optó por la probeta # 3 debido a su baja frecuencia natural de vibración ya que es una ventaja con respecto a las otras por la deformación que presentó.

3.2.4 Selección del montaje para la evaluación de la probeta

Para la selección del montaje adecuado se usaron diferentes herramientas, instrumentos de medición y equipos que fueron facilitados por el laboratorio de física del departamento de ciencias básicas y el laboratorio de vibraciones de la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

3.2.4.1 Equipos e instrumentos usados para el montaje

Los equipos y herramientas que se usaron se presentan a continuación:

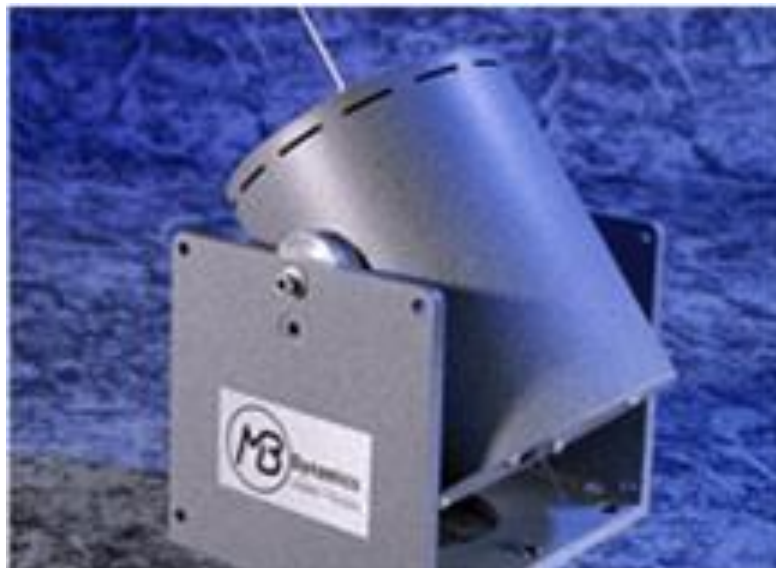
- ✓ Shaker
- ✓ Tarjetas de adquisición de datos de National Instruments
- ✓ Acelerómetros

- ✓ Sensor de fuerza
- ✓ Soportes
- ✓ Software (Ansys 11, Labview 8.5)

❖ **Shaker:** Es un agitador con un imán electrodinámico dentro de carcasa, su finalidad es aplicar fuerzas cíclicas por medio de un vástago de material cuerda de piano que soporta carga axial, la intensidad de la fuerza depende de la frecuencia a la cual se trabaje el dispositivo, es decir funciona como un parlante con la diferencia que no tiene la membrana que emite sonido si no que tiene un vástago para aplicar una fuerza puntual, ver figura 14.

Fue usado para producir vibración en las probetas que se analizaron a diferentes frecuencias. En la tabla 4 se puede observar las especificaciones correspondientes al shaker que se utilizó para las pruebas.

Figura14: foto del shaker con el cual se realizaron las pruebas.



Tomada de: <http://www.mbdynamics.com/Modal-Solutions.php>

Tabla 4. Especificaciones del MODAL 50 A EXCITER.

Fuerza de Salida: Ventilación por Convención Ventilación por Aire Forzado	Hasta 25 libras (pico) Hasta 50 libras (pico)
Golpe	1 pulgada de pico a pico 1,1 pulgadas entre paradas
Rigidez Axial del armazón	< 15 libras/pulg.
Peso del armazón	< 0,4 libras
Rango de Frecuencia del movimiento	Desde 0 Hz hasta 4000 Hz (DC)
Corriente de la bobina	8,5 Amp. Máx. (conexión con baja impedancia) 4,2 Amp. Máx. (conexión con alta impedancia)
Resistencia de la bobina en DC	1,3 Ohmios (conexión con baja impedancia) 5, 2 Ohmios (conexión con alta impedancia)
Puntas Adjuntas	Los tamaños cilíndricos son desde: 0,20 pulg. Hasta 0,127 pulg. Tamaños de los cables: 0-0,031 pulg. 0,031 pulg.- 0,062 pulg. 0,062 pulg. – 0,093 pulg. 0,093 pulg. – 0, 127 pulg.
Excitador Armónico	Su base es ajustable y las patas de la base son regulables. Montaje con múltiples tensores.
Dimensiones	11-1/2 pulg. Arriba. 7-1/2 pulg. X 9-1/4 pulg. Desde el piso.
Peso	55 libras
Kit de Accesorios	Dos masas de 30 libras de peso. Hardware, cables, acelerómetros.

Fuente: Catalogo MB DINAMICS 50 A EXCITER.

❖ **Chasis de NI CompactDAQ NicDAQ-9172:** Se usó un chasis de National instruments, ver figura 15; con la finalidad de controlar la señal dinámica de la tarjeta de adquisición de datos NI 9233 y el modulo de salida análoga DAQ NI 9263; por medio de la programación realizada en Labview 8.5. a continuación se presenta una breve descripción de esta herramienta.

Figura 15: foto del chasis NI CompactDAQ NicDAQ-9172 con el cual se realizaron las pruebas.

- Más de 5 MS/s por chasis en adquisición de alta velocidad
- Fuente de poder AC incluida, cable USB y juego para liberación de tensión
- Instalación y configuración plug-and-play verdadera
- Construcción robusta de metal A380
- Juegos de montaje disponibles para cubiertas, riel DIN y desarrollo de escritorio (como se muestra en la imagen)
- Conectividad por Hi-Speed USB a la PC



Tomada de National Instruments productos y servicios NI CompactDAQ:
<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/202544>

❖ **Tarjeta de adquisición de datos para sonido y vibraciones NI 9233:** La tarjeta de adquisición de señal dinámica es una herramienta clave para el estudio que se realizó, ver figura 16. Se usan básicamente para el estudio de sonido y vibraciones, la señal de respuesta de la tarjeta esta acondicionada para el uso de micrófonos, acelerómetros y ajusta el número de muestras en el procesamiento de señal.

Figura 16: foto de la tarjeta de adquisición NI 9233 con la cual se realizaron las pruebas.



Fuente: Manual de DAQ NI 9233.

❖ **Tarjeta de generación de datos de señal análoga NI 9263:** Para la comunicación entre el shaker y el computador se hizo un programa en Labview 8.5; teniendo control de la ganancia del shaker de tal forma que se pudiera graduar el desplazamiento máximo del vástago, por tal razón se usó una tarjeta de señal análoga, ver figura 17.

Figura 17: foto de la tarjeta de generacion de datos con la cual se realizaron las pruebas.



Fuente: Manual de DAQ NI 9263.

❖ **Sensor de aceleración “acelerómetro”:** Este instrumento de medición de alta sensibilidad se usó para hallar de una forma directa la aceleración en el extremo, la frecuencia que se uso para cada una de las probetas, la lectura que se obtuvo de aceleración se integro dos veces para obtener la deformación en el punto de interés de la probeta. Figura 18

Figura 18: foto sensor de aceleracion



Fuente: Manual PCB Piezotronics Model 352c34

❖ **Sensor de fuerza modelo 208C02:** El sensor de fuerza permite medir la magnitud de la fuerza que se aplica en un punto específico y depende de la frecuencia con la cual se use el shaker. Figura 19

Figura 19: foto sensor de fuerza



Fuente: Manual PCB Piezotronics Model 208c02

❖ **Labview 8,5 Sound and Vibration Toolkit:** para el estudio que se presentó fue necesario usar el kit de herramientas que trae el software Labview 8,5 para obtener información real conseguida de los sensores y para el procesamiento de la señal como espectros, frecuencias naturales de vibración, las graficas de deformación y aceleración en los extremos.

En el anexo 8.8 se presenta toda la programación que se hizo en Labview 8.5 para el control de comunicación al shaker, adquisición de datos de las tarjetas anteriormente mencionadas, gráficas de esfuerzo contra número de ciclos e información como tiempo de duración de la prueba dimensiones de las probetas, densidad del material, rigidez de la probeta módulo de elasticidad.

3.2.4.2 Tipos de apoyos usados para el montaje

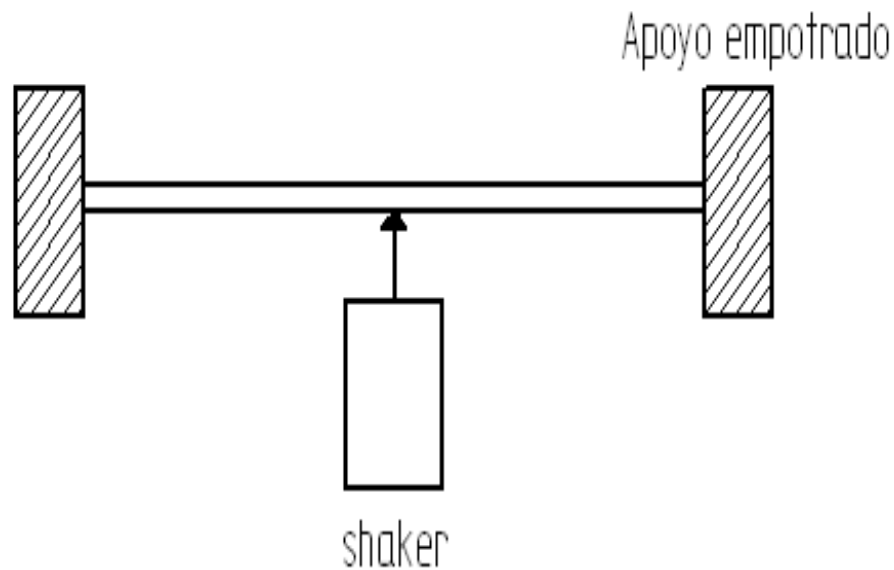
3.2.4.2.1 Empotrada en ambos extremos

Se realizó el montaje con la probeta #3 y se usó el tipo de apoyos empotrados en los extremos, Figura 20; debido a que la forma que produce una carga estática aplicada en la mitad de la probeta provoca deformaciones en el mismo punto, al usar cargas dinámicas el comportamiento de la probeta # 3 no produce el mismo efecto, usando la frecuencia de 7 Hz; la respuesta que se obtuvo no fue la esperada, al tener los apoyos empotrados en los extremos provocó una

propagación de onda e hizo que la carga que se pretendía aplicar produjera una carga con distribución longitudinal en la probeta .

Se descartó la posibilidad de realizar ensayos usando este tipo de apoyos porque no existió ninguna deformación en el centro de la probeta.

Figura 20: Probeta empotrada en ambos extremos

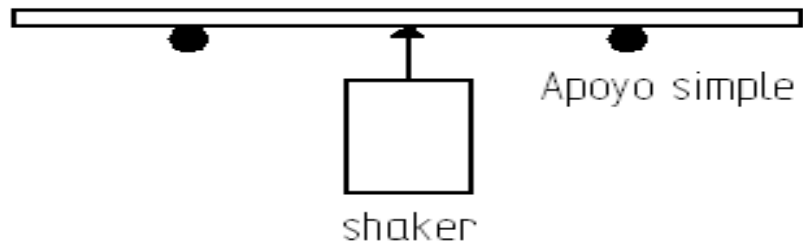


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.4.2.2 Simplemente apoyada

Haciendo la prueba simplemente apoyada se observó que se producían choques entre la probeta y las varillas que se usaron como apoyos, la forma como vibra la varilla influye mucho en el tipo de apoyo a la cual se sometían las probetas. Debido a la gran amplitud en los extremos de la probeta y el movimiento el movimiento en el centro de la varilla se pueden ocasionar problemas por el continuo golpeteo, ver Figura 21; Se tomó la decisión de no usar ese tipo de apoyo para no producir daños en los instrumentos aportados por la UPB en este proyecto de grado.

Figura 21: Probeta sostenida en un apoyo simple

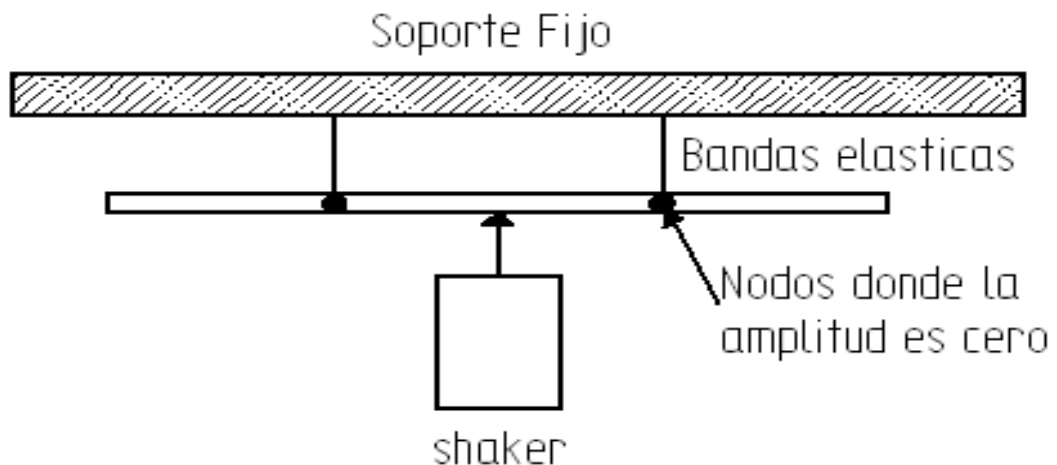


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.4.2.3 Apoyo libre

El apoyo libre se simula con unas bandas elásticas que proporcionan estabilidad al momento de iniciar la prueba, manteniendo la posición horizontal de la probeta. Las bandas son puestas sobre la probeta en las sección en la cual no se produce ninguna deformación en teoría, como se explicó anteriormente, en estos puntos las bandas después de iniciar la prueba mantienen en sus reacciones valores aproximados a cero o despreciables, haciendo que la probeta mantenga el movimiento libre producido por el shaker. Ver Figura 22

Figura 22: Probeta con apoyos libres



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.4.3 Ubicación de los equipos e instrumentación

3.2.4.3.1 Ubicación del shaker

El shaker es un equipo que se puede usar en diferentes posiciones la más usual es colocándolo sobre una superficie horizontal como se puede observar en la figura 23, aunque para algunas aplicaciones es necesario que este colgado de ganchos especiales. La posición que más conviene es la primera ya que esta forma es fácil y práctica para ubicar tanto los soportes como las probetas.

Figura 23: Posicion adecuada del shaker



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.4.3.2 Ubicación de los sensores PCB 352C34

Se usaron dos acelerómetros, fueron ubicados en cada uno de los extremos de las varillas las cuales fueron seleccionadas para realizar las pruebas, al obtener la información de aceleración en el extremo ver Figura 24; por ser el punto de interés, se conoce también del desplazamiento integrando la señal obtenida dos veces con los comandos que trae el Toolkit de sonido y vibraciones de National

Instruments. De esta manera se obtiene la magnitud del desplazamiento producido por la frecuencia a la cual se han sometido las probetas.

Figura 24: Posicion del acelerometro en el extremo de la probeta.

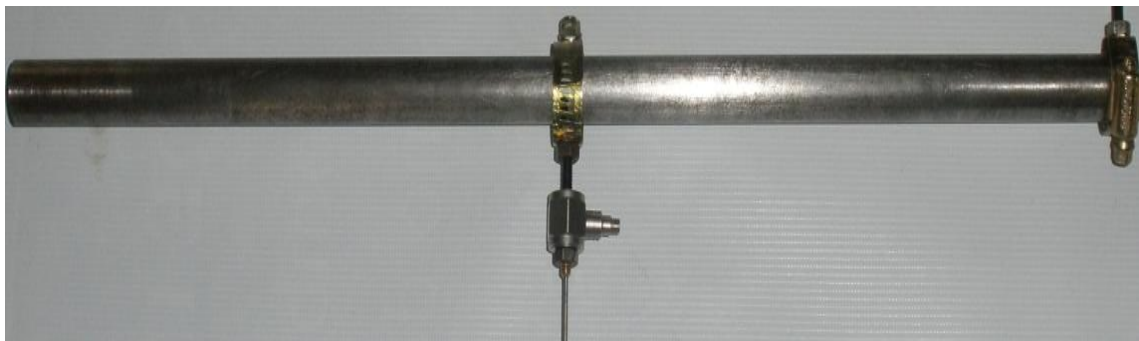


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.4.3.3 Ubicación del sensor de fuerza PCB 208C02

La ubicación más apropiada para el sensor de fuerza es el punto donde se conecta el shaker con la probeta porque de esta manera el sensor capta la señal de fuerza generada al sistema. Para las pruebas de fatiga a flexión el punto de conexión se encuentra en la mitad de la probeta para que se genere la máxima deformación en los extremos y oscile de la manera que se requiere para dicha prueba. En la figura 25 se puede observar el sensor de fuerza conectado a la probeta de acero.

Figura 25: Sensor de fuerza se ubica en la mitad de la probeta.

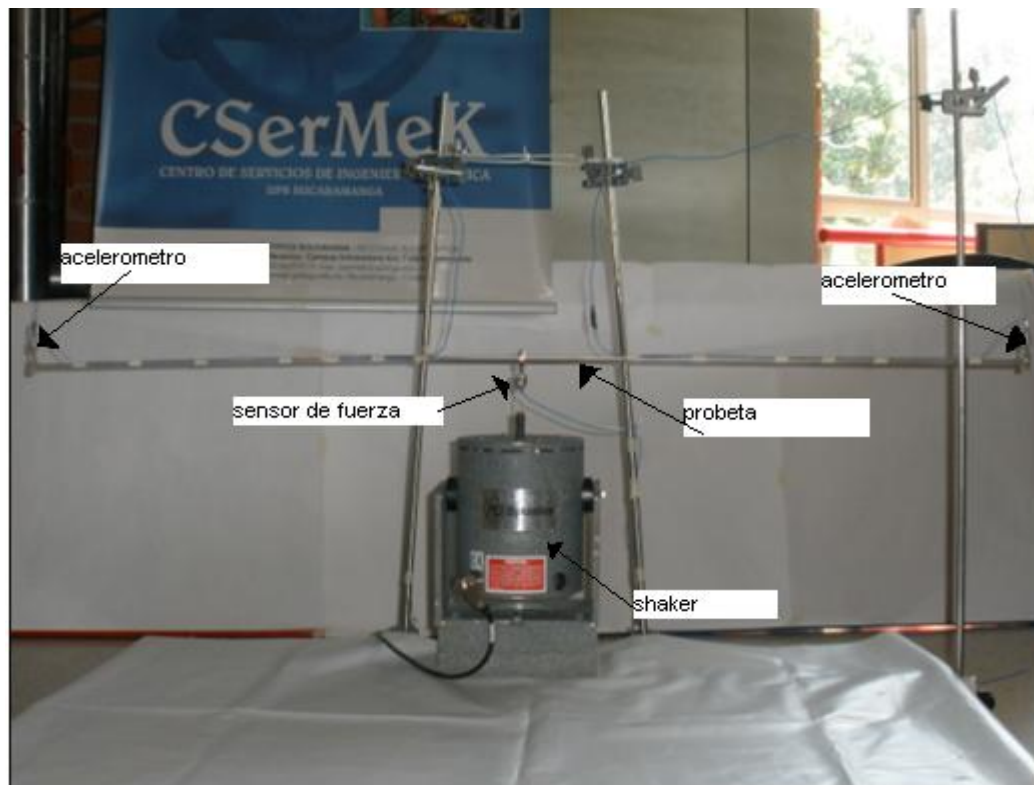


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.5 Montaje final para la realización de pruebas

Se presentaron una serie de opciones para la selección del apoyo que se usaría en el montaje más adecuado, se llegó a la conclusión que se obtenían buenos resultados usando apoyo libre, Figura 22; ya que el objetivo era someter a resonancia una varilla y este apoyo brindó la posibilidad de sostener la probeta sin ejercer ninguna fuerza mientras iniciaba la vibración, adicional a esto después de iniciada la prueba se cortaron las bandas y no se produjo ningún cambio en la forma adoptada por la varilla durante el transcurso de la prueba. Así concluimos que era la mejor decisión para el montaje, cabe resaltar que se usaron las bandas por prevención de daños en los equipo prestado por la Universidad Pontificia Bolivariana, en la figura 26 se puede observar el montaje final.

Figura 26: Montaje final para realización de pruebas de fatiga



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

3.2.6 Procesamiento de la información

La señal obtenida a través de los acelerómetros y del sensor de fuerza fue procesada por medio de una programación que se realizó en Labview 8.5 y de la cual se presenta en detalle en el Anexo 8. La realización de esta programación fue de vital importancia ya que por medio de esta se obtuvieron las graficas de esfuerzo vs número de ciclos, además fue útil para el cálculo del esfuerzo así como también la comunicación entre el shaker y el computador del mismo modo se guardo la información cada segundo para comprobar las graficas obtenidas por medio de Excel.

4. RESULTADOS Y ANALISIS

4.1 CALCULOS

4.1.1 Tamaño de muestra

Estimación de las muestras para la realización de las pruebas con un intervalo de confianza. [6]

- Realizando cinco pruebas de fatiga para pre calcular el esfuerzo promedio y la desviación estándar de un acero AISI 1020 de $\frac{1}{4}$ de pulgada de diámetro indicó que el esfuerzo promedio es de 104.1118 Mpa con una desviación estándar de 4.377. Para gran parte de la prueba el esfuerzo se mantiene constante tan solo presentando una gran variación en el momento de iniciación de la fractura. En la tabla 5 se puede observar los valores de esfuerzo de las cinco pruebas.
- Con los datos de esfuerzo promedio y desviación estándar de las cinco pruebas se procederá a calcular el margen de error permisible en los ensayos para después calcular y conocer el número total de pruebas que se deben realizar para garantizar que el experimento se encuentre en un rango de confianza y con el menor error posible.
- El coeficiente de confianza es del 95 % debido a las condiciones de los instrumentos con las que son realizadas las pruebas. [6]
- La distribución normal Z es igual a 1.96 que es el valor característico para un coeficiente de confianza de 95%. [6]

n = número de muestras que se deben realizar para tener un intervalo de confianza se calcula con la ecuación 5. [6]

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2}$$

- ✓ e= Margen de error permisible
- ✓ Esfuerzo promedio = 104.1118 Mpa
- ✓ Desviación estándar = 4.377
- ✓ Coeficiente de confianza = 95%
- ✓ Z = distribución normal = 1.96

Cálculo del margen de error permisible

$$e = \frac{Z * \sigma}{\sqrt{n}}$$

Como se realizaron 5 pruebas para determinar el esfuerzo promedio y la desviación estándar aproximada entonces n=5

$$e = \frac{1.96 * 4.377}{\sqrt{5}} = 3.84$$

Hasta aquí se puede concluir que el esfuerzo aproximado es de 104.11 ± 3.84 Mpa

Teniendo en cuenta este resultado del margen de error de las cinco pruebas se puede tratar de disminuir aumentando el número de pruebas teniendo en cuenta que el investigador aproxima el error del experimento basándose en los equipos de medición, control, software, hardware y cálculos realizados. El margen de error que se escogió basado en las 5 pruebas y según las consideraciones anteriores es de 3 Mpa.

$$n = \frac{1.96^2 * 4.377^2}{3^2} = 8.17 \cong 8$$

Quiere decir que con un margen de error de 3 Mpa se requiere realizar 8 pruebas. Después de realizar las 8 pruebas se debe volver a recalcular la desviación

estándar y el esfuerzo promedio para hallar nuevamente el margen de error. Entre más pruebas se realicen el margen de error irá disminuyendo hasta llegar a un punto en el cual la variación es muy mínima como se observa en la tabla 5.

