



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

TÍTULO DEL PROYECTO:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO  
PARA PRÁCTICAS DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL  
LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE”

REALIZADO POR:

PATRICIO JAVIER PABÓN LÓPEZ

Tesis presentada como requisito previo a la obtención del grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Año 2015

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

Los suscritos, Ing. José Pérez e Ing. Cristian Leiva, Director y Codirector respectivamente, certificamos que el proyecto titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA PRÁCTICAS DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE.”** , fue realizado en su totalidad por Patricio Javier Pabón López, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Ing. José Pérez  
DIRECTOR

---

Ing. Cristian Leiva  
CODIRECTOR

## **AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

**Yo PATRICIO JAVIER PABON LOPEZ**

### **DECLARO QUE:**

El proyecto de grado titulado **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA PRÁCTICAS DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE”**, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme las citas y notas que constan al pie de las páginas correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente es de mi autoría.

En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis/proyecto de grado en mención.

---

Patricio Javier

Pabón López

## CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

### AUTORIZACIÓN

Yo: Patricio Javier Pabón López

Autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la institución del proyecto de grado titulado: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO AUTOMATIZADO PARA PRÁCTICAS DE FLEXIÓN DE VIGAS PARA EL LABORATORIO DE MECÁNICA DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE”**., cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Patricio Javier

Pabón López

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi padre Patricio por ser el pilar principal de mi familia, dándome todo el apoyo y respaldo en cada una de las etapas de mis estudios, por enseñarme a ser una persona luchadora que logre todas sus metas y a nunca dejar a un lado los sueños y deseos para alcanzar todos mis propósitos.

A mi madre Adriana por darme siempre una palabra de aliento y brindarme siempre su apoyo e incondicionalidad, por inculcarme buenos valores desde muy pequeño, además de darme siempre un buen consejo en momentos de adversidad.

A mi hermano Paul por colaborarme en cada momento que lo he necesitado, por acompañarme a lo largo de mi vida siempre con su consejo y apoyo.

*Patricio Javier Pabón López*

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios sobre todas las cosas, ya que sin él y todas sus bendiciones todos estos logros no fueran posibles, por darme la fuerza para resolver cada uno de los problemas con paciencia y sabiduría.

A mi familia le agradezco todo su apoyo incondicional, por confiar y creer en mí a lo largo de mis estudios universitarios, por brindarme siempre su respaldo y darme una palabra de aliento siempre que era necesario, además de ser el motor que me entusiasma para seguir adelante cada día logrando todos mis sueños.

A mi tía Magdalena que durante todos mis estudios universitarios me abrió las puertas de su hogar, dándome todo su apoyo y cariño.

A la institución que me permitió formarme profesionalmente, con bases sólidas de conocimiento, y a todos mis amigos que aportaron en la realización de este proyecto.

A mi director Ing. José Pérez y codirector Ing. Cristian Leiva, que con su apoyo me han guiado en el transcurso y desarrollo de mi tesis, por el aporte de sus conocimientos y todas las observaciones y correcciones que permitieron culminar este proyecto.

*Patricio Javier Pabón López*

## INDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
INDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
INDICE DE TABLAS.....	xv
INDICE DE ANEXOS.....	xix
RESUMEN .....	xx
ABSTRACT .....	xxi
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.....	1
1.1    Antecedentes .....	1
1.2    Planteamiento del problema .....	3
1.3    Definición del problema .....	4
1.4    Objetivos.....	4
1.4.1.    General .....	4
1.4.2.    Específicos.....