Tabla 5: valores de esfuerzo promedio y desviación estándar de 5 pruebas realizadas.

PRUEBAS REALIZADAS		
Prueba 1	esfuerzo promedio	103,618Mpa
	desviación estándar	3,343
Prueba 2	esfuerzo promedio	105,20Mpa
	desviación estándar	4,355
Prueba 3	esfuerzo promedio	102,44Mpa
	desviación estándar	3,887
Prueba 4	esfuerzo promedio	102,831Mpa
	desviación estándar	5,36
Prueba 5	esfuerzo promedio	106,47Mpa
	desviación estándar	4,94
TOTAL ESFUERZO PROMEDIO		104,1118Mpa
TOTAL DESVIACION ESTANDAR		4,377

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Un factor importante es el número de ciclos en cada prueba ya que de ese valor también depende el tiempo de fractura de la probeta y al igual que el esfuerzo hay que realizar un análisis estadístico de resultados para calcular el número de pruebas que se deben realizar para tener un valor confiable en el experimento. Se utiliza la misma metodología que el esfuerzo y después se concluirá cuántas pruebas se deben realizar. Ver las tablas 6 y 7.

Tabla 6: número de ciclos de la probeta antes de fracturarse en cinco pruebas para determinar el esfuerzo promedio y la desviación estándar.

Prueba	numero de ciclos
Prueba 1	99419
Prueba 2	103520
Prueba 3	86356
Prueba 4	125591
Prueba 5	84229
numero de ciclos promedio	99823
desviación estándar promedio	16600,8567

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Se realiza el cálculo del margen de error en el número de ciclos.

$$e = \frac{1.96 * 16600}{\sqrt{5}} = 14550.54 \text{ ciclos}$$

Quiere decir que el número de ciclos es de 99823 +/- 14550.54 ciclos.

Con este dato procedemos a buscar el número de pruebas que se deben realizar para tener un experimento confiable.

Se dice que 99823 es el 100% del número de ciclos entonces los 14550.54 ciclos en los cuales varia el margen de error corresponden al 14.57% de variación del total de número de ciclos.

Tabla 7: número de pruebas que se deben realizar según el margen de error para el número de ciclos

Margen de error [numero de ciclos]	Margen de error %	numero de pruebas	
14000	14,025	5,40	5
13000	13,023	6,26	6
12000	12,021	7,35	7
11000	11,020	8,75	9
10000	10,018	10,59	11
9000	9,016	13,07	13
8000	8,014	16,54	17
7000	7,012	21,60	22
6000	6,011	29,41	29
5000	5,009	42,34	42
4000	4,007	66,16	66
3000	3,005	117,62	118
2000	2,004	264,65	265
1000	1,002	1058,59	1059

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Se puede concluir que si se tiene un margen de error de 8% es necesario realizar 17 pruebas para tener un experimento confiable. Lógicamente si se realiza este número de pruebas el margen de error para el esfuerzo disminuirá aproximadamente a 2.1 Mpa lo cual indica que el esfuerzo prácticamente se mantiene constante en todas las pruebas.

Numero de ciclos: 99823 ± 8000 ciclos

Esfuerzo: 104.1118 ± 2.1 Mpa

Estos serían los márgenes de error que varía en las pruebas.

4.1.2 Estimación del esfuerzo ultimo a tensión.

Para la elaboración de la grafica de fatiga teórica para el acero AISI 1020 se realizo un ensayo a tracción del material usando la máquina universal, como se puede observar en la figura 27; para las pruebas a tracción se evaluaron tres probetas de acero AISI 1020 y se obtuvo la información que se presenta en la tabla 8.

Figura 27.foto de la maquina universal



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

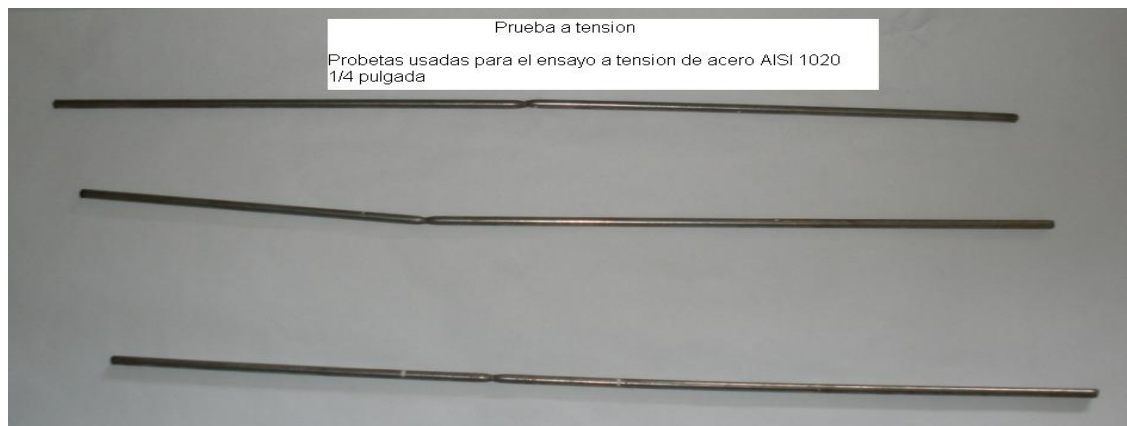
Tabla 8: datos obtenidos en la prueba de tracción realizada en el laboratorio de resistencia de materiales.

Nombre	Fm Carga Máxima	Rm Resistencia Máxima	Ru Resistencia Última	Z Porcentaje de Reducción de Área	A Porcentaje de Alargamiento
Probeta	N	N/mm2	N/mm2	%	%
1	17335,94	547,41	335,31	59,92	5,00
2	13273,44	419,13	166,55	48,66	4,00
3	13718,75	433,19	215,30	54,99	4,00

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

Se realizaron tres pruebas a tracción para el acero 1020 como se muestra la figura 28; se llegó a la conclusión que las propiedades físicas en un mismo acero varían según la marca, el lote de fabricación y otros factores importantes. Para el análisis que se quiere realizar es importante conocer el esfuerzo último a tensión, como se obtuvo tres valores muy diferentes se escogió el valor mayor que es igual a 335.31 Mpa por ser el valor más cercano a 379 Mpa que es el valor característico del esfuerzo ultimo a tensión para el acero AISI 1020 que se puede encontrar en libro diseño de máquinas de NORTON Robert L. página 998.

Figura 28. Probetas usadas para el ensayo a tracción



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero

4.1.3 Estimación de la resistencia teórica a la fatiga

Los datos que se presentan a continuación indican una estimación del límite inferior a la fatiga sin factores de corrección para la grafica de S-n. Mencionada anteriormente en la figura 4.

$$\begin{aligned}
 \text{Acero: } \{ S'e = 0.5 Su_t \quad \text{para} \quad Su_t < 200\text{Ksi} (1400 \text{ Mpa}) \} & \text{ Ecuación 6 [3]} \\
 S'e = 0.5 * Su_t = 0.5 * (335.31\text{Mpa}) & \\
 S'e = 167.65 \text{ Mpa} &
 \end{aligned}$$

Con el límite de fatiga corregido se obtienen las siguientes características.

4.1.4 Cálculo de resistencia a la fatiga Corregida

Para el caso de fatiga de alto ciclaje tenemos un ancho de banda entre 10^3 ciclos y 10^6 ciclos por esta razón se usa el límite de fatiga corregido y obtenemos el siguiente valor:

$$\text{Flexión:} \quad S_m = 0.9 * S_{u_t} \quad \text{Ecuación 7 [3]}$$

$$S_m = 0.9 * (335.31 \text{ Mpa})$$

$$S_m = 301.77 \text{ Mpa}$$

4.1.5 Factores de corrección aplicables a la resistencia a la fatiga

$$S_e = C_{carg} * C_{tam} * C_{Super} * C_{temp} * C_{conf} * S_e \quad \text{Ecuación 8 [3]}$$

- ❖ **Factor de carga:** es importante recalcar que las pruebas hechas de forma experimental se han realizado tomando como referencia la flexión rotativa lo cual indica que es conveniente usar para este análisis el siguiente valor.

$$\text{Flexión} \quad C_{carga} = 1 \text{ [3]}$$

- ❖ **Factor de tamaño :**

$$\text{Para} \quad d \leq 0.3 \text{ in (8 mm)} \quad C_{tam} = 1 \text{ [3]}$$

- ❖ **Factor de superficie:** las probetas que se usaron para el análisis tienen como acabado superficial rolado en caliente por tal razón se seleccionara de la tabla 9 los valores correspondientes a este acabado, se presenta a continuación el proceso que tuvo dicho material para su obtención.

Tabla 9: Coeficiente para la ecuación de factor superficial.

Acabado superficial	Mpa		Kpsi	
	A	b	A	b
Rectificado	1.58	-0.085	1.34	-0.085
Maquinado o estirado en frío	4.51	-0.265	2.7	-0.265
Rolado en caliente	57.7	-0.718	14.4	-0.718
Forjado	272	-0.995	39.9	-0.995

Tomado de: NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000.

$$C_{superficie} = A(S_{ut})^b \quad \text{Ecuación 9 [3]}$$

$$C_{superficie} = 57,7(335.31 \text{ Mpa})^{-0.718}$$

$$C_{superficie} = 0,6184$$

- ❖ **Factor de temperatura:** el factor de temperatura no es de gran importancia para este análisis debido a que las probetas se trabajaron a temperatura ambiente.

Para: $T \leq 450 \text{ }^\circ\text{C}$ (840 °F) [3]

$$C_{temperatura} = 1$$

- ❖ **Factor de confiabilidad :** se trabajo con una confiabilidad para las probetas de 99 % tomados de la tabla 10; obtenemos la constante de confiabilidad:

Tabla 10: Factor de confiabilidad para reducción de la resistencia

CONFIABILIDAD %	C confiabilidad
50	1.000
90	0.897
99	0.814
99.9	0.753
99.99	0.702
99.999	0.659

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

$$C_{\text{confiabilida}} = 0.814 \text{ [3]}$$

Ahora se presenta el valor del límite a la fatiga usando los factores de corrección obtenidos anteriormente:

$$S_e = 1 * 1 * 0.6184 * 1 * 0,814 * 167.65 \text{ Mpa}$$

$$S_e = 84.39 \text{ Mpa}$$

Ecuación para el cálculo del esfuerzo para cualquier número de ciclos

$$S_n = aN^b \quad \text{Ecuación 10 [3]}$$

$$b = \frac{1}{z} \log\left(\frac{S_m}{S_e}\right) \quad \text{donde} \quad z = \log N_1 - \log N_2 \quad \text{Ecuación 11 [3]}$$

$$\text{Donde } N_1 = 10^3 \text{ ciclos y } N_2 = 10^6$$

$$\text{Log}(a) = \log(S_m) - b \log(N_1) = \log(S_m) - 3b \quad \text{Ecuación 12 [3]}$$

Ahora reemplazando los valores calculados anteriormente se obtiene el número de ciclos en el cual fallaría por fatiga la probeta de acero AISI 1020

$$z = \log 10^3 - \log 10^6$$

$$z = -3$$

$$b = \frac{1}{-3} \log\left(\frac{301.77}{84.39}\right)$$

$$b = -0.18446$$

$$\text{Log}(a) = \log(301.77) - 3(-0.18446)$$

$$a = 1079.08$$

Para cualquier número de ciclos:

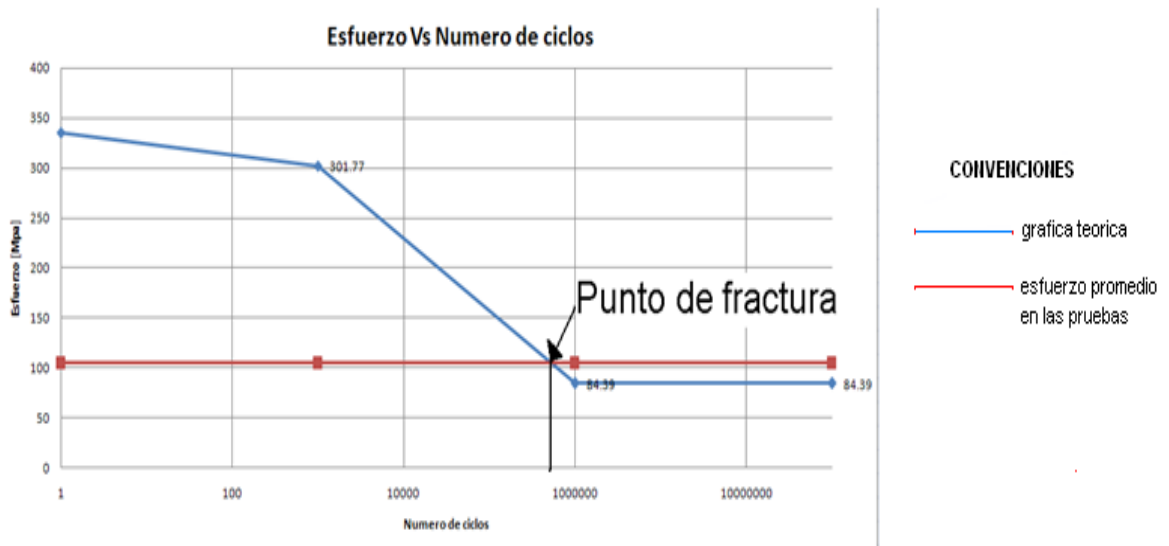
$$S_n = 1079.08N^{-0.18446}$$

$$S_n = 1079.08 * (100000)^{-0.18446} = 129.04 \text{Mpa}$$

Quiere decir que con un esfuerzo aproximado constante de 129.04Mpa la probeta llegara a la fractura en 100000 ciclos como se puede observar en la figura 29.

$$S_n = 1079.08 * (100.000)^{-0.18446} = 129.04 \text{Mpa}$$

Figura 29: gráfica teórica de esfuerzo Vs. número de ciclos.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

En la tabla 11 se presentan los puntos característicos de la gráfica de fatiga como esfuerzo último a la tracción, límite a la fatiga y el número de ciclo correspondiente.

Tabla11: Datos teóricos para graficar el esfuerzo Vs. El número de ciclos

Variable	esfuerzo [Mpa]	numero de ciclos
Su_t	335.31	0
Sm	301.77	1000
Se	84.39	1000000
Se	84.39	10000000

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

4.2 RESULTADOS PRUEBAS

Se realizó un estudio previo en el cual se evaluó el tamaño de la muestra y los resultados de la metodología basada en resonancia para la elaboración de ensayos de fatiga a flexión en materiales metálicos fueron de tipo destructivo, en las figuras 30 y 31 se puede observar que la probeta se fractura en la mitad lo cual es importante en el resultado final de la prueba porque indica que el esfuerzo máximo si se aplico en el centro de la varilla.

Figura 30. Foto de falla por fatiga de probeta AISI 1020.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Figura 31. Probeta de acero AISI 1020 finalizada

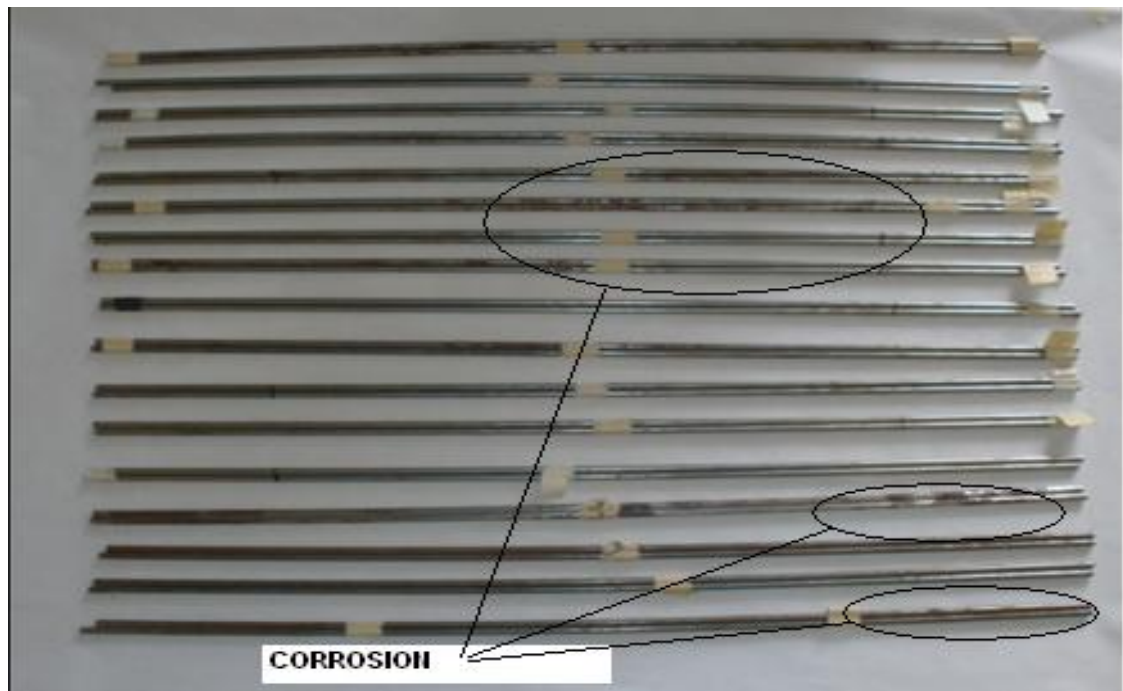


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Fue necesario hacer uso de herramientas computacionales para la visualización del comportamiento en cada una de las pruebas hechas en el laboratorio de vibraciones de la Universidad Pontificia Bolivariana. La información en cada prueba se obtuvo a través de un lenguaje de programación gráfico cuyas licencias son propiedad de la UPB la programación fue realizada en Labview 8.5. El objetivo del lenguaje de programación fue obtener información continua de las lecturas tomadas por los acelerómetros y el sensor de fuerza. Labview 8.5 ofrece un Toolkit especialmente para sonido y vibraciones .por tal razón se realizó la programación necesaria para obtener información de frecuencias naturales, deformación en los extremos en cada probeta y de esta forma realizar la grafica de esfuerzo vs. Número de ciclos.

Para poder validar el resultado de la gráfica de esfuerzo Vs. Número de ciclos fue necesario calcular el número de muestras que estadísticamente hace del experimento confiable como se muestra en la tabla 7; que para un error del 8% en el número de ciclos se deben realizar 17 pruebas o ensayos y con esta información se vuelve a recalcular el margen de error de la prueba. En la figura 32 se presentan las 17 pruebas finalizadas de tipo destructivo.

Figura 32. Evidencia de pruebas realizadas en 17 Probeta de acero AISI 1020. Con falla por fatiga

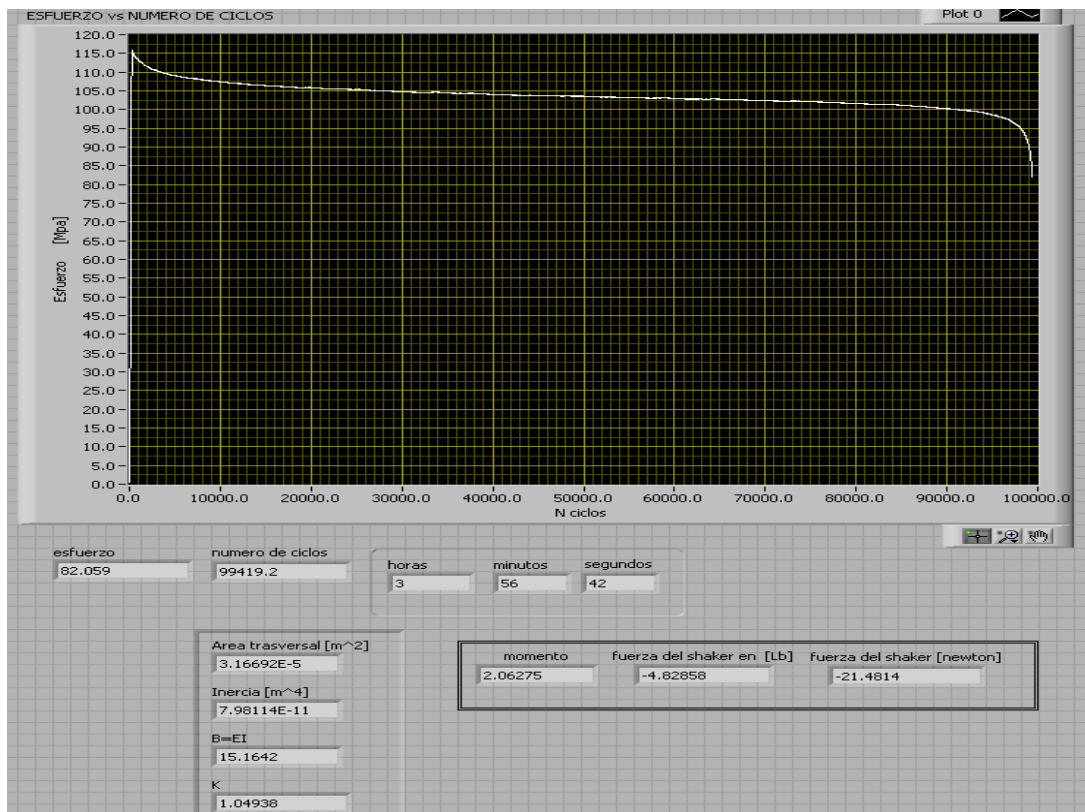


Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Se observa en la figura 32 que algunas de las probetas presentan corrosión debido a que en el lugar donde se realizaron las pruebas era muy húmedo y por tanto para la realización de las pruebas se lijaron y limpiaron las probetas para eliminar cualquier superficie que se encuentre oxidada y que pueda causar algún daño al material mientras se realiza la prueba.

Los resultados y gráficas obtenidas con la programación realizada en Labview 8.5 se muestran en el anexo A1 donde se puede observar el comportamiento del esfuerzo y número de ciclos para cada ensayo. En la figura 33 se puede observar la gráfica obtenida en una de las pruebas de fatiga a flexión basada en resonancia. Las 16 pruebas restantes tienen un comportamiento similar en el esfuerzo y el número de ciclos.

Figura 33: gráfica de esfuerzo Vs. Numero de ciclos de una prueba de fatiga a flexión basada en resonancia.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Datos obtenidos:

Numero de ciclos = 99419

Esfuerzo promedio= 103.618 Mpa

Con los resultados obtenidos en las pruebas se procede a calcular el margen de error que hay en el experimento.

Tabla 12: Resultados obtenidos según la prueba realizada

Prueba	Numero de ciclos	Esfuerzo promedio Mpa
1	99419	103.61
2	103520	105.2
3	86356	102.44
4	125583	102.83
5	84229	106.47
6	98648	102.44
7	111164	99.95
8	87490	105.65
9	105907	104.14
10	82852	106.17
11	70104	107.09
12	66631	106.36
13	74485	108.28
14	107836	101.97
15	70691	108.43
16	145967	101.12
17	70623	104.37
Promedio Total	93617.94	104.50
Desviación estándar ciclos	21760.43	

Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

En la tabla 12 se pueden observar los valores de esfuerzo y número de ciclos de cada una de las pruebas y con el valor total promedio para el cálculo del margen de error que se halla con la ecuación 5 que se encuentra en el ítem 2.5.

✓ El esfuerzo tiene un margen de error de:

$$e = \frac{Z * \sigma}{\sqrt{n}} \text{ Ecuación 5}$$

$$e = \frac{1.96 * 4.42}{\sqrt{17}} = 2.10 \text{ Mpa}$$

El esfuerzo promedio en cada una de las pruebas es de 104.50 Mpa \pm 2.10 Mpa que es el margen de error permisible. Que se debe a propiedades mecánicas del material y sensibilidad de los sensores por ruido eléctrico.

- ✓ El número de ciclos tiene un margen de error experimental o incertidumbre de :

$$e = \frac{1.96 * 21760.43}{\sqrt{17}} = 10344.25 \text{ Ciclos}$$

El número de ciclos promedio en el cual fallaría una probeta de acero AISI 1020 sometido a esfuerzo de 104.50 Mpa \pm 2.10 Mpa; sería de 93617.94 ciclos \pm 10344.25 ciclos. El valor de la incertidumbre para los ensayos de fatiga en el caso de la metodología presentada es significativamente pequeña en relación al rango $10^3 - 10^6$ ciclos que se maneja en la gráfica de esfuerzo vs número de ciclos. El margen de error para el número de ciclos sería equivalente al 11.04 % Para este caso el margen de error es grande debido a que las probetas de acero AISI 1020 con las cuales se realizaron las pruebas presentan propiedades físicas diferentes como el esfuerzo último a tensión que no fue el mismo en todas las probetas durante una prueba de tracción que se realizó en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, el resultado se puede ver en la tabla 8.

El esfuerzo en los 17 ensayos de fatiga se mantuvo constante pero el número de ciclos varió significativamente en algunas pruebas, por lo cual se puede suponer hipotéticamente que algunas propiedades físicas varían según la marca de acero y el lote de fabricación.

Por consiguiente el número de ciclos al cual debe fracturarse la probeta con un determinado esfuerzo promedio varía considerablemente en un rango de 10344.25 ciclos.

En el anexo 1 se pueden observar las gráficas de esfuerzo Vs. Número de ciclos para cada prueba que se realizó, se puede notar la misma tendencia en el tipo de gráfica empezando por una caída del esfuerzo que va desde 0 hasta

aproximadamente 5000 ciclos, la cual se debe al tiempo que el shaker tarda en adaptarse a la señal que le es enviada hasta llegar a un punto donde el esfuerzo permanece prácticamente constante con una leve inclinación descendiente, mientras transcurre el tiempo en el cual la probeta presenta la iniciación de la grieta y pérdida de las propiedades mecánicas que es visible con un cambio en la pendiente de la gráfica la cual indica que la probeta en pocos ciclos llegará a la fractura.

En la parte final de la gráfica de esfuerzo Vs. Numero de ciclos se denota una curva que pasa de horizontal a vertical e indica que la probeta se fracturó y por consiguiente el esfuerzo decae rápidamente indicando que es el final de la prueba. En la figura 34 y 35 se puede visualizar y ver la propagación de la grieta presentada por el ensayo de fatiga en una probeta de acero AISI 1020 de $\frac{1}{4}$ de pulgada de 1.5 metros de longitud.

Figura 34: Visualización de la grieta causada por fatiga



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

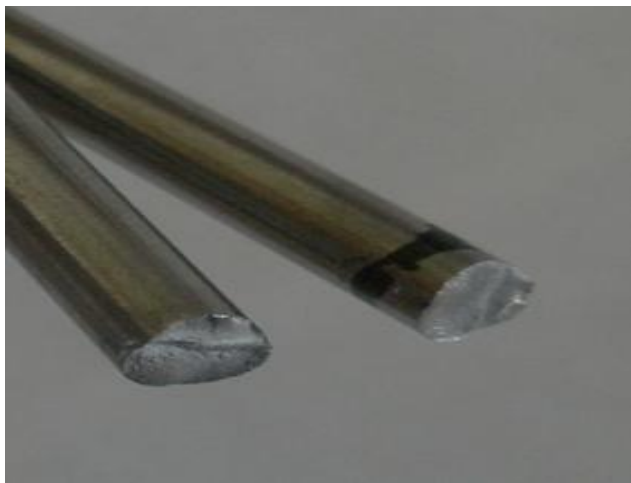
Figura 35: Propagación de la grieta causada por fatiga



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Las marcas dejadas por la fatiga en las probetas presentan información detallada de la manera como se fracturó y como poco a poco se fue propagando la grieta. Estas marcas se pueden ver en la figura 36; en la cual se puede observar una varilla de acero AISI 1020 que fue sometida a fatiga utilizando resonancia y muestra un corte vertical con un sobresalto el cual se produjo en el momento final a la fractura causado por la inercia de la misma varilla.

Figura 36: Probeta fracturada en la cual se pueden ver las marcas dejadas por la fatiga.



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Comparando los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el resultado teórico de la grafica por fatiga se puede decir que el esfuerzo promedio obtenido en las pruebas con las probetas sometidas a resonancia es de 104.5 Mpa fracturándose en 100000 ciclos. Mientras que en la teoría nos indica que para llegar a la fractura en la misma cantidad de ciclos se necesita un esfuerzo de 129.04 Mpa. Hay una diferencia de 24.54 Mpa que es el 19.01% de error entre el método experimental y el teórico.

La razón para que se de esta diferencia entre los resultados teórico y experimental es que en el segundo la probeta se sometió a resonancia causándole la máxima deformación con un menor esfuerzo al aplicado de manera normal para fracturar la probeta en el mismo número de ciclos. Cuando un objeto es sometido a resonancia por la acción de una fuerza constante aplicada gradualmente esta fuerza irá aumentando su magnitud haciendo que el objeto sienta una mayor carga y tienda a la destrucción por ello las probetas de acero AISI 1020 de $\frac{1}{4}$ de pulgada se fracturaron aplicando un menor esfuerzo al determinado teóricamente en los cálculos realizados.

5. CONCLUSIONES

- ❖ Las dimensiones usadas en las probetas fueron seleccionadas teniendo en cuenta los factores que afectan la rigidez, la frecuencia natural de vibración, el momento flector y los valores de esfuerzos. Se concluyó que con diámetros pequeños y longitudes grandes se obtiene una frecuencia natural de vibración baja, ya que entre menor sea esta frecuencia el shaker aplica más fuerza aumentando el esfuerzo y la deformación en la probeta.
- ❖ La información de mayor importancia por su sensibilidad y en la cual se presentan errores por ruido eléctrico causado por el mal estado en los cables es la aceleración ya que la adquisición de esta señal es la variable que proporciona la información del momento flector y con la cual se hacen los cálculos para conocer el esfuerzo al cual se someten las probetas. Por esta razón que cualquier perturbación en la señal altera la gráfica de esfuerzo vs número de ciclos.
- ❖ En las gráficas se puede observar que al comienzo de cada prueba mientras se obtiene la máxima amplitud la señal recibida y graficada no es constante y decae rápidamente en un lapso de tiempo considerable llegando hasta un punto en el cual cambia la pendiente y de ahí en adelante sus valores se hacen prácticamente constantes esto es debido a que cuando se incrementa la amplitud en el shaker este tiene un tiempo de ajuste en la señal.
- ❖ En las pruebas realizadas se pudo concluir que cuando una probeta es sometida a su frecuencia natural de vibración en un largo periodo de tiempo esta frecuencia cambia con respecto a la frecuencia natural del inicio debido al daño acumulativo que la fatiga genera.
- ❖ En las gráficas de esfuerzo vs número de ciclos existe una curva que permanece prácticamente constante en el tiempo. Cuando el material comienza a fatigarse la grieta se propaga y las propiedades del material cambian, haciendo que la probeta oscile con menor amplitud y el esfuerzo

que soportar disminuya considerablemente, teniendo en cuenta que el esfuerzo para el análisis dinámico es función de la deformación, las gráficas tienen una tendencia de línea vertical mientras la grieta se propaga con mayor rapidez hasta que sufre un corte transversal producido por la fatiga

- ❖ Fue de gran importancia realizar varios ensayos de tracción a las probetas que se evaluaron en el proyecto para tener mayor confiabilidad de las propiedades del acero, los datos obtenidos en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Pontificia Bolivariana son diferentes a los indicados por la compañía general de aceros, estos datos fueron de gran importancia ya que con ellos se realizaron los cálculos para saber cuánto esfuerzo se debería aplicar para un determinado número de ciclos. Se concluyó que los resultados de las propiedades del material son diferente tomando las muestras de la misma varilla, este comportamiento del material se ve reflejado en la variación del tiempo de fatiga en las pruebas realizadas.
- ❖ En el análisis de las pruebas realizadas se pudo concluir que esta no es una metodología viable ya que el error entre el método experimental y teórico es del 19.01% en el esfuerzo que se debe aplicar a una probeta para fracturarla en la misma cantidad de ciclos.
- ❖ Un análisis con esta metodología puede ser útil cuando se requiera una aproximación rápida del tiempo de vida de un material que se encuentre sometido a una carga fluctuante con características similares a la metodología realizada para saber el valor de esfuerzo y el número de ciclos.

6. RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda cambiar los cables que transmiten la señal de los sensores de fuerza y aceleración porque presentan gran deterioro en la estructura física y afectan a la calidad de la señal que estos envían.
- ❖ Adquirir libros que traten el tema de ondas de pando (bending waves) ya que la bibliografía que existe en la universidad tiene la información básica y para seguir con la investigación se requiere más conocimiento del tema.
- ❖ Seguir con esta investigación asiendo énfasis en la manera de encontrar el esfuerzo por otro método que pueda arrojar resultados comparables con las pruebas tradicionales de fatiga.
- ❖ Mejorar los equipos de computación para poder desarrollar programas más complejos que permitan una mayor adquisición de datos en las pruebas.
- ❖ El método de ensayos de fatiga sometidos a resonancia puede funcionar para la realización de pruebas ya que la diferencia entre este metodología y lo teórico, la variación puede haber sido causado hipotéticamente en la adquisición de la señal de los acelerómetros, por deterioro de los cables o des calibración en sensores, Al utilizar el método de fatiga sometida a resonancia son muy importante los valores obtenidos por los acelerómetros ya que de esta señal dependen todos los valores para el cálculo del esfuerzo.
- ❖ Se recomienda realizar un estudio en las probetas de acero para determinar las diferencias y cambios físicos en las propiedades del acero de acuerdo a la marca y lote de fabricación.

7. BIBLIOGRAFIA

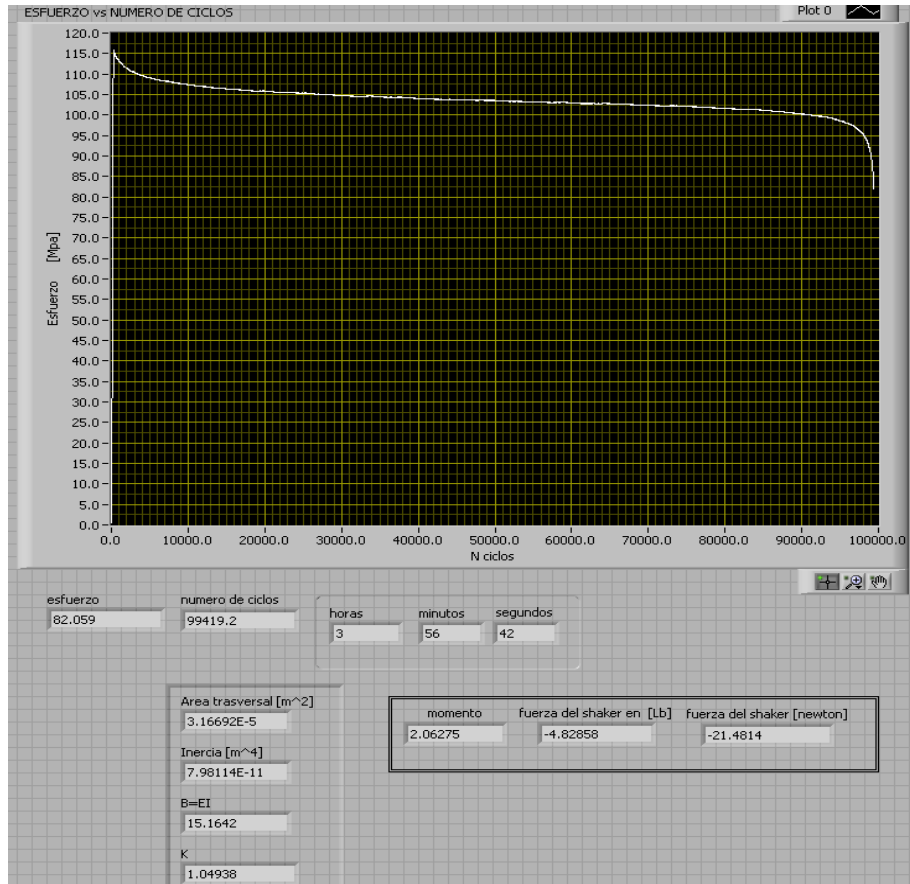
1. HAMROCK Bernard J, JACOBSON Bo O y SCHMID Steven R. Elemento de maquinas. McGraw Hill. México año 2000. 926 p
2. AVILÉS González Rafael. Análisis de fatiga en maquinas. Thomson Learning. México año 2000. 476p
3. NORTON Robert L. Diseño de maquinaria. McGraw Hill. México año 2000. 876p
4. GLEN White. Introducción al análisis de vibraciones. Azima DLI. México 1990.528p
5. WOLFGANG Kropp. Technical Acoustics I. Chalmers University of technology. Gothenburg año 2003
6. HERNANDEZ ARROYO Emil. Manual de estadística. Universidad Cooperativa de Colombia. Colombia año 2006. 192p
7. <http://www.azimainc.com/vibration>
8. SHIGLEY Joseph E y MISCHKE Charles R. Diseño en ingeniería mecánica 6ª. Edición. McGraw Hill. México año 2002. 1257p
9. <http://www.matweb.com>
10. <http://www.mbdynamics.com/assets/datasheets/PMSERIESProductBrief.pdf>
11. <http://www.nationalinstrument.com/>
12. <http://www.pcb.com/product>

13. ALI Ashraf y RAJAKUMAR Charles. The boundary element method applications in Sound and Vibration. Balkeman Publishers. Londres año 2004.188p
14. BEER Ferdinand P y JOHNSTON E Russell. Mecánica Vectorial para ingenieros. McGraw Hill. New York año 1962.436p
15. GARCIA REYES Luis Enrique. Dinámica estructural aplicada al diseño sísmico. Universidad de los andes. Bogotá año 1998. 574p
16. OROZCO A Giovanni. Estadística para ingenieros. Universidad pontificia Bolivariana. Medellín año 1996. 209p
17. ASHOK Ambardar. Procesamiento de señales analógicas y digitales 2ª edición. Thomson Learning. México año 2002.811p
18. MOTT Robert L. Diseño de elementos de maquinas 4ª edición. Pearson Educación. México año 2006.872p
19. KENNEDY John B y NEVILLE Adam M. Estadística para ciencias e ingeniería 2ª edición. Kairos. México año 1974. 468p
20. BALACHANDRAN Balakumar y MAGRAB Edward B. Vibraciones. Thomson Learning. Australia año 2006. 581p
21. <http://www.iberisa.com/soporte/fatiga/intro.htm>

8. ANEXOS

8.1 ANEXO 1: GRAFICAS Y RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS REALIZADAS

✓ Prueba numero 1



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

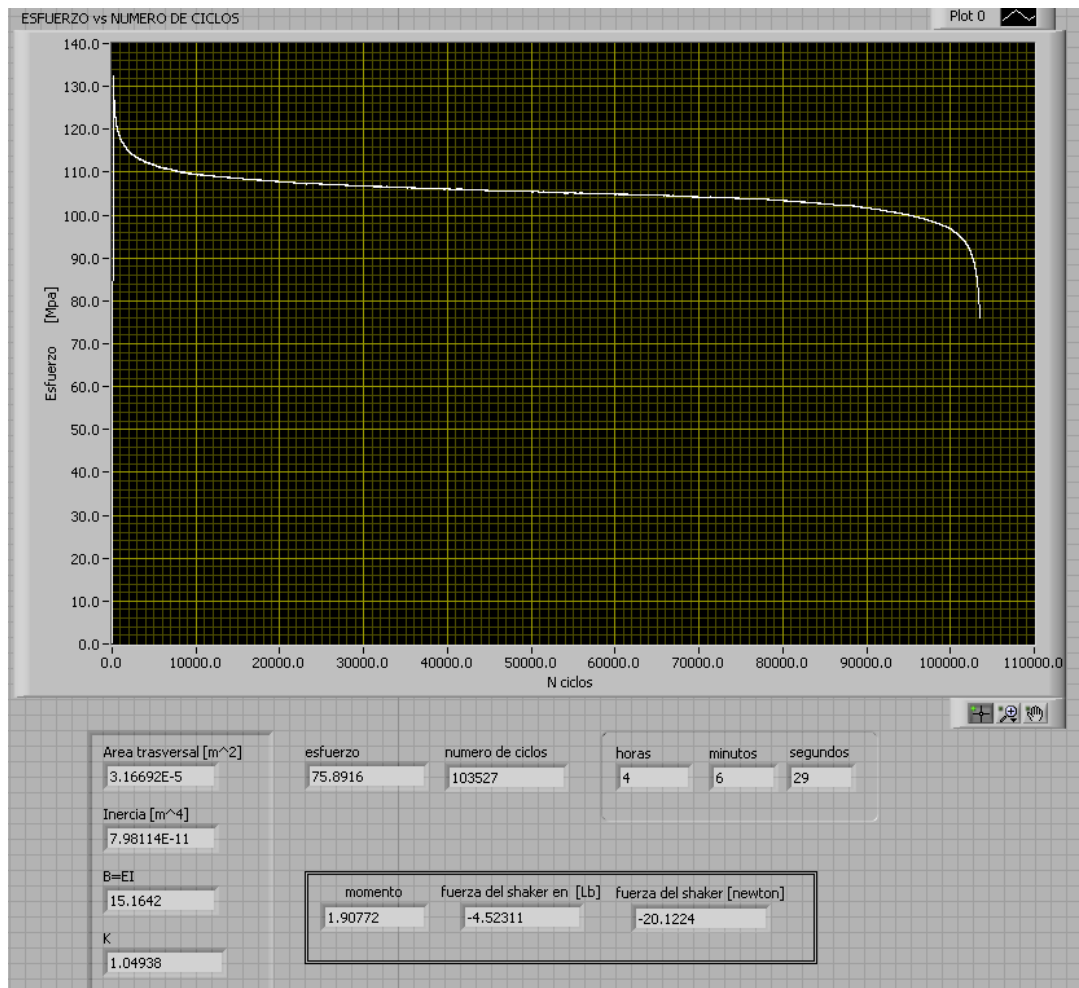
Datos obtenidos:

Numero de ciclos = 99419

Esfuerzo promedio= 103.618 Mpa

Desviación estándar =3.3430

✓ Prueba número 2



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

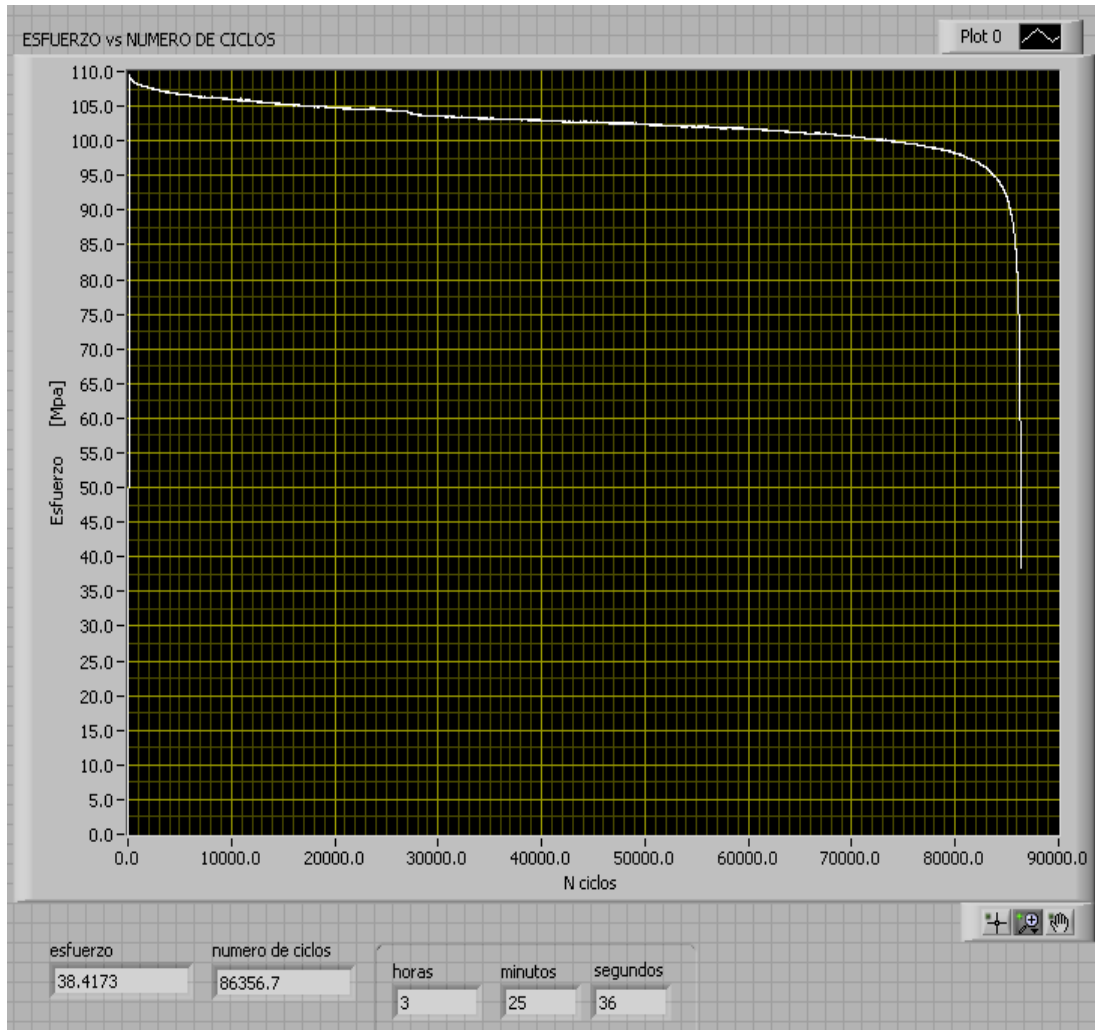
Datos obtenidos prueba 2:

Numero de ciclos = 103520

Esfuerzo promedio= 105.20 Mpa

Desviación estándar =4.35

✓ Prueba número 3



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

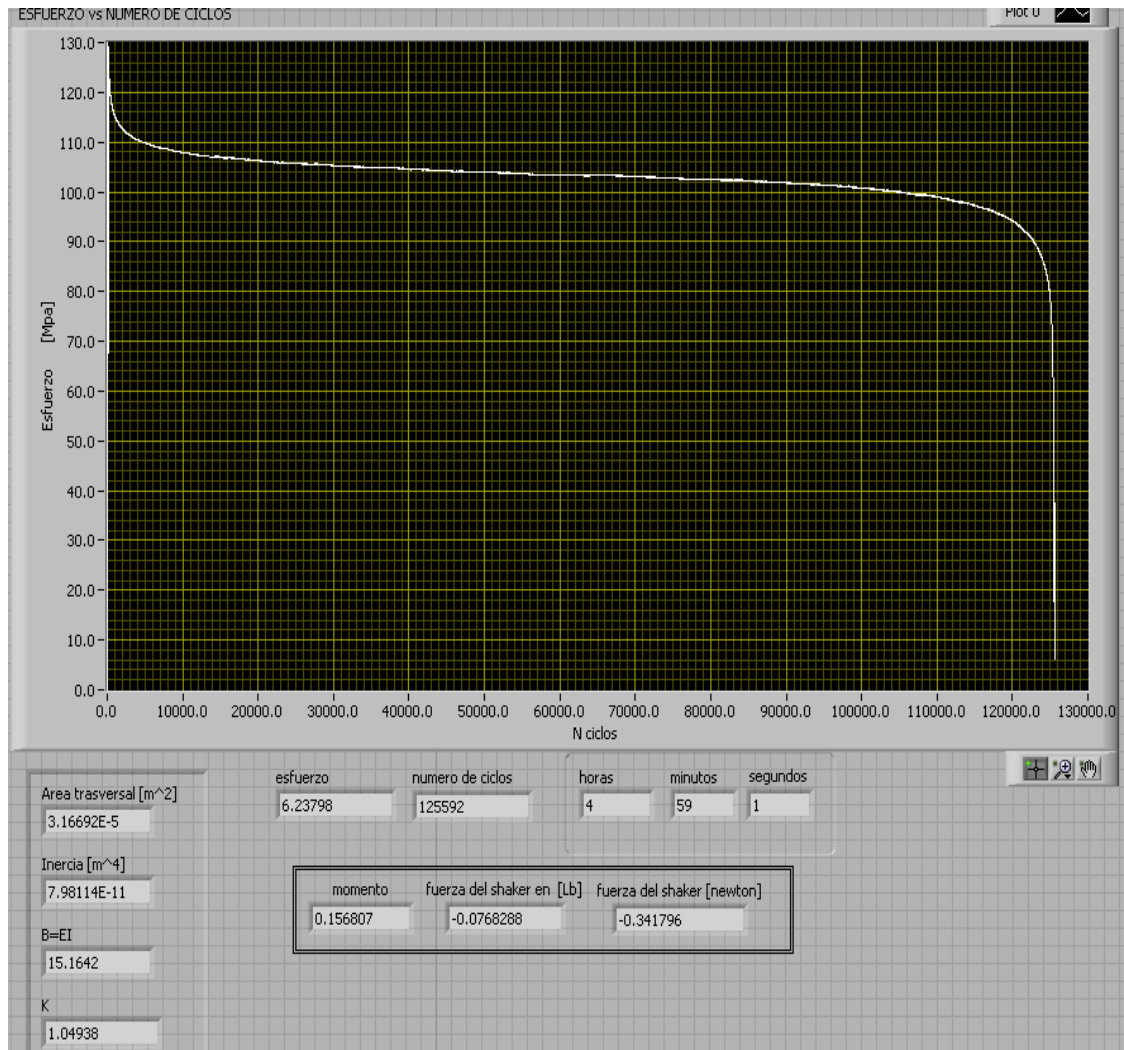
Datos obtenidos prueba 3:

Numero de ciclos = 86356

Esfuerzo promedio= 102.44 Mpa

Desviación estándar = 3.88

✓ Prueba número 4



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

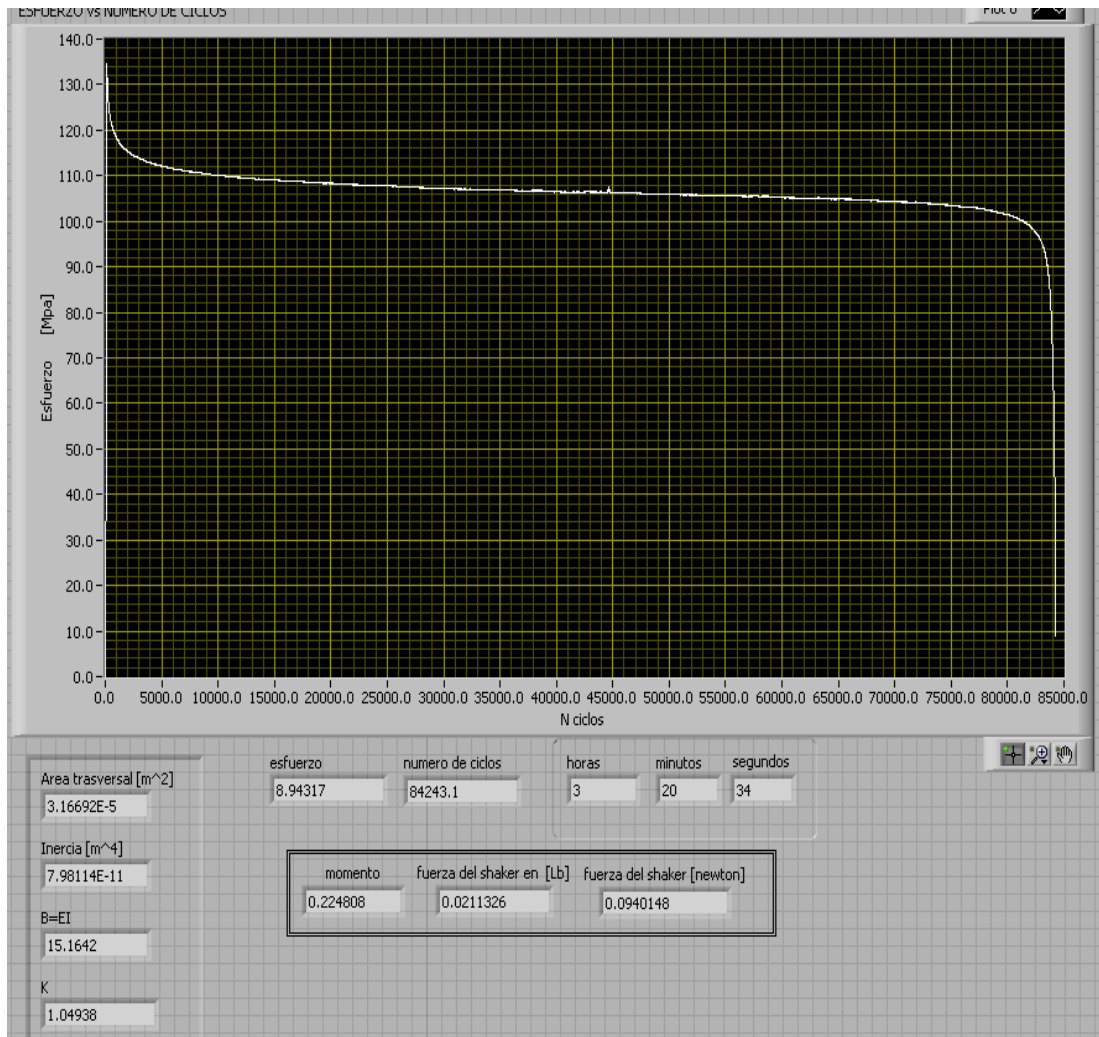
Datos obtenidos prueba 4:

Numero de ciclos = 125583

Esfuerzo promedio= 102.83Mpa

Desviación estándar =5.63

✓ Prueba número 5



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

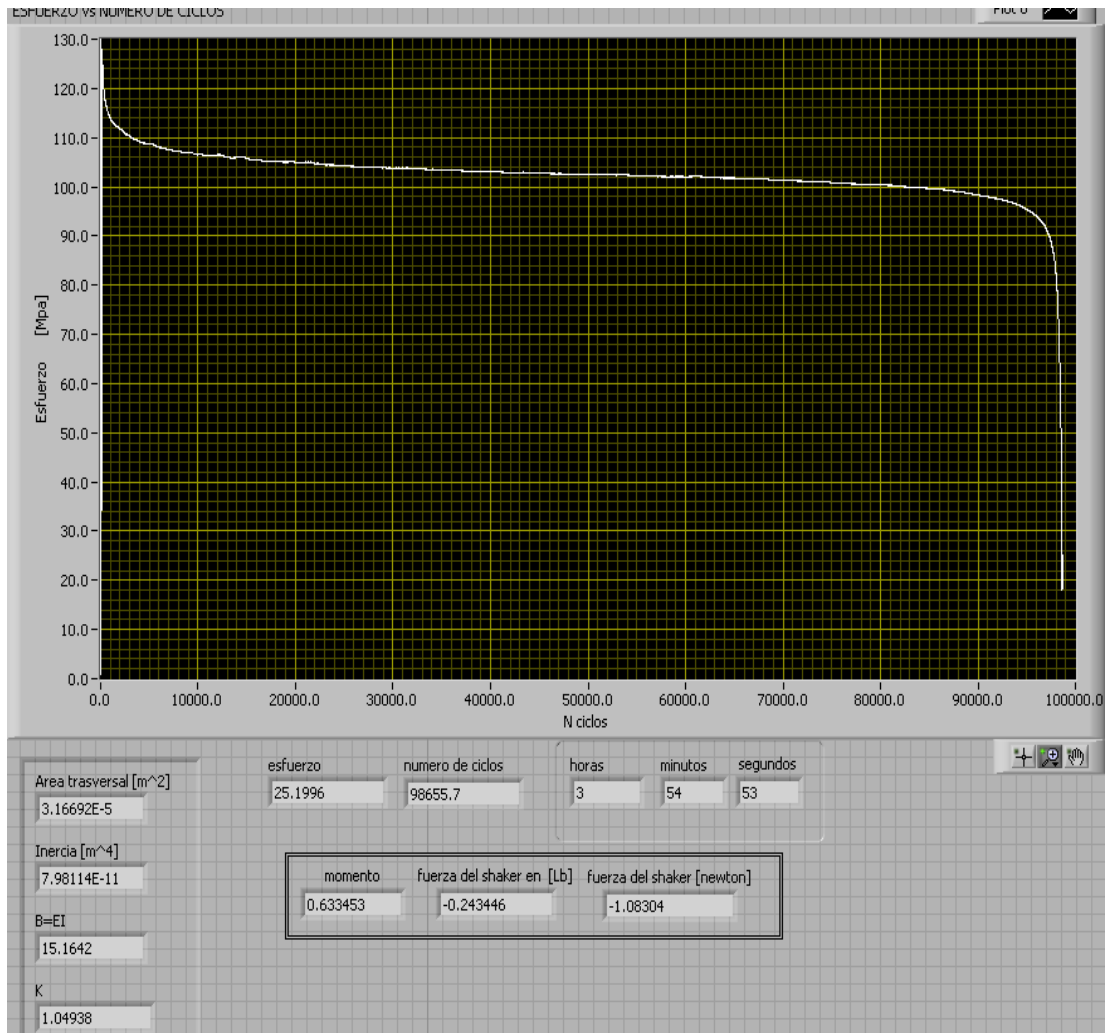
Datos obtenidos prueba 5

Numero de ciclos = 84229

Esfuerzo promedio= 106.47 Mpa

Desviación estándar = 4.94

✓ Prueba número 6



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

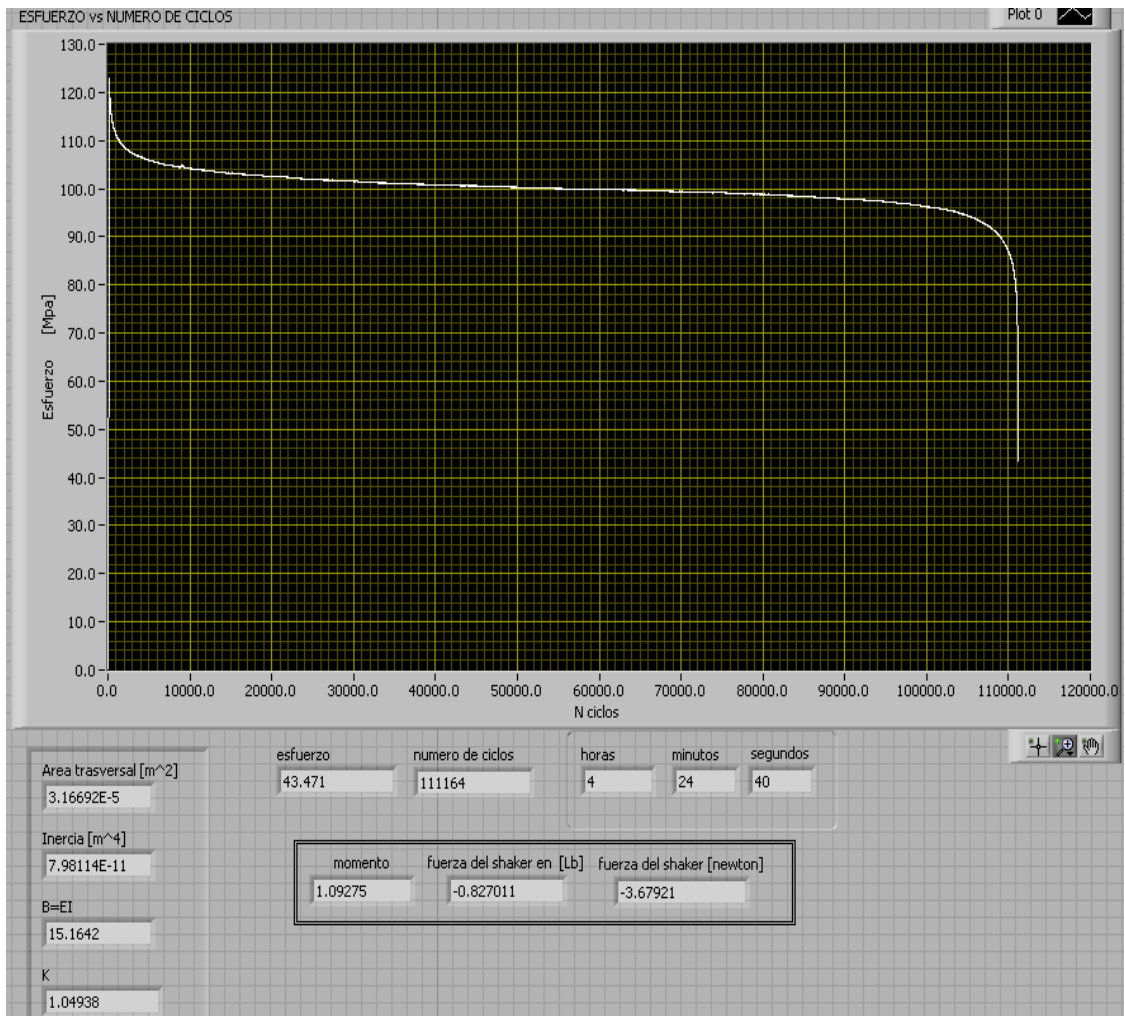
Datos obtenidos prueba 6:

Numero de ciclos = 98648

Esfuerzo promedio= 102.44 Mpa

Desviación estándar = 5.04

✓ Prueba número 7



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

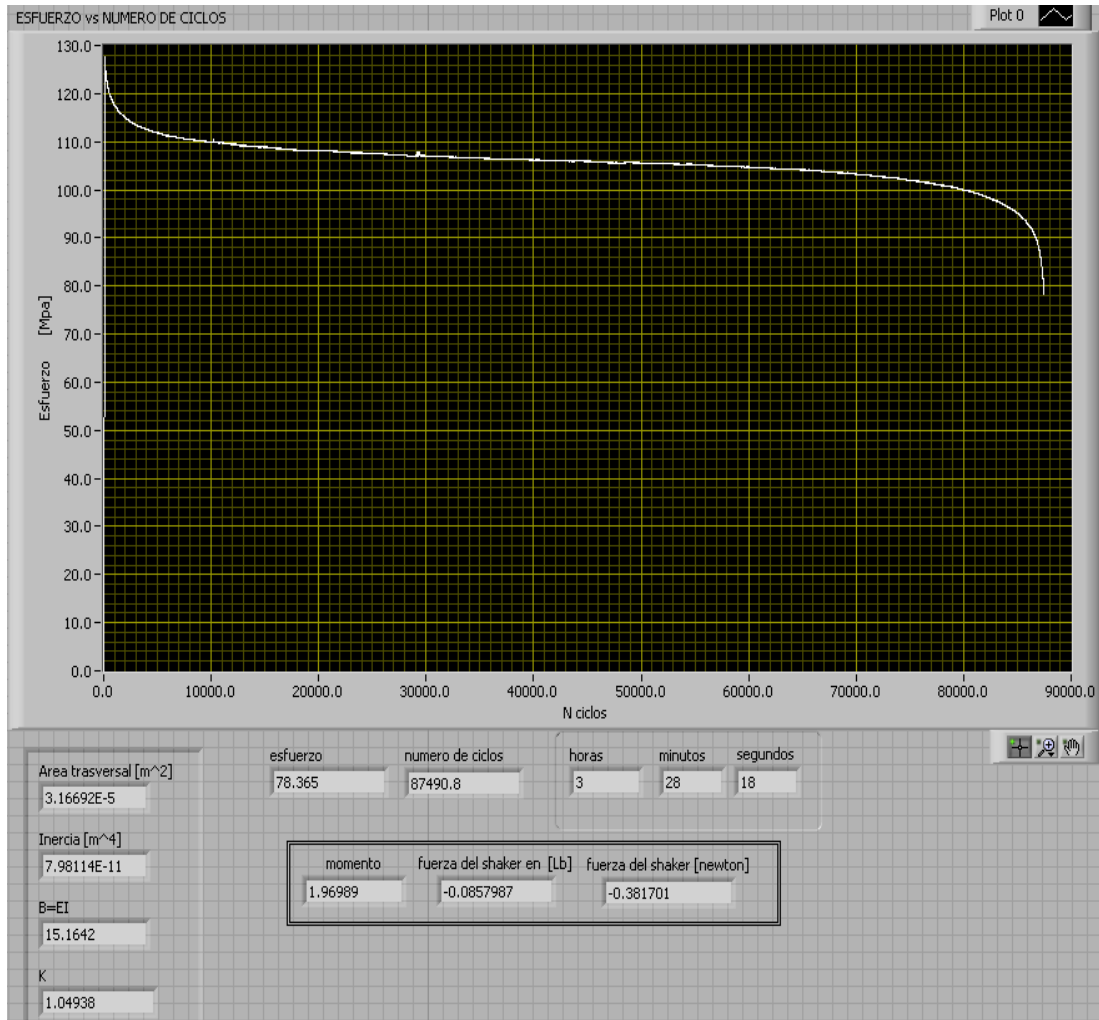
Datos obtenidos prueba 7:

Numero de ciclos = 111164

Esfuerzo promedio= 99.95 Mpa

Desviación estándar = 3.94

✓ Prueba número 8



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

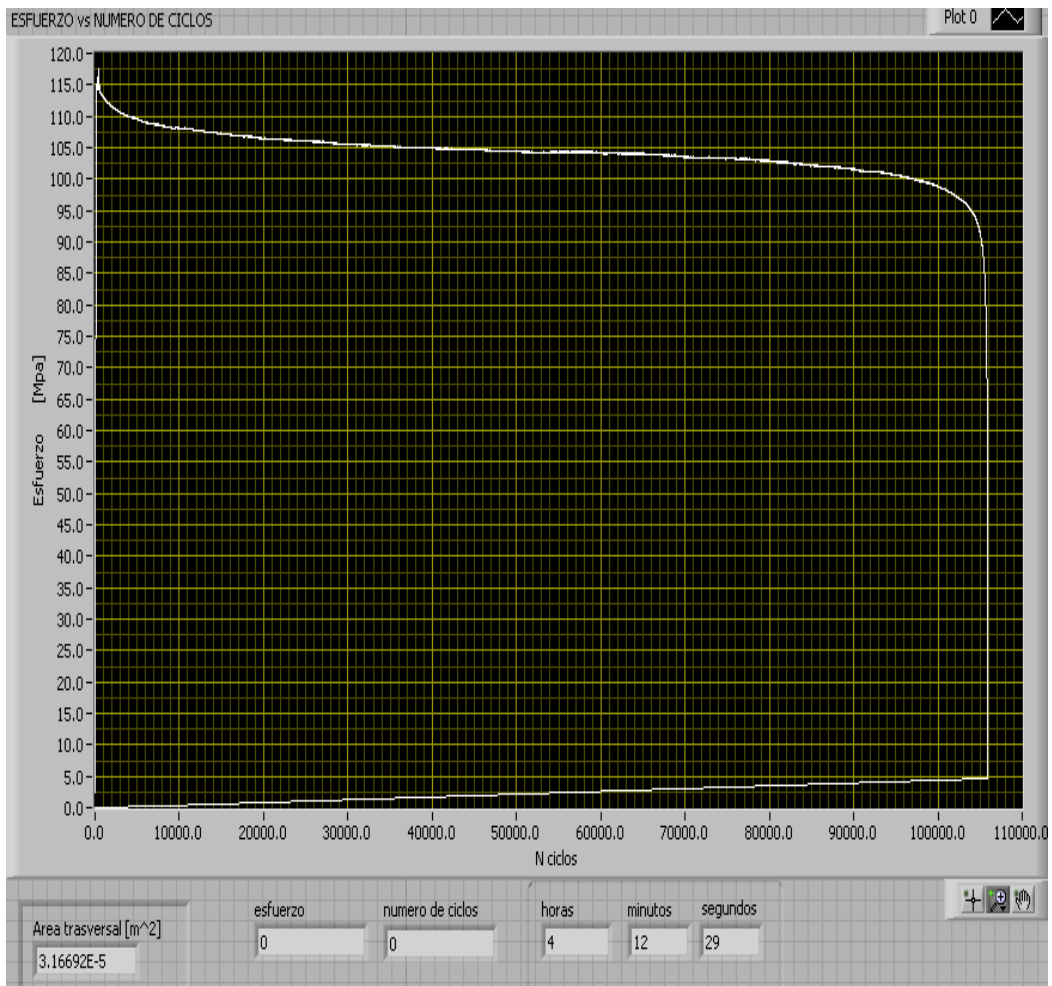
Datos obtenidos prueba 8:

Numero de ciclos = 87490

Esfuerzo promedio= 105.65 Mpa

Desviación estándar = 3.94

✓ Prueba numero 9



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

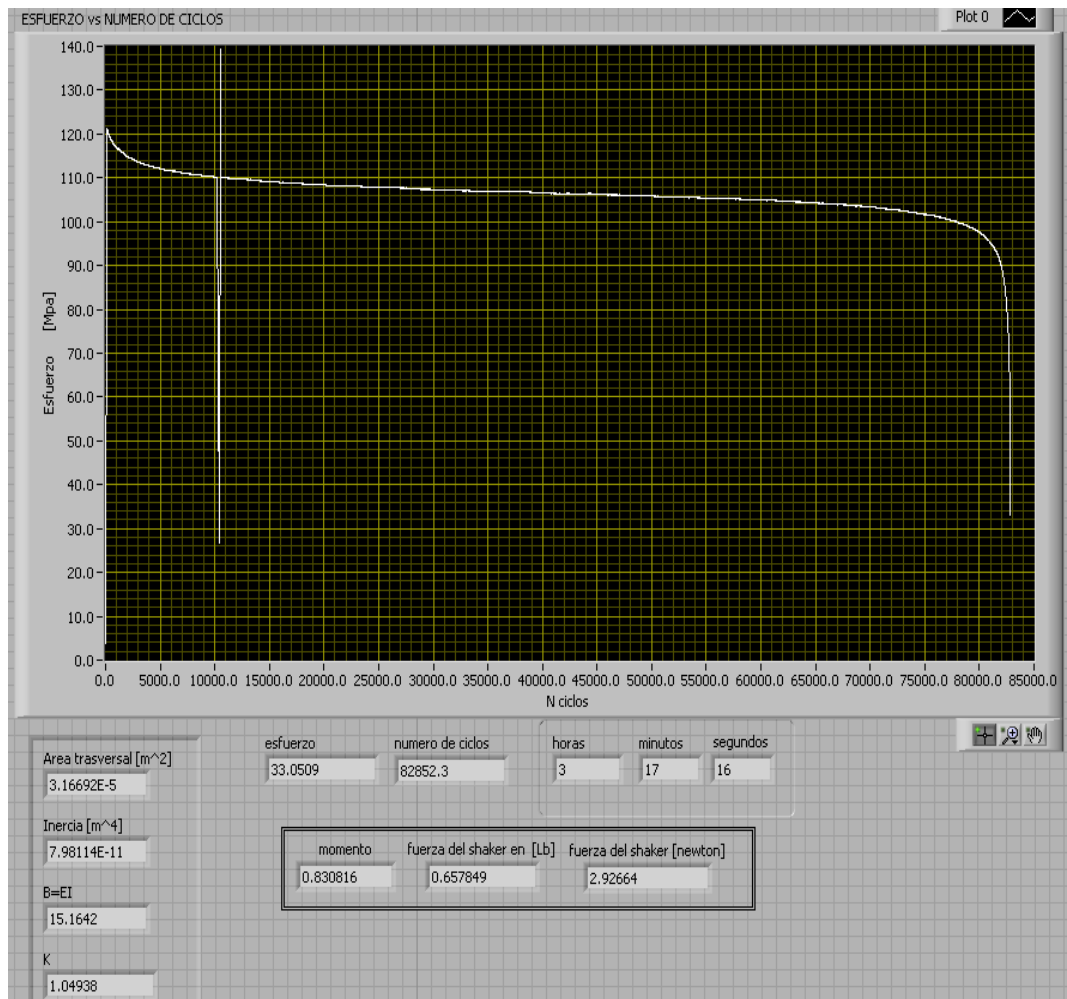
Datos obtenidos prueba 9:

Numero de ciclos = 105907

Esfuerzo promedio= 104.14 Mpa

Desviación estándar = 3.91

✓ Prueba numero 10



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

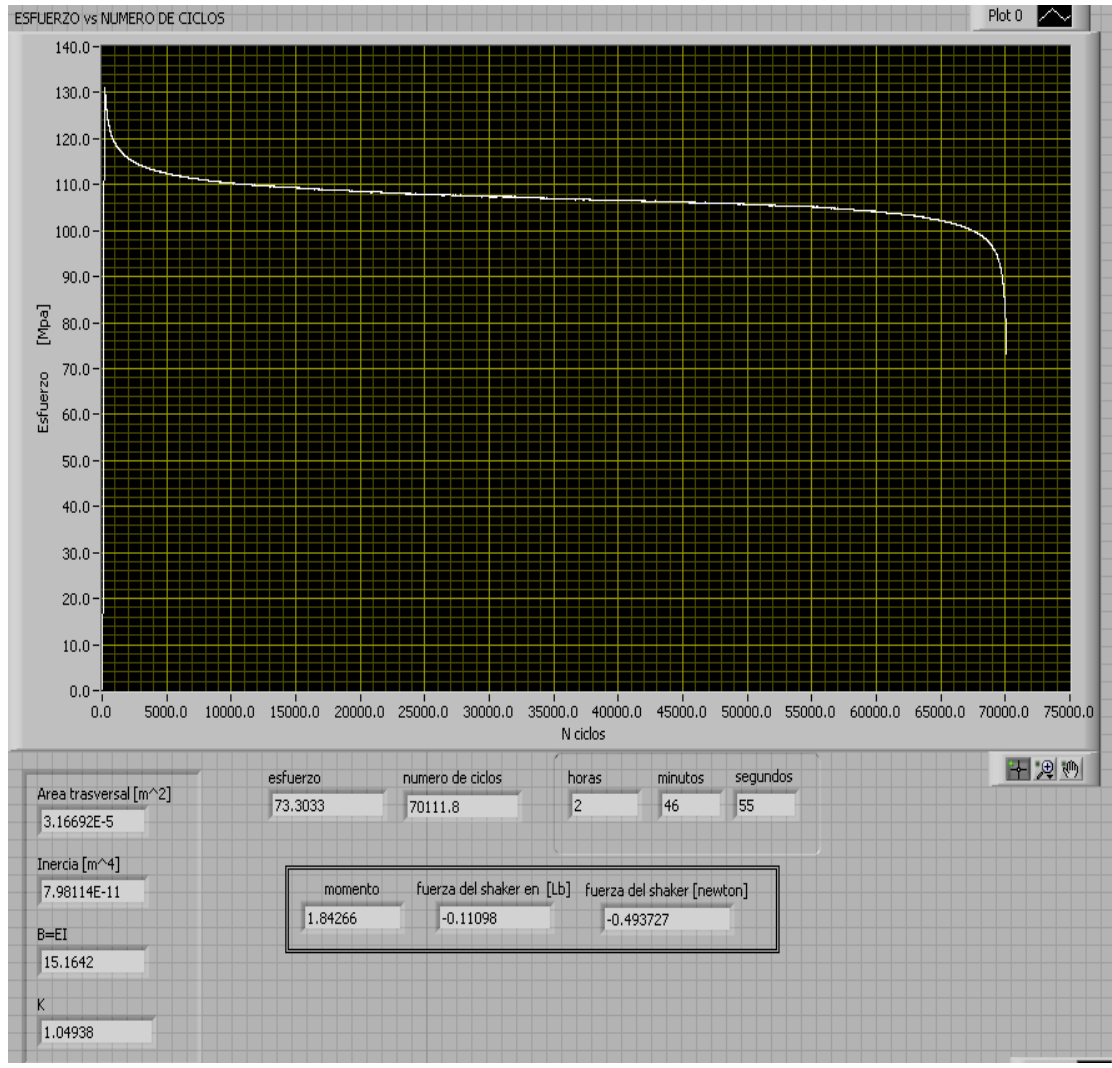
Datos obtenidos prueba 10:

Numero de ciclos = 82852

Esfuerzo promedio= 106.17 Mpa

Desviación estándar = 4.94

✓ Prueba numero 11



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

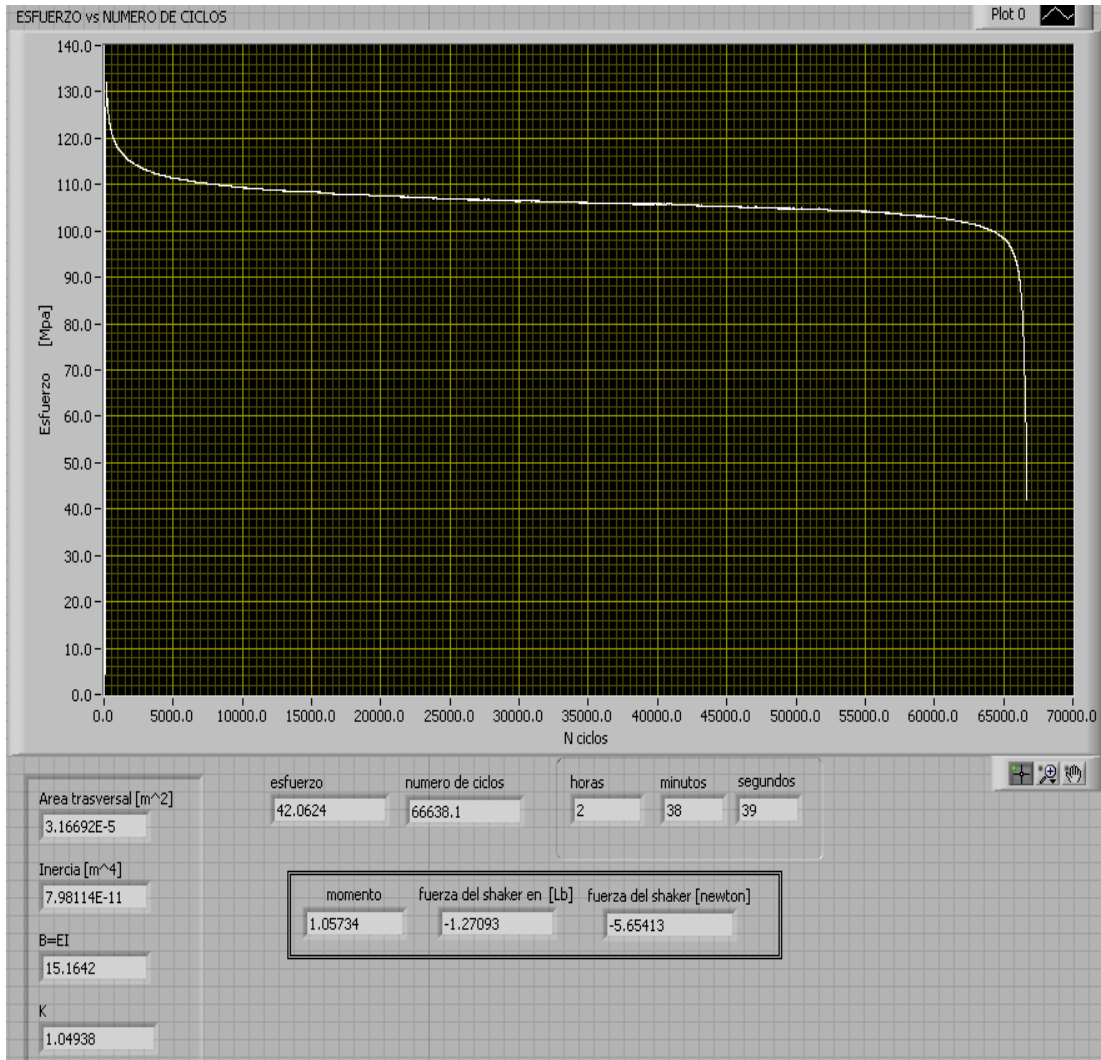
Datos obtenidos prueba 11:

Numero de ciclos = 70104

Esfuerzo promedio= 107.09 Mpa

Desviación estándar = 4.23

✓ Prueba numero 12



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

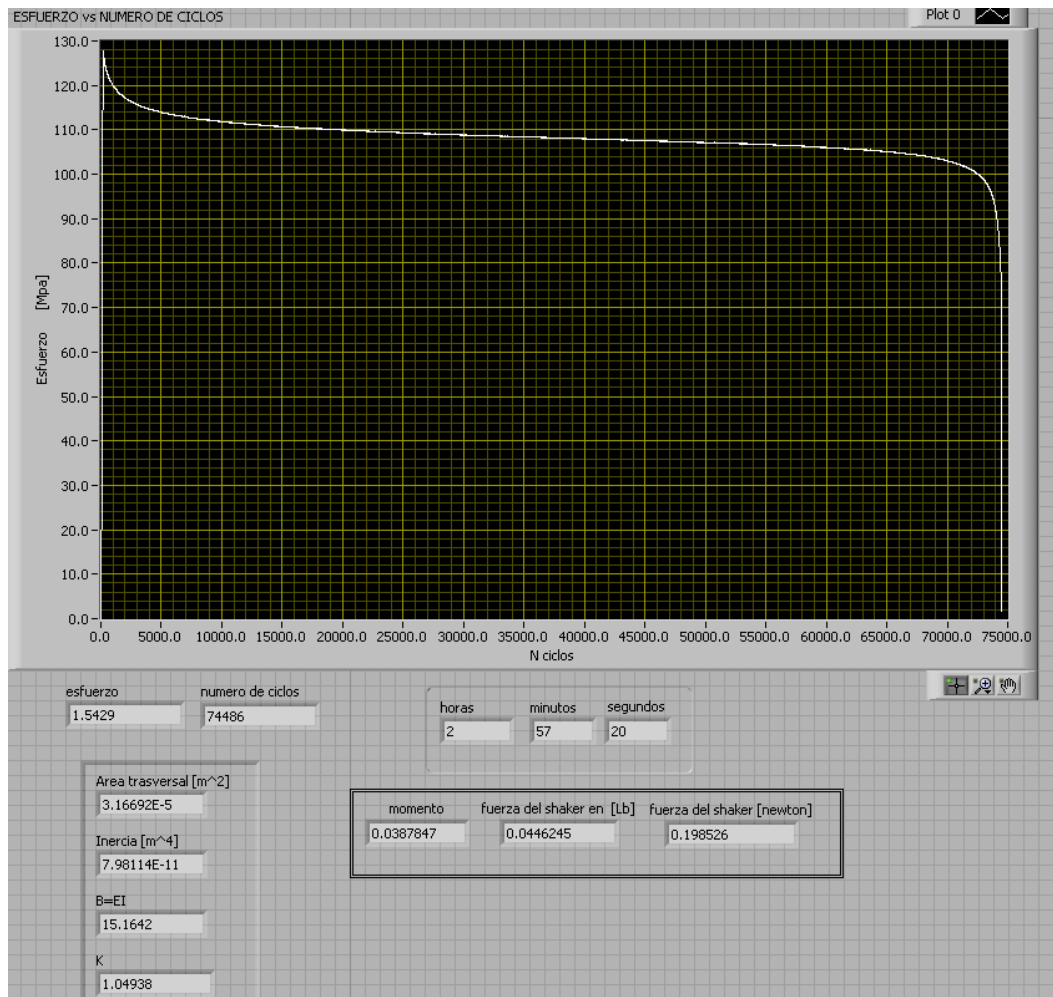
Datos obtenidos prueba 12:

Numero de ciclos = 66631

Esfuerzo promedio= 106.36Mpa

Desviación estándar = 4.54

✓ Prueba numero 13



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

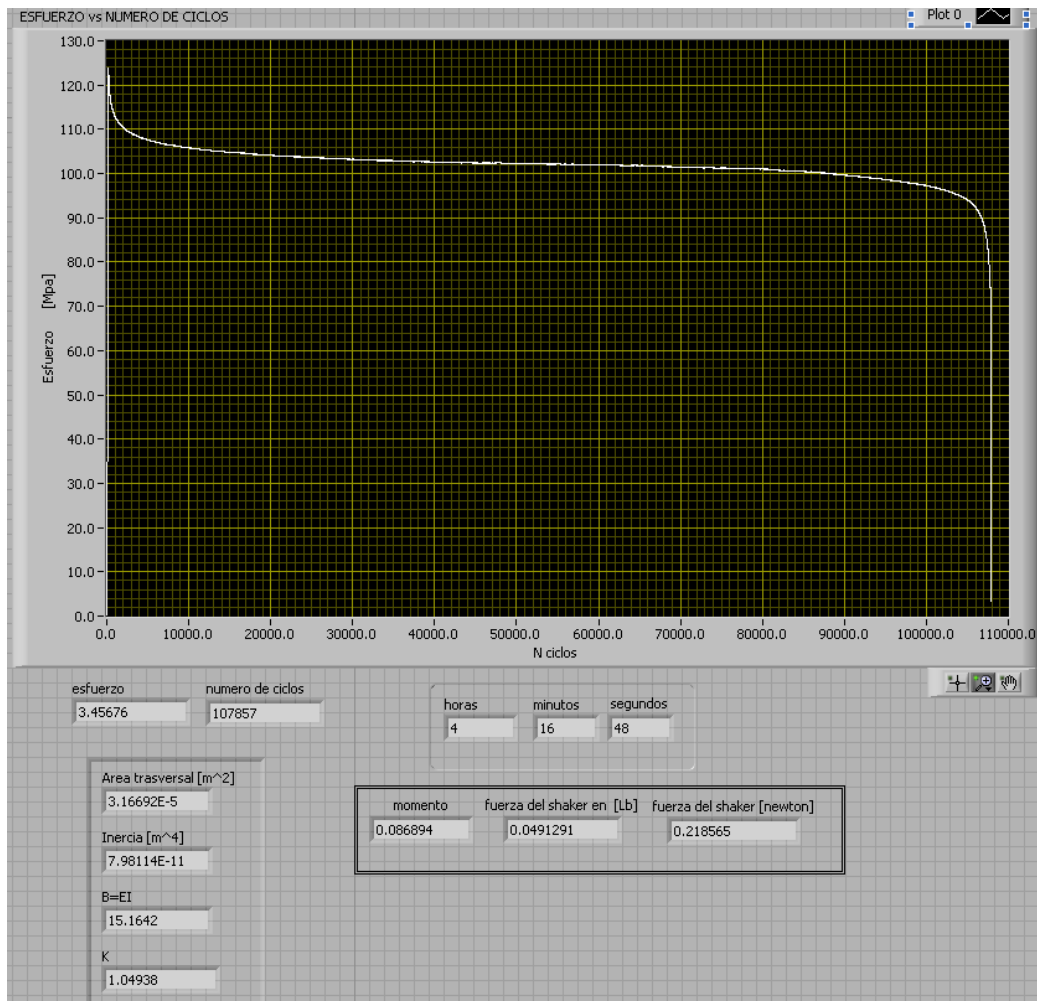
Datos obtenidos prueba 13:

Numero de ciclos = 74485

Esfuerzo promedio= 108.28Mpa

Desviación estándar = 4.57

✓ Prueba numero 14



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

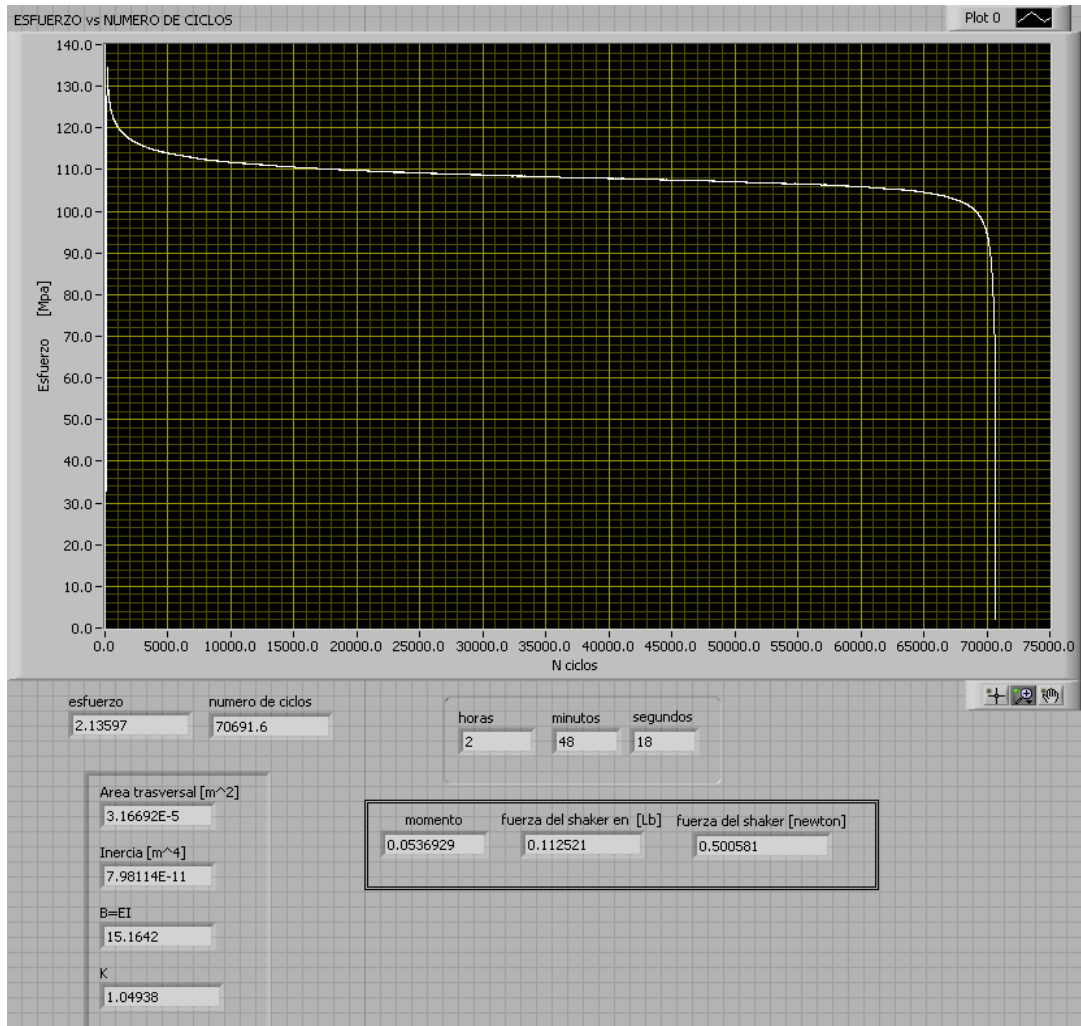
Datos obtenidos prueba 14:

Numero de ciclos = 107836

Esfuerzo promedio= 1101.97Mpa

Desviación estándar = 3.81

✓ Prueba numero 15



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

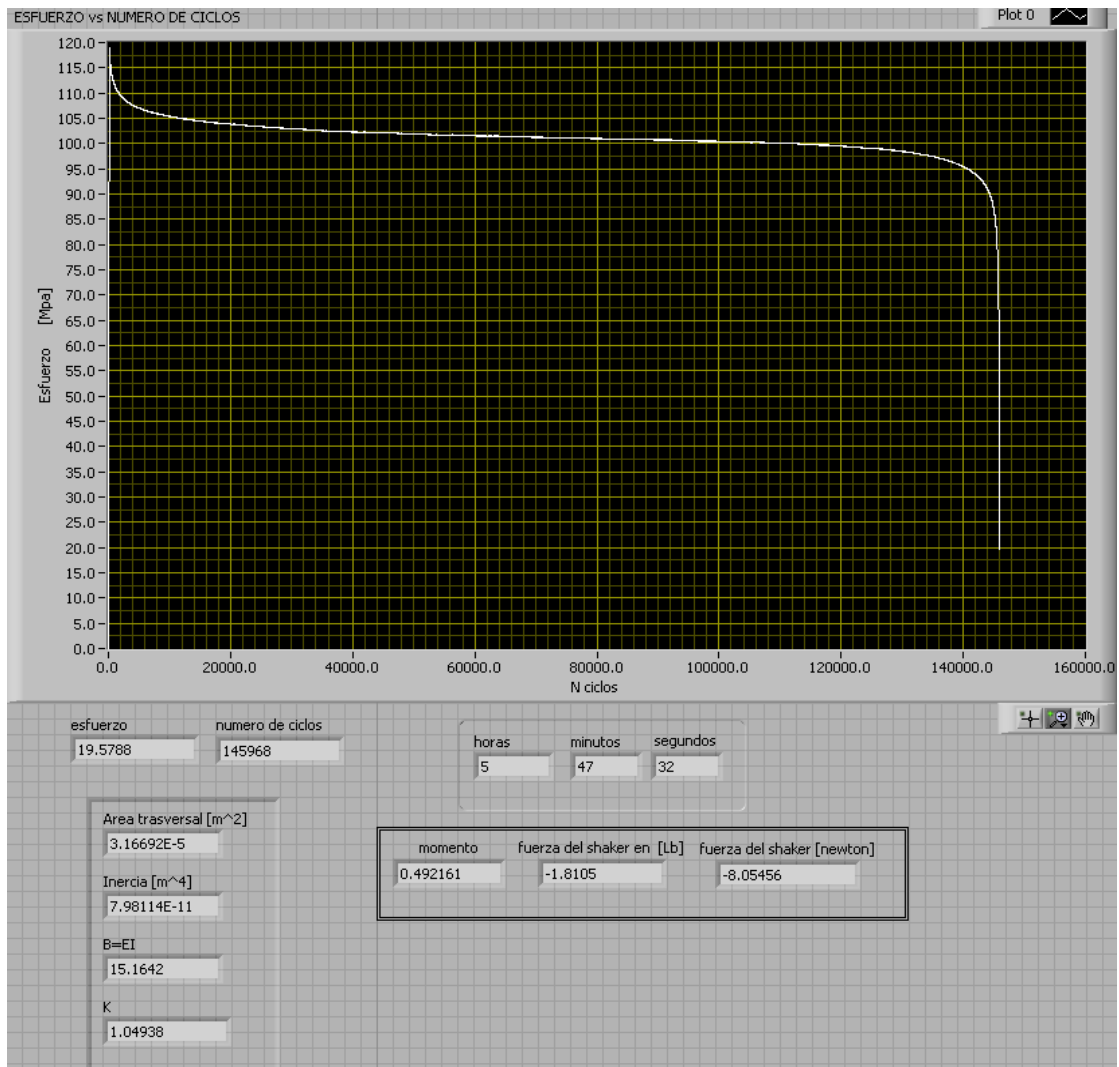
Datos obtenidos prueba 15:

Numero de ciclos = 70691

Esfuerzo promedio= 108.43 Mpa

Desviación estándar = 4.78

✓ Prueba numero 16



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

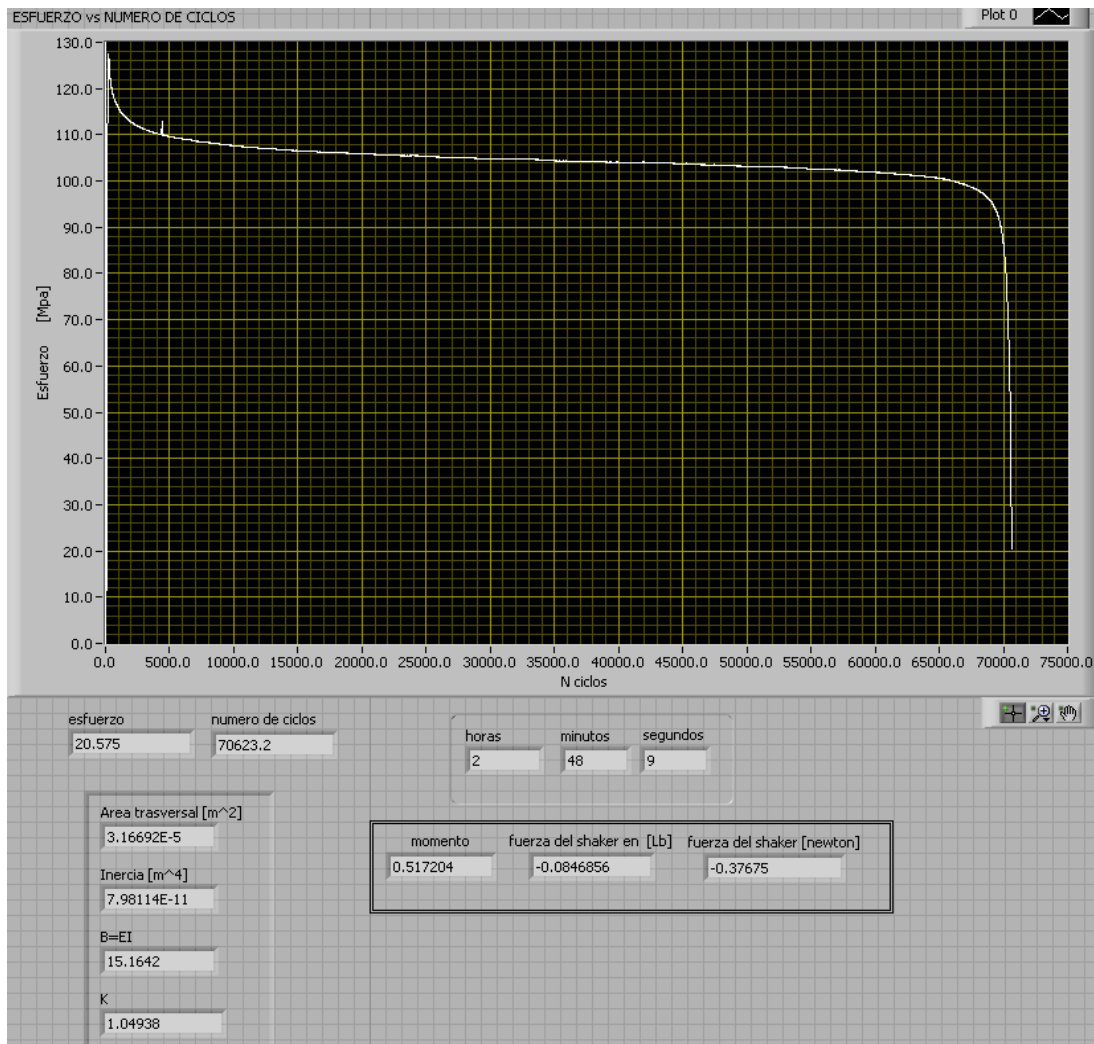
Datos obtenidos prueba 16:

Numero de ciclos = 145967

Esfuerzo promedio= 101.12Mpa

Desviación estándar = 3.81

✓ Prueba numero 17



Autores: Néstor Pérez y Jonathan Forero.

Datos obtenidos prueba 17:

Numero de ciclos = 70623

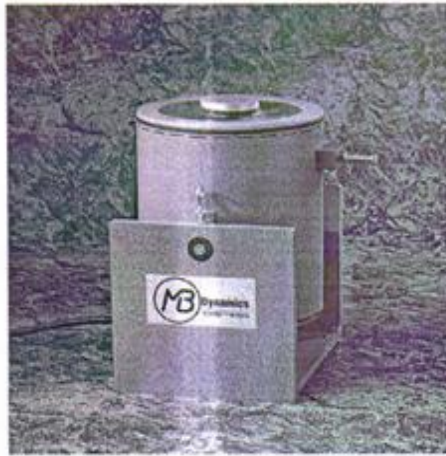
Esfuerzo promedio= 104.37 Mpa

Desviación estándar = 5.14

8.2 ANEXO 2: MANUAL SHAKER



PM-SHAKERS Specifications



MB PM-Series Shakers use *permanent magnet technology* and the voice coil principle to create vibration. These general-purpose shakers are heavy duty, industrial-quality equipment with a proven track record of lasting ten, fifteen, even over twenty years in demanding applications. You can buy "bargain basement" shakers or you can invest in MB PM-Shakers that will provide you with years of dependable, reliable, and consistent testing. Choose from five different sizes – depending on your needs – with maximum sine force ratings of 25, 50, 100, 250 or 500 pounds.

The PM25A, PM50A, and PM100A Shakers all have ½" stroke and a 2.7" diameter mounting table. The PM250HP and PM500HP Shakers each have 2" of stroke and a 4.1" diameter mounting table.



PERFORMANCE RATINGS

** Rated output with forced air cooling; Derate 50% for natural convection cooling*

Description	PM25A	PM50A	PM100A	PM250HP	PM500HP
Force Output	25 pounds Pk*	50 pounds Pk*	100 pounds Pk*	250 pounds Pk*	500 pounds Pk*
Displacement	0.5" Pk-Pk	0.5" Pk-Pk	0.5" Pk-Pk	2" Pk-Pk	2" Pk-Pk
Velocity	70 in/sec Pk	70 in/sec Pk	70 in/sec Pk	60 in/sec Pk	60 in/sec Pk
Acceleration (bare table)	50 g Pk	80 g Pk	106 g Pk	80 g Pk	80 g Pk
Frequency Range	DC-10,000 Hz	DC-10,000 Hz	DC-7000 Hz	DC-3500 Hz	DC-3000 Hz
Cooling	8 scfm @3" H ₂ O	13 scfm @3" H ₂ O	26 scfm @12" H ₂ O	80 scfm @30" H ₂ O	80 scfm @30" H ₂ O
Coil Current & Resistance	4 amps; 2.7 ohms	8.5 amps; 1.3 ohms	8 amps; 2.6 ohms	40 amps; 0.21 ohms	38 amps; 0.5 ohms
Suspension Stiffness	75 lbs/in	75 lbs/in	75 lbs/in	40 lbs/in	40 lbs/in
Stray Field - 1" over center	< 20 gauss	< 7 gauss	< 8 gauss	< 40 gauss	< 20 gauss
DC Centering				Drives 25 lbs to 1" Pk-Pk with 20% force derating	Drives 50 lbs to 1" Pk-Pk with 20% force derating

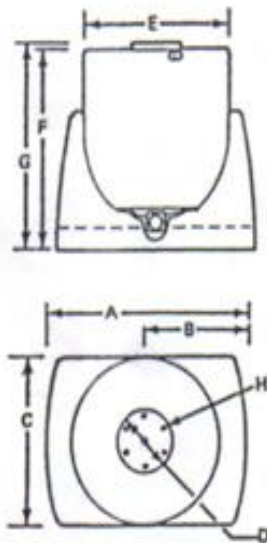
MECHANICAL SPECIFICATIONS

Description	PM25A	PM50A	PM100A	PM250HP	PM500HP
Mounting Surface Bolt Holes	Six 10-32 threaded holes at 60° on 2.25" bolt circle (+ center)	Six 10-32 threaded holes at 60° on 2.25" bolt circle (+ center)	Six 10-32 threaded holes at 60° on 2.25" bolt circle (+ center)	Six 1/4x28 threaded holes at 60° on 3.50" bolt circle (+ center)	Six 1/4x28 threaded holes at 60° on 3.50" bolt circle (+ center)
Moving Element Diam.	2.70"	2.70"	2.70"	4.10"	4.10"
Base Footprint	10" x 7.5"	10" x 7.5"	10" x 7.5"	18" x 14"	18" x 14"
Body Diameter	7"	7"	7"	14 1/2"	14 1/2"
Height (to table top)	7 1/2"	9 1/2"	13 1/2"	17 1/2"	20 1/2"
Moving Element Axial Resonance	8200 Hz	8000 Hz	6000 Hz	3000 Hz	2800 Hz
Weight, Moving Element	0.50 pounds	0.62 pounds	0.94 pounds	2.6 pounds	5.0 pounds
Weight, Exciter	38 pounds	55 pounds	80 pounds	250 pounds	420 pounds
Weight, Base	7 pounds	11 pounds	15 pounds	25 pounds	25 pounds
Base Type	2-position; rigid	2-position; rigid	2-position; rigid	trunnion	trunnion
Trunnion Base	optional	optional	optional	standard	standard
Cooling Connections	0.5" NPT	0.5" NPT	0.5" NPT	2.0" port	2.0" port

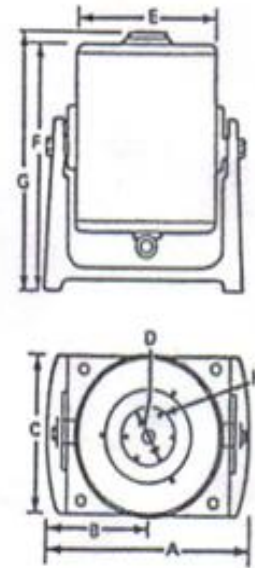
(Drawings & Specifications subject to change without notice 10/11)

DIMENSIONS

**PM SHAKERS
25A / 50A / 100A**



**PM SHAKERS
250HP / 500HP**



Dimensions	A	B	C	D	E	F	G	H	Cooling
PM25A	10"	5"	5 1/2"	2.25"	7-3/8"	7-7/32"	7-15/32"	10-32	1/2" NPT connection for cooling air 8 CFM at 3" H ₂ O
PM50A	10"	5"	7 1/2"	2.25"	7-3/8"	9-7/32"	9-15/32"	10-32	1/2" NPT connection for cooling air 13 CFM at 4" H ₂ O
PM100A	10"	5"	7 1/2"	2.25"	7-3/8"	13-7/32"	13-15/32"	10-32	1/2" NPT connection for cooling air 26 CFM at 12" H ₂ O
PM250HP	18"	9"	14"	3.50"	14 1/2"	16-5/8"	17-3/16"	1/4" - 28	2" connection for cooling air 80 CFM
M500HP	18"	9"	14"	3.50"	14 1/2"	19-3/4"	20-5/16"	1/4" - 28	2" connection for cooling air 80 CFM

(Dimensions subject to change without notice 10/11)

8.3 ANEXO 3: MANUAL FUENTE AMPLIFICADORA MB500VI



MB Series Linear Amplifiers

for use with MB MODAL, ENERGIZER, PM-SERIES, and CAL Shakers

SPECIFICATIONS	MB500VI	MB1000VI
Frequency Range	DC-20,000 Hz, -3 dB Useable to 50kHz at reduced power levels	DC-20,000 Hz, -3 dB
Input Coupling	AC or DC	AC or DC
Feedback Mode	Voltage or Current, switchable with External Toggle Switch	Voltage or Current, switchable with External Toggle Switch
Input Impedance	>10k Ω	>10k Ω
Input Power Requirements	100, 110, 120, 200, 220, 240 VAC; 48-62 Hz	100, 110, 120, 200, 220, 240 VAC; 50/60 Hz
Input Power Required	1,000 VA (max)	2,000 VA (max)
Max. Output Volts	25 V RMS	50 V RMS
Max. Output Amps	20 A RMS (30 A Pk)	20 A RMS (30 A Pk)
Over Current & Voltage Shutdown	User-adjustable trips, external	User-adjustable trips, external
Over Temperature Protection	Yes	Yes
Set-up and Monitor Amplifier from Remote PC	Over LAN or Wireless Link Using MB-supplied GUI	Over LAN or Wireless Link Using MB-supplied GUI
Current measurement	BNC, 250 mV/A; front panel LCD	BNC, 250 mV/A; front panel LCD
Total Harmonic Distortion	< 1.0%	< 1.0%
Dimensions (rack mount)	3 1/2" H (2HE); 19" W (482 mm); 14 1/4" D (362 mm)	7" H (4HE); 19" W (482 mm); 14 1/4" D (362 mm)
Signal In for Full Power Out	± 3 V pk (Factory) (Int. switch: $\pm 1, 3, 5, 10$ Vpk)	± 3 V pk (Factory) (Int. switch: $\pm 1, 3, 5, 10$ Vpk)
Weight or mass	33 lbs (15 kg)	73 lbs. (33 kg)
CE Mark	Yes	Yes
Instruction Manual	Yes	Yes

Specs subject to change without notice



MB500VI Power Amplifier

MB Dynamics Inc - 25865 Richmond Road - Cleveland OH 44146 USA - 216.292.5850 - fax 216.292.5614 - www.mbdynamics.com
©2008. MB Dynamics, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. (11/08)

8.4 ANEXO 4: MANUAL TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE SONIDO Y VIBRACION NI9233

Sound and Vibration Data Acquisition

NI 9233, NI 9234 *NEW!*

- 24-bit resolution
- 102 dB dynamic range
- 4 simultaneous analog inputs
- ± 5 V input range
- Antialiasing filters
- TEDS read/write
- Supported in NI CompactDAQ, CompactRIO, and Hi-Speed USB carrier

Recommended Software

- LabVIEW
- LabVIEW Sound and Vibration Toolkit
- Sound and Vibration Measurement Suite



Model	Max Sampling Rate	IEPE	Coupling
NI 9233	50 kS/s	Always enabled (2 mA)	AC coupling
NI 9234	51.2 kS/s	Software selectable (0 or 2 mA)	Software selectable AC/DC coupling

Table 1. C-Series Dynamic Signal Acquisition Selection Guide

Overview

The National Instruments 9233 and 9234 are four-channel dynamic signal acquisition modules for making high-accuracy measurements from IEPE sensors. The NI 9233 and 9234 C-Series analog input modules deliver 102 dB of dynamic range and incorporate IEPE (2 mA constant current) signal conditioning for accelerometers and microphones. The four input channels simultaneously acquire at rates from 2 to 50 kHz or, with the NI 9234, up to 51.2 kS/s. In addition, the modules include built-in antialiasing filters that automatically adjust to your sampling rate. Compatible with a single-module USB carrier and NI CompactDAQ and CompactRIO hardware, the NI 9233 and 9234 are ideal for a wide variety of mobile/portable applications such as industrial machine condition monitoring and in-vehicle noise, vibration, and harshness testing.

Hardware

Analysis Capabilities
 Power spectra
 Zero-FFTs
 Fractional-order analysis
 Vibration level measurements
 Order spectra
 Bandwidth analysis

Each simultaneous signal is buffered, analog prefiltered, and sampled by a 24-bit delta-sigma analog-to-digital converter (ADC) that performs digital filtering with a cutoff frequency that automatically adjusts to your data rate. The NI 9233 and 9234 feature a voltage range of ± 5 V and a dynamic range of more than 100 dB. In addition, the modules include the capability to read and write to transducer electronic data sheet (TEDS) Class 1 smart sensors. The NI 9233 and 9234 provide ± 30 V of

overvoltage protection (with respect to chassis ground) for IEPE sensor connections. The NI 9234 has three software-selectable modes of measurement operation: IEPE-on with AC coupling, IEPE-off with AC coupling, and IEPE-off with DC coupling. IEPE excitation and AC coupling are not software-selectable and are always enabled for the NI 9233.

The NI 9233 and 9234 use a method of A/D conversion known as delta-sigma modulation. If, for example, the data rate is 25 kS/s, then each ADC actually samples its input signal at 3.2 MS/s (128 times the data rate) and produces samples that are applied to a digital filter. This filter then expands the data to 24 bits, rejects signal components greater than 12.5 kHz (the Nyquist frequency), and digitally resamples the data at the chosen data rate of 25 kS/s. This combination of analog and digital filtering provides an accurate representation of desirable signals while rejecting out-of-band signals. The built-in antialiasing filters automatically adjust themselves to discriminate between signals based on the frequency range, or bandwidth, of the signal.

Sound and Vibration Data Acquisition

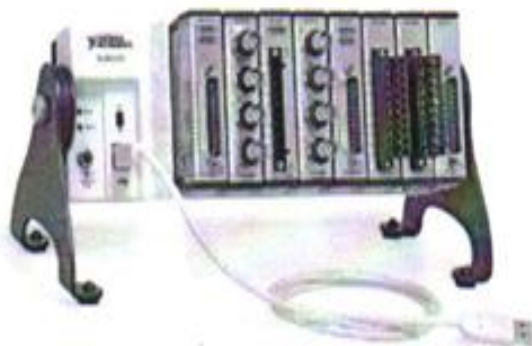
USB Platform

The NI Hi-Speed USB carrier makes portable data acquisition easy. Simply plug the NI 9233 or 9234 into the USB carrier and begin acquiring data. Communication to the USB carrier is over Hi-Speed USB, guaranteeing data throughput.



NI CompactDAQ Platform

NI CompactDAQ delivers the simplicity of USB to sensor and electrical measurements on the benchtop, in the field, and on the production line. By combining the ease of use and low cost of a data logger with the performance and flexibility of modular instrumentation, NI CompactDAQ offers fast, accurate measurements in a small, simple, and affordable system. Flexible software options make it easy to use NI CompactDAQ to log data for simple experiments or to develop a fully automated test or control system. The modular design can measure up to 256 channels of electrical, physical, mechanical, or acoustical signals in a single system. In addition, per-channel ADCs and individually isolated modules ensure fast, accurate, and safe measurements.



NI CompactRIO Platform

When used with the small, rugged CompactRIO embedded control and data acquisition system, NI C Series analog input modules connect directly to reconfigurable I/O (RIO) field-programmable gate array (FPGA) hardware to create high-performance embedded systems. The reconfigurable FPGA hardware within CompactRIO provides a variety of options for custom timing, triggering, synchronization, filtering, signal processing, and high-speed decision making for all C Series analog input modules. For instance, with CompactRIO, you can implement custom triggering for any analog sensor type on a per-channel basis using the flexibility and performance of the FPGA and the numerous arithmetic and comparison function blocks built into NI LabVIEW FPGA.



Sound and Vibration Data Acquisition

Analysis Software

The NI 9233 and 9234 are well-suited for noise and vibration analysis applications. The NI Sound and Vibration Measurement Suite, which specifically addresses these applications, has two components: the NI Sound and Vibration Assistant and LabVIEW analysis VIs (functions) for power spectra, frequency response (FRF), fractional octave analysis, sound-level measurements, order spectra, order maps, order extraction, sensor calibration, human vibration filters, and torsional vibration.

NI Sound and Vibration Assistant

The Sound and Vibration Assistant is interactive software designed to simplify the process of acquiring and analyzing noise and vibration signals by offering:

- A drag-and-drop, interactive analysis and acquisition environment
- Rapid measurement configuration
- Extended functionality through LabVIEW

Interactive Analysis Environment

The Sound and Vibration Assistant introduces an innovative approach to configuring your measurements using intuitive drag-and-drop steps. Combining the functionality of traditional noise and vibration analysis software with the flexibility to customize and automate routines, the Sound and Vibration Assistant can help you streamline your application.

Rapid Measurement Configuration

There are many built-in steps available for immediate use in the Sound and Vibration Assistant. You can instantly configure a measurement and analysis application with:

- Hardware I/O – generation and acquisition of signals from a variety of devices, including data acquisition devices and modular instruments
- Signal processing – filtering, windowing, and averaging
- Time-domain analysis – sound- and vibration-level measurements
- ANSI and IEC fractional-octave analysis
- Frequency-domain analysis – power spectrum, frequency response, power-in-band, peak search, and distortion
- Order analysis – tachometer processing, order power spectrum, order tracking, and order extraction
- Report generation – ability to drag and drop signals to Microsoft Excel or export data to Microsoft Word or UFF58 files

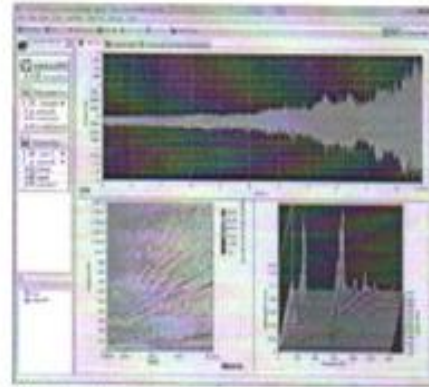


Figure 1. NI Sound and Vibration Assistant Performing Engine Run-up Test

Extended Functionality through LabVIEW

Reuse your measurement applications developed with the Sound and Vibration Assistant in LabVIEW by converting projects into LabVIEW block diagrams. With the LabVIEW full-featured graphical programming environment, you can further automate your application or customize your analysis.

Sound and Vibration Analysis VIs for LabVIEW

With the sound and vibration analysis VIs in LabVIEW, you can develop a variety of custom audio, acoustic, and vibration applications. Functionality includes:

Functionality includes:

- Full, 1/3, 1/6, 1/12, and 1/24 octave analysis with linear A, B, or C weighting
- Baseband, zoom, and subset power spectrum
- Peak search and Power in band
- Frequency response (FRF)
- Filtering
- Swept sine
- Distortion analysis (THD, THD+N, IMD)
- Noise measurements (SNR)
- Human vibration weighting filters
- Torsional vibration
- Tachometer signal processing
- Order tracking, spectrum, and Order extraction
- Waterfall display for power, octave, and order spectra
- Shaft centerline, orbit, Bode, and polar plot format
- File input and output to UFF58

Sound and Vibration Data Acquisition

Recommended Hardware

The Sound and Vibration Measurement Suite includes more than 50 examples that work with both dynamic signal acquisition (DSA) and multifunction data acquisition devices. For sound and vibration data acquisition, National Instruments recommends DSA devices. With 24-bit ADCs and digital-to-analog converters (DACs) and integrated antialiasing filters, DSA devices are ideal for acoustic, noise, and vibration measurements.

There are numerous system requirements to consider when selecting data acquisition hardware for measuring or generating sound and vibration signals. From IEPE signal conditioning for accelerometers and microphones to high dynamic range (up to 118 dB) and multichannel synchronization (up to 13,000 channels), National Instruments offers a wide range of hardware products for your applications.

Product	Bus	Input Resolution (bits)	Dynamic Range (dB)	Sampling Rate per Channel	Analog Inputs	Input Range	Gain Settings	Coupling	TEDS Support	Analog Outputs
High Performance										
NI 4461	PXI, PCI	24	118	204.8 kS/s	2	±42 V to 316 mV	-20 to 30 dB in 10 dB increments	AC/DC	✓	2
NI 4462	PXI, PCI	24	118	204.8 kS/s	4	±42 V to 316 mV	-20 to 30 dB in 10 dB increments	AC/DC	✓	-
High Density										
NI 4495	PXI	24	114	204.8 kS/s	16	±10 to 1 V	0 to 20 dB	DC	-	-
NI 4496	PXI	24	114	204.8 kS/s	16	±10 to 1 V	0 to 20 dB	AC	✓	-
NI 4498	PXI	24	114	204.8 kS/s	16	±10 V to 316 mV	0 to 20 dB	AC	✓	-
Low Cost										
NI 4472	PXI, PCI	24	110	102.4 kS/s	8	±10 V	-	AC/DC	-	-
NI 4474	PCI	24	110	102.4 kS/s	4	±10 V	-	AC/DC	-	-
Ultraportable										
NI 9233	USB	24	102	50 kS/s	4	±5 V	-	AC	✓	-
NI 9234	USB	24	102	51.2 kS/s	4	±5 V	-	AC/DC	✓	-

Table 2. Additional NI Dynamic Signal Acquisition Devices

Ordering Information

NI 9233	779015-01
NI 9233 with Sound and Vibration Measurement Suite	779015-02
NI USB-9233 with USB carrier	779365-01
NI USB-9233 with Sound and Vibration Measurement Suite	779366-01
NI 9234	779680-01
NI 9234 with Sound and Vibration Measurement Suite	779680-02
NI USB-9234	780235-01
NI USB-9234 with Sound and Vibration Measurement Suite	780235-02

BUY NOW!

For complete product specifications, pricing, and accessory information, call 800 813 3693 (U.S.) or go to ni.com/soundandvibration.

Sound and Vibration Data Acquisition

NI 9233 Specifications

» For complete specifications, see the **NI 9233 Operating Instructions and Specifications** at ni.com/manuals.

The following specifications are typical for the range 0 to 60 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics

Number of channels	4 analog input
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-sigma (with analog prefiltering)
Data rate (fs)	
Minimum	2 kS/s
Maximum	50 kS/s
Master timebase (internal)	
Frequency	12.8 MHz
Accuracy	±100 ppm max
Input coupling	AC
AC cutoff frequency	
-3 dB	0.5 Hz typ
-0.1 dB	4.2 Hz max
AC voltage full-scale range	
Typical	5.4 V _{pk}
Minimum	5 V _{pk}
Maximum	5.8 V _{pk}
Common-mode voltage (AI- to earth ground)	±2 V
IEPE excitation current	
Minimum	2.0 mA
Typical	2.2 mA
IEPE compliance voltage	19 V max
Overvoltage protection (with respect to chassis ground)	
For an IEPE sensor connected to AI+ and AI-	±30 V
For a low-impedance source connected to AI+ and AI-	-6 to 30 V

Accuracy (0 to 60 °C)

Error	Accuracy
Calibrated max	±0.3 dB
Calibrated typ	±0.1 dB
Uncalibrated max	±0.5 dB

NI 9234 Specifications

» For complete specifications, see the **NI 9234 Specifications** at ni.com/manuals.

The following specifications are typical for the range 0 to 60 °C unless otherwise noted.

Input Characteristics

Number of channels	4 analog input
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-sigma (with analog prefiltering)
Data rate (fs)	
Minimum	1.65 kS/s
Maximum	51.2 kS/s
Master timebase (internal)	
Frequency	13.1 MHz
Accuracy	±50 ppm max
Input coupling	Software-selectable AC/DC
AC cutoff frequency	
-3 dB	0.5 Hz typ
-0.1 dB	4.6 Hz max
AC voltage full-scale range	
Typical	5.1 V _{pk}
Minimum	5 V _{pk}
Maximum	5.2 V _{pk}
Common-mode voltage (AI- to earth ground)	±2 V
IEPE excitation current	
Minimum	2.0 mA
Typical	2.1 mA
IEPE compliance voltage	19 V max
Overvoltage protection (with respect to chassis ground)	
For an IEPE sensor connected to AI+ and AI-	±30 V
For a low-impedance source connected to AI+ and AI-	-6 to 30 V

Accuracy (0 to 60 °C)

Error	Accuracy
Calibrated max	±0.3 dB
Calibrated typ	±0.002 dB
Uncalibrated max	±0.16 dB

8.5 ANEXO 5: MANUAL TARJETA DE GENERACION DE DATOS NI9263



Technical Sales
United States
(866) 531-6285
orders@ni.com

NI USB-9263

10 V Analog Output Module

- NI-DAQmx driver software and NI LabVIEW SignalExpress LE interactive data-logging software
- 16-bit resolution
- NIST-traceable calibration
- 4 simultaneously updated analog outputs



Overview

The NI USB-9263 is a four-channel analog output device with an update rate of 100 kS/s per channel. The USB-9263 kit includes the NI 9263 C Series module, the NI USB-9162 C Series module carrier, a USB cable, and a driver kit.

You can program the USB-9263 with the included NI-DAQmx API for use with NI LabVIEW or text-based programming languages such as NI LabWindows/CVI, ANSI C, C++, C#, Visual Basic 6.0, and .NET.

LabVIEW SignalExpress LE data-logging software is included with all NI-DAQmx hardware from National Instruments. Use this software to begin taking interactive measurements right out of the box.

The mark LabWindows is used under a license from Microsoft Corporation. Windows is a registered trademark of Microsoft Corporation in the United States and other countries.

Specifications

Specifications Documents

- Detailed Specifications

Specifications Summary

General

Form Factor	USB
Operating System / Target	Windows
Measurement Type	Voltage
Isolation Type	Ch-Earth Ground Isolation

Analog Input

Number of Channels	0
Analog Output	
Number of Channels	4
Update Rate	100 kS/s
Resolution	16 bits
Maximum Voltage Range	-10..10 V
Range Accuracy	.02247 V
Current Drive (Channel/Total)	1 mA/4 mA
Digital I/O	
Number of Channels	0
Counter/Timers	
Number of Counter/Timers	0

8.6 ANEXO 6: MANUAL SENSOR DE FUERZA PCB 208C02



Model 208C02
ICP® Dynamic Force Sensor
Installation and Operating Manual

For assistance with the operation of this product , contact the Division of PCB Piezotronics, Inc.

Division toll-free 888-684-0015
24-hour SensorLineSM 716-684-0001
Fax 716-684-8877
E-mail force@pcb.com



mounting studs (M081B05—for metric installation) are supplied.

Versions offering full-scale measurement ranges of 10 lb to 5000 lb compression (45 to 22k N) and 500 lb (2,200 N) tension are available. For higher ranges, consider the dedicated ring, link, or impact style sensor configurations.

Applications include matrix print-head studies, drop testing, machinery studies, punching and forming operations, tensile testing, fatigue testing, fracture analysis, and materials testing.

RINGS

Series 201B to 207C Ring Sensors are designed to measure compression forces from 10 lbs to 100,000 lbs (44.48 N to 444.8k N).

Each sensor is provided with a calibration certificate reflecting the sensitivity of the sensor using the supplied mounting stud. If the supplied stud cannot be used for installation, PCB can provide a custom calibration using the desired bolt for accurate sensitivity readings. Using a different mounting stud will result in a sensitivity that differs from the original calibration. Refer to Section 3 for recommended force ring mounting and preload requirements.

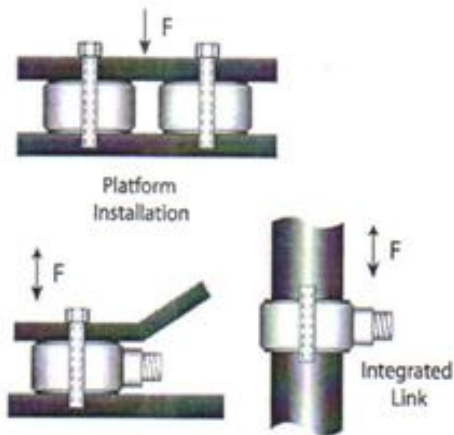


Figure 4 - Series 201 to 207 ICP® Ring Force Sensor

GENERAL PURPOSE - RADIAL

Model 208C01-C05 General Purpose Sensors are designed to measure compression and impact forces from 10 lbs to 5,000 lbs (44.48 N to 22.24 kN). Tension forces can be measured to 500 lbs. (2.224 kN). Model 084A03, a convex, stainless steel cap with integral 10-32 mounting stud is supplied for impact measurements. Polyimide film tape covers the cap surface to

reduce high frequency ringing associated with metal-to-metal impacts.

GENERAL PURPOSE - AXIAL

Models 208A11-A15 Axial Sensors provide performance and possess specifications similar to the Model 208C Sensors. These sensors are designed primarily to measure compressive and impact forces from 10 lbs to 5,000 lbs (44.48 N to 22.24 kN). Tensile forces can be measured to 500 lbs (2.224 kN). The 10-32 axial electrical connector orientation associated with these sensors makes them ideal for installations where radial space is restricted or where physical connector damage may occur due to the nature of the specific application. The M7 x 0.75-6g mounting threads may be installed directly into test structure so that the 10-32 electrical connector exits from the opposite side of the mounting fixture to prevent potential damage. This version also uses the Model 084A03 cap for impact measurements.

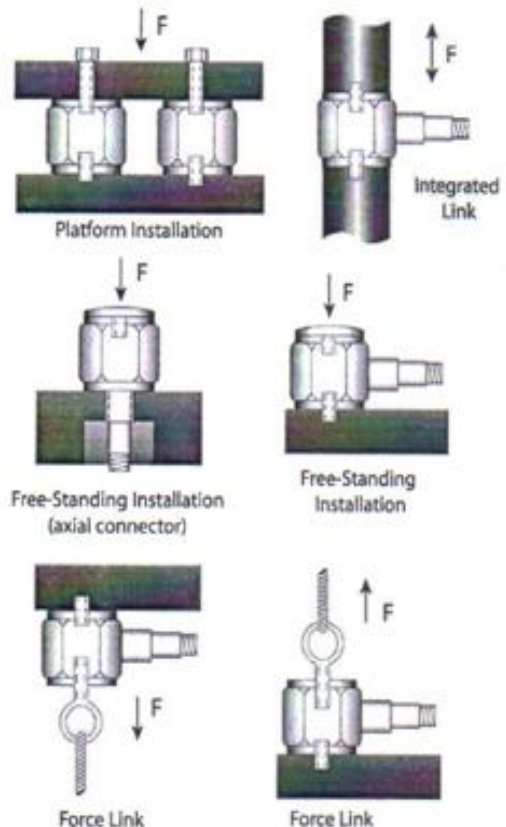


Figure 5 - Series 208 General Purpose ICP® Force Sensor

1.0 INTRODUCTION

ICP® force sensors incorporate a built-in MOSFET microelectronic amplifier. This serves to convert the high impedance charge output into a low impedance voltage signal for analysis or recording. ICP® sensors, powered from a separate constant current source, operate over long ordinary coaxial or ribbon cable without signal degradation. The low impedance voltage signal is not affected by triboelectric cable noise or environmental contaminants.

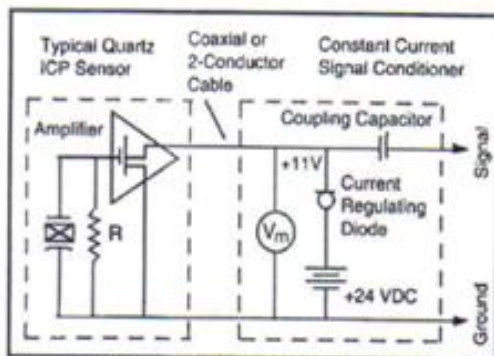


Figure 1 - ICP® Sensor System Schematic

Power to operate ICP® sensors is generally in the form of a low cost, 24-27 VDC, 2-20 mA constant current supply. Figure 1 schematically illustrates a typical ICP® sensor system. PCB offers a number of AC or battery-powered, single or multi-channel power/signal conditioners, with or without gain capabilities for use with force sensors. (See Related Products Section of this catalog for available models.) In addition, many data acquisition systems now incorporate constant current power for directly powering ICP® sensors. Because static calibration or quasi-static short-term response lasting up to a few seconds is often required, PCB manufactures signal conditioners that provide DC coupling. Figure 2 summarizes a complete 2-wire ICP® system configuration.

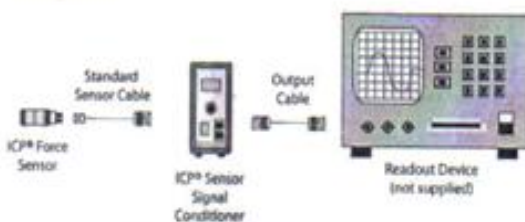


Figure 2 Typical ICP® Sensor System

In addition to ease of operation, ICP® force sensors offer significant advantages over charge mode types. Because of the low impedance output and solid-state, hermetic construction,

ICP® force sensors are well suited for continuous, unattended force monitoring in harsh factory environments. Also, ICP® sensor cost-per-channel is substantially lower, since they operate through standard, low-cost coaxial cable, and do not require expensive charge amplifiers.

Refer to the installation/outline drawing and specification sheet at the front of this manual for details and dimensions of the particular sensor model number(s) purchased. The following pages give a brief description of the various sensor series available, recommended mounting procedures, operation and recommended calibration.

Charge mode versions with high output impedance are also available for higher temperature applications. These models can also be used for applications where it is desirable to manually set the output range. In addition to standard products, PCB has the ability to design and manufacture custom sensors/systems for specific applications.

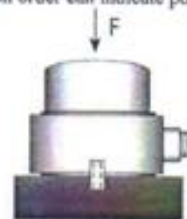
If questions arise regarding the operation or characteristics of the force sensor products as outlined in this manual, feel free to contact an experienced applications engineer from the Force/Torque Division of PCB toll-free 888-684-0004.

2.0 DESCRIPTION

IMPACT

Series 200 Impact Sensors are designed to measure compression and impact forces from 10 lbs to 50,000 lbs (44.48 N to 22.4 kN). The flat sensing surface is located on the top of the sensor and is designed to measure force as it is applied axially to the sensor.

As highlighted in Figure 3 compression forces directed against the sensing surface produce a positive-going output. This force-directed input and corresponding output apply to all charge mode sensors. If desired, adding the prefix "N" to a model number upon order can indicate polarity reversal.



Free Standing Impact Installation
Figure 3 - Series 200 ICP® Impact Sensor

Polyimide film tape covers the cap surface to reduce high frequency ringing associated with metal-to-metal impacts. Internal mounting holes with uniform 10-32 threads are prepared on each end of the sensor. Two Model 081B05-

Materials Authorization (RMA) Number. This RMA number should be clearly marked on the outside of all package(s) and on the packing list(s) accompanying the shipment. A detailed account of the nature of the problem(s) being experienced with the equipment should also be included inside the package(s) containing any returned materials.

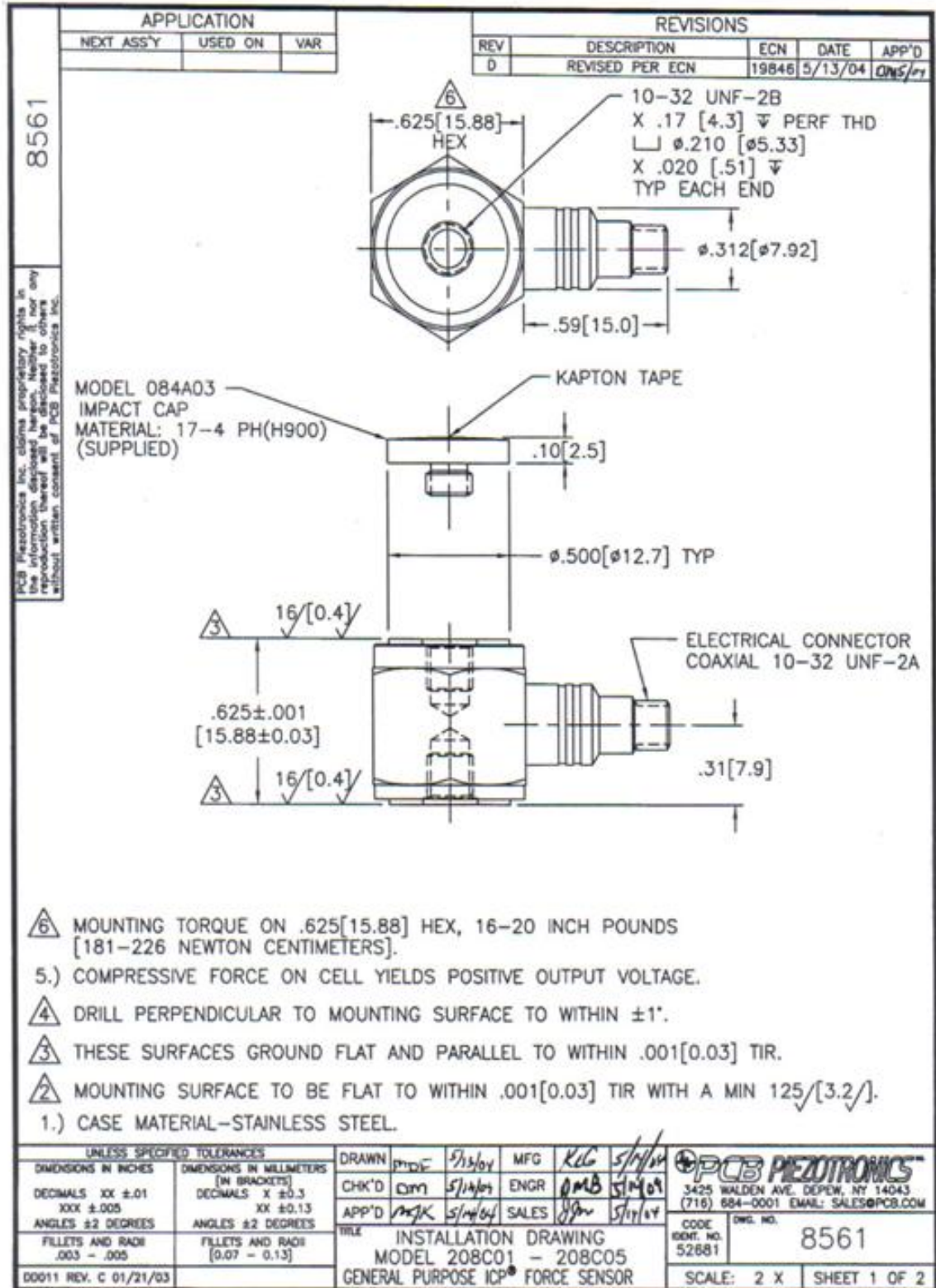
A Purchase Order, included with the returned materials, will expedite the turn-around of serviced equipment. It is recommended to include authorization on the Purchase Order for PCB to proceed with any repairs, as long as they do not exceed 50% of the replacement cost of the returned item(s). PCB will provide a price quotation or replacement recommendation for any item whose repair costs would exceed 50% of replacement cost, or any item that is not economically feasible to repair. For routine calibration services, the Purchase Order should include authorization to proceed and return at current pricing, which can be obtained from a factory customer service representative.

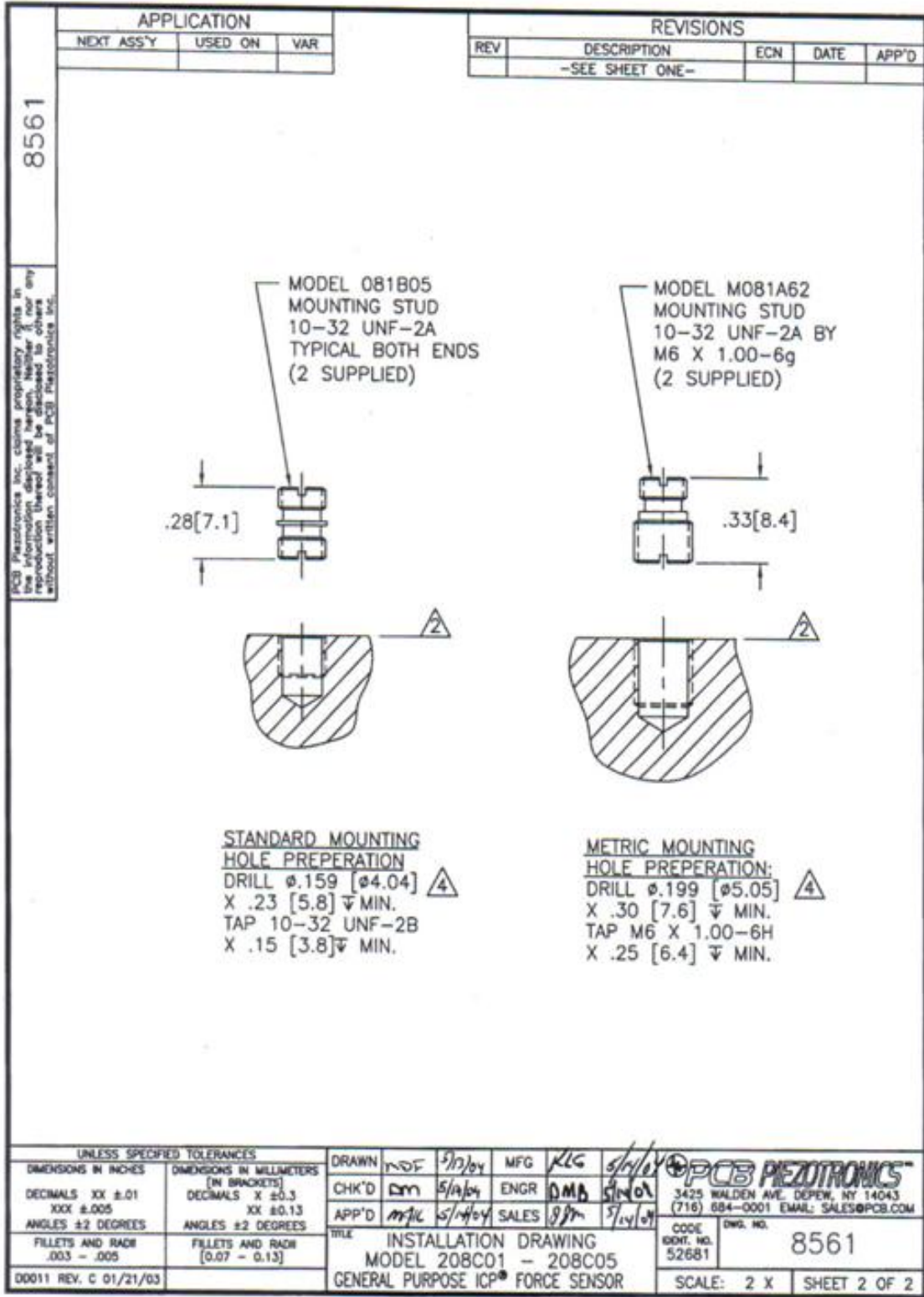
Warranty – All equipment and repair services provided by PCB Piezotronics, Inc. are covered by a limited warranty against defective material and workmanship for a period of one year from date of original purchase. Contact

PCB for a complete statement of our warranty. Expendable items, such as batteries and mounting hardware, are not covered by warranty. Mechanical damage to equipment due to improper use is not covered by warranty. Electronic circuitry failure caused by the introduction of unregulated or improper excitation power or electrostatic discharge is not covered by warranty.

Contact Information – International customers should direct all inquiries to their local distributor or sales office. A complete list of distributors and offices can be found at www.pcb.com. Customers within the United States may contact their local sales representative or a factory customer service representative. A complete list of sales representatives can be found at www.pcb.com. Toll-free telephone numbers for a factory customer service representative, in the division responsible for this product, can be found on the title page at the front of this manual. Our ship to address and general contact numbers are:

PCB Piezotronics, Inc.
3425 Walden Ave.
Depew, NY 14043 USA
Toll-free: (800) 828-8840
24-hour SensorLineSM: (716) 684-0001
Website: www.pcb.com
E-mail: info@pcb.com





8561

PCB Piezotronics Inc. claims proprietary rights in the information displayed herein. Neither it nor any reproduction thereof will be disclosed to others without written consent of PCB Piezotronics Inc.

8.7 ANEXO 7: MANUAL SENSOR DE ACELERACION PCB 352C34



PCB PIEZOTRONICS™

Model 352C34

Product Type: Accelerometer, Vibration Sensor

High sensitivity, ceramic shear ICP® accel., 100 mV/g, 0.5 Hz to 10k Hz, 10-32 top conn.

[View Spec Sheet \(PDF\)](#)

[View photo and drawing .](#)

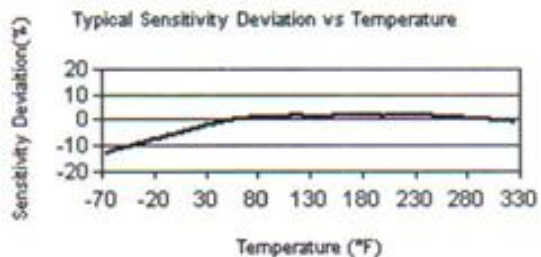
PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Sensitivity(± 10 %)	100 mV/g	10.2 mV/(m/s ²)
Measurement Range	± 50 g pk	± 490 m/s ² pk
Frequency Range(± 5 %)	0.5 to 10,000 Hz	0.5 to 10,000 Hz
Frequency Range(± 10 %)	0.3 to 15,000 Hz	0.3 to 15,000 Hz
Resonant Frequency	≥ 50 kHz	≥ 50 kHz
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.00015 g rms	0.0015 m/s ² rms [1]
Non-Linearity	≤ 1 %	≤ 1 % [4]
Transverse Sensitivity	≤ 5 %	≤ 5 %
ENVIRONMENTAL		
Overload Limit(Shock)	± 5000 g pk	± 49,000 m/s ² pk
Temperature Range(Operating)	-65 to +200 °F	-54 to +93 °C [3]
Temperature Response	See Graph	See Graph [1]
Base Strain Sensitivity	0.003 g/με	0.029 (m/s ²)/με [1]
ELECTRICAL		
Excitation Voltage	18 to 30 VDC	18 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	≤ 200 ohm	≤ 200 ohm
Output Bias Voltage	7 to 12 VDC	7 to 12 VDC
Discharge Time Constant	1.0 to 2.5 sec	1.0 to 2.5 sec
Settling Time(within 10% of bias)	<10 sec	<10 sec
Spectral Noise(1 Hz)	39 μg/√Hz	380 (μm/sec ²)/√Hz [1]
Spectral Noise(10 Hz)	11 μg/√Hz	110 (μm/sec ²)/√Hz [1]
Spectral Noise(100 Hz)	3.4 μg/√Hz	33 (μm/sec ²)/√Hz [1]
Spectral Noise(1 kHz)	1.4 μg/√Hz	14 (μm/sec ²)/√Hz [1]
PHYSICAL		
Sensing Element	Ceramic	Ceramic
Sensing Geometry	Shear	Shear
Housing Material	Titanium	Titanium
Sealing	Hermetic	Hermetic
Size (Hex x Height)	0.44 in x 0.88 in	11.2 mm x 22.4 mm
Weight	0.20 oz	5.8 gm [1]
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Electrical Connection Position	Top	Top
Mounting Thread	10-32 Female	10-32 Female
Mounting Torque	10 to 20 in-lb	113 to 226 N-cm
SUPPLIED ACCESSORIES:		
Model 090A Adhesive Mounting Base (1)		
Model 080A109 Petro Wax (1)		
Model 081B05 Mounting Stud (10-32 to 10-32) (1)		
Model ACS-1 NIST traceable frequency response (10 Hz to upper 5% point).		
Model M081B05 Mounting Stud 10-32 to M6 X 0.75 (1)		
OPTIONAL VERSIONS		
HT- High temperature, extends normal operation temperatures		
Frequency Range(5 %)	6 to 10,000 Hz	6 to 10,000
Frequency Range(10 %)	4.5 to 15,000 Hz	4.5 to 15,000
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.0009 g rms	0.009 m/s ² rms
Temperature Range(Operating)	-65 to +325 °F	-54 to +163 °C
Excitation Voltage	22 to 30 VDC	
Discharge Time Constant	0.07 to 0.15 sec	
Spectral Noise(1 Hz)	107 μg/√Hz	1050 (μm/sec ²)/√Hz
Spectral Noise(10 Hz)	58 μg/√Hz	570 (μm/sec ²)/√Hz
Spectral Noise(100 Hz)	41 μg/√Hz	400 (μm/sec ²)/√Hz
Spectral Noise(1 kHz)	9.8 μg/√Hz	96 (μm/sec ²)/√Hz
Output Bias Voltage	10 to 15 VDC [2]	
Supplied Accessory : Model ACS-68 Single Axis Amplitude Response Calibration from 5 Hz to upper 5% plotted on dB scale replaces Model ACS-1		
J- Ground Isolated		
Frequency Range(5 %)	0.5 to 9000 Hz	0.5 to 9000 Hz
Frequency Range(10 %)	0.3 to 14,000 Hz	0.3 to 14,000 Hz
Resonant Frequency	≥ 40 kHz	≥ 40 kHz

Electrical Isolation(Base)	>10 ⁸ ohm	
Size - Hex x Height	0.44 in x 0.93 in	11.2 mm x 23.6 mm
Weight	0.21 oz	6.0 gm
T- TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE P1451.4		
Temperature Range(Memory Access)	-10 to +200 °F	-23 to +93 °C
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	
TLA- TEDS LMS International - Free Format		
Temperature Range(Memory Access)	-10 to +200 °F	-23 to +93 °C
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	
TLB- TEDS LMS International - Automotive Format		
Temperature Range(Memory Access)	-10 to +200 °F	-23 to +93 °C
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	
TLC- TEDS LMS International - Aeronautical Format		
Temperature Range(Memory Access)	-10 to +200 °F	-23 to +93 °C
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	
TLD- TEDS Capable of Digital Memory and Communication Compliant with IEEE 1451.4		
Temperature Range(Memory Access)	-10 to +200 °F	-23 to +93 °C
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	
Output Bias Voltage	7.5 to 13 VDC	
W- Water Resistant Cable		
Electrical Connector	Sealed Integral Cable	
Electrical Connection Position	Top	

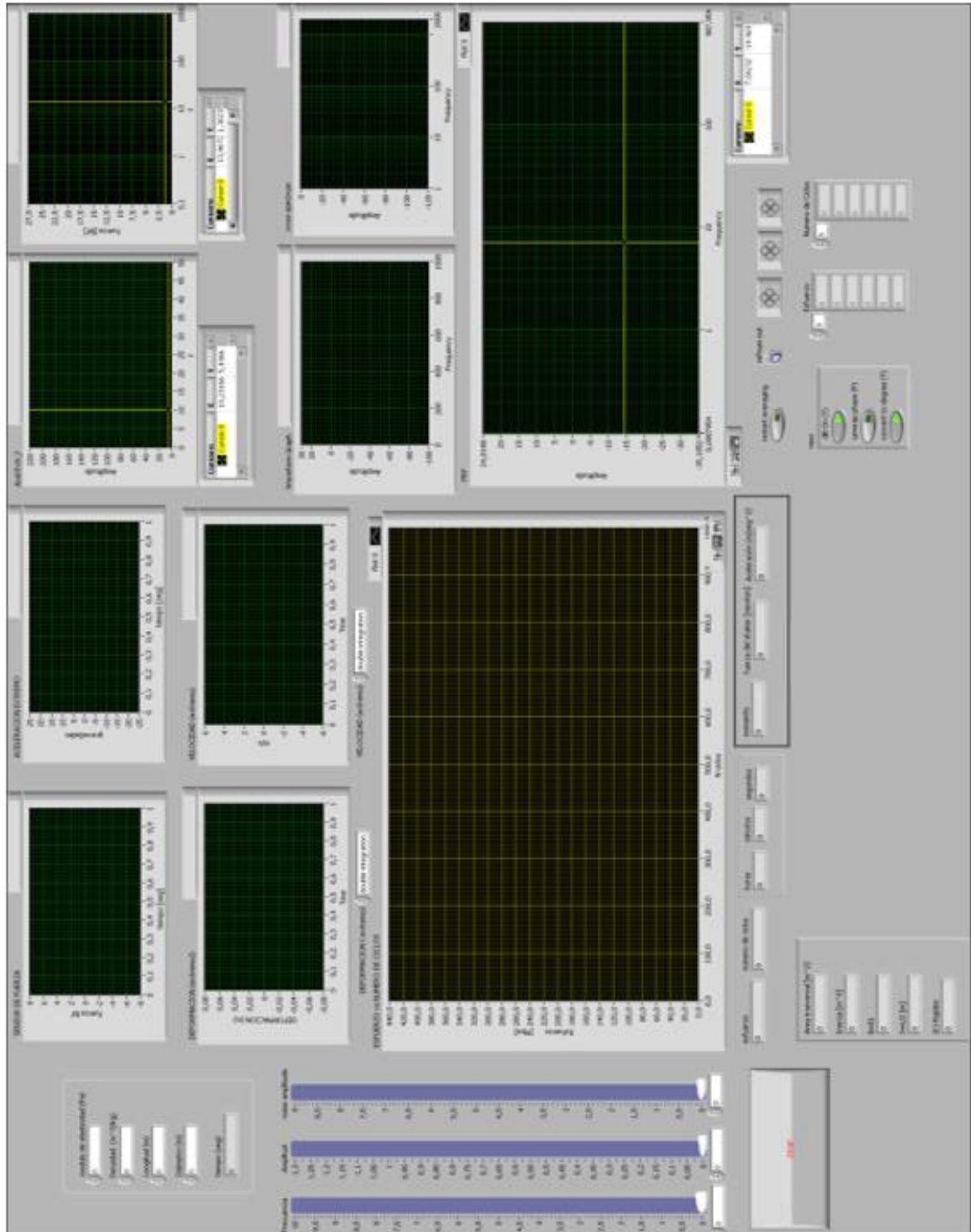
All specifications are at room temperature unless otherwise specified.

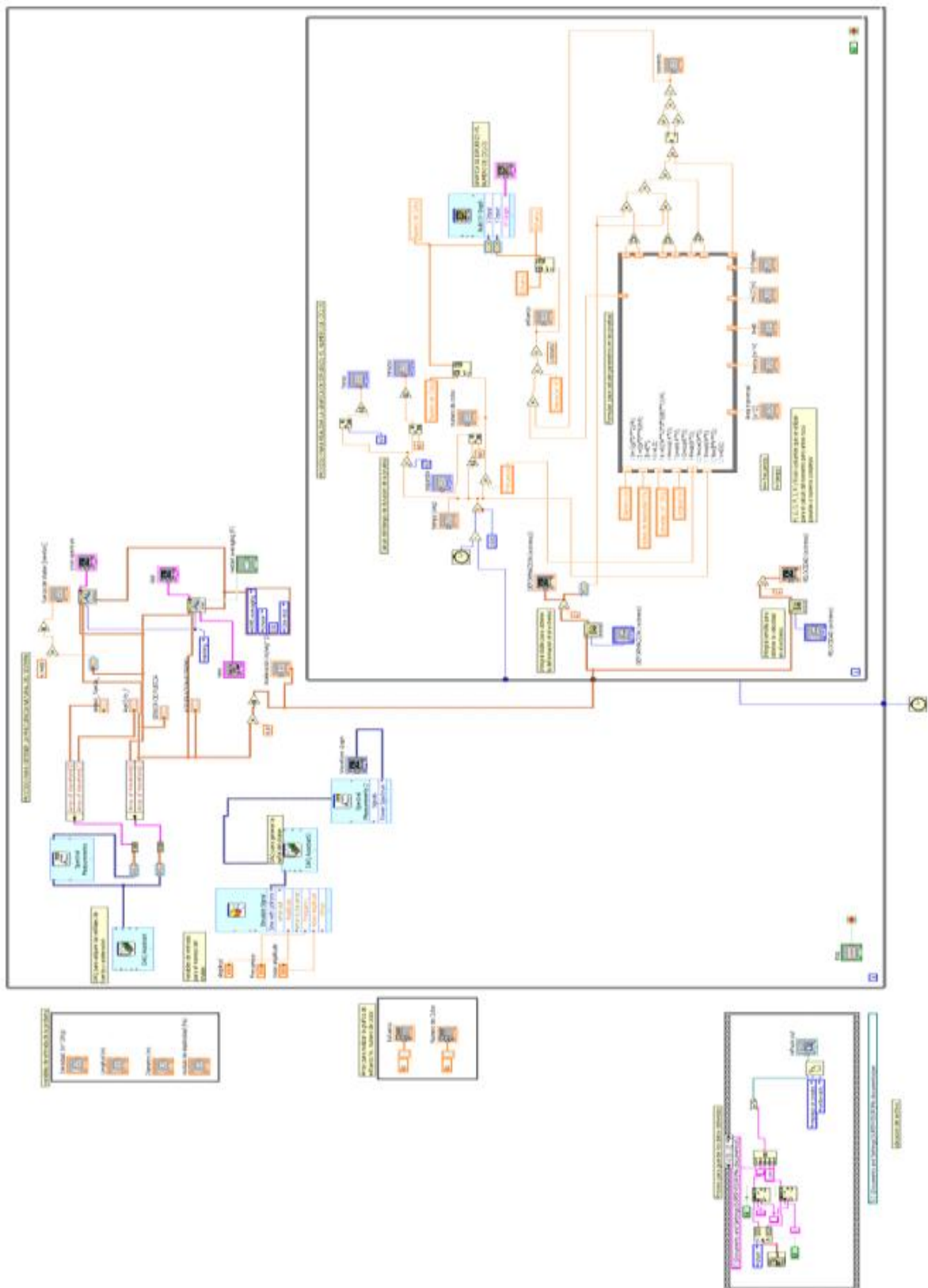
NOTES:

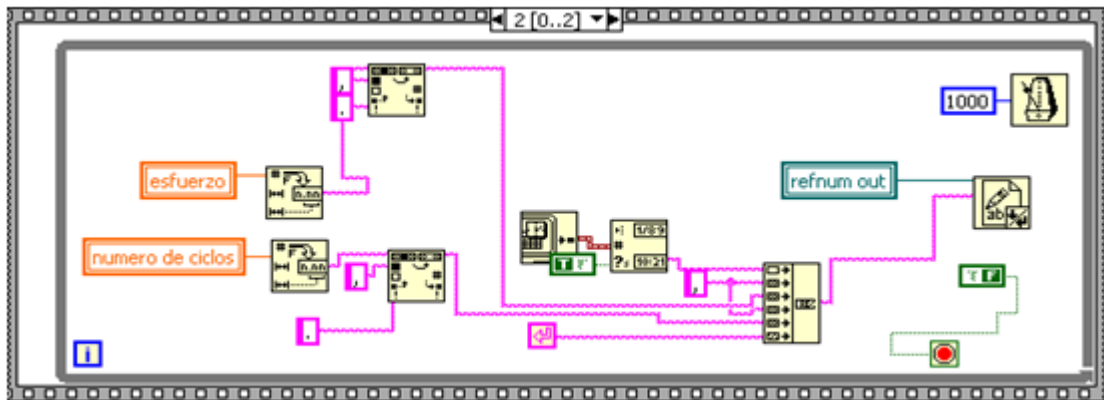
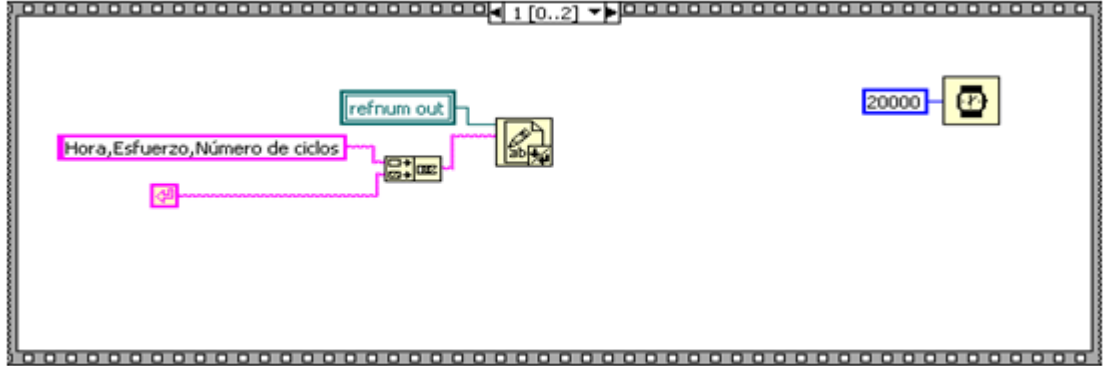
- [1] Typical.
- [2] TEDS option adds 1.0 VDC to bias voltage.
- [3] 200 °F to 325 °F data valid with HT option only.
- [4] Zero-based, least-squares, straight line method.
- [5] See PCB Declaration of Conformance PS023 for details.



8.8 ANEXO 8: PROGRAMACION REALIZADA EN LABVIEW PARA LA GENERACION DE LA GRAFICA DE FATIGA.







DAQ Assistant2

DAQ Assistant

Creates, edits, and runs tasks using NI-DAQmx. Refer to the DAQ Quick Start Guide for information on devices supported by NI-DAQmx.

When you place this Express VI on the block diagram, the DAQ Assistant launches to create a new task. After you create a task, you can double-click the DAQ Assistant Express VI in order to edit that task. For continuous measurement or generation, place a loop around the DAQ Assistant Express VI.

For continuous single-point input or output, the DAQ Assistant Express VI might not provide satisfactory performance. Refer to examples\DAQmx\Analog In\Measure Voltage.llb\Cont Acq&Graph Voltage-Single Point Optimization.vi for techniques to create higher-performance, single-point I/O applications.



Build XY Graph

Build XY Graph

formats the data displayed on an X-Y Graph.



Convert to Dynamic Data

Convert to Dynamic Data

Converts numeric, Boolean, waveform and array data types to the dynamic data type for

use with Express VIs.



Convert from Dynamic Data3

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



Convert to Dynamic Data2

Convert to Dynamic Data

Converts numeric, Boolean, waveform and array data types to the dynamic data type for use with Express VIs.



Convert from Dynamic Data2

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



Simulate Signal

Simulate Signal

Simulates a sine wave, square wave, triangle wave, sawtooth wave, or noise signal.

This Express VI is configured as follows:

Signal Type: Sine

Frequency: 10,1 Hz

Amplitude: 0

Phase: 0

Offset: 0

Noise Type: Uniform White Noise

Noise Amplitude: 0,6

Seed Number: 0

Sampling Rate: 100000 Hz

Number of Samples: 100000 (Automatic)

Timing: Simulate acquisition timing

Timestamps: Relative



Convert from Dynamic Data4

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



Convert from Dynamic Data

Convert from Dynamic Data

Converts the dynamic data type to numeric, Boolean, waveform, and array data types for use with other VIs and functions.



DAQ Assistant

DAQ Assistant

Creates, edits, and runs tasks using NI-DAQmx. Refer to the DAQ Quick Start Guide for information on devices supported by NI-DAQmx.

When you place this Express VI on the block diagram, the DAQ Assistant launches to create a new task. After you create a task, you can double-click the DAQ Assistant

Express VI in order to edit that task. For continuous measurement or generation, place a loop around the DAQ Assistant Express VI.

For continuous single-point input or output, the DAQ Assistant Express VI might not provide satisfactory performance. Refer to `examples\DAQmx\Analog In\Measure Voltage.llb\Cont Acq&Graph Voltage-Single Point Optimization.vi` for techniques to create higher-performance, single-point I/O applications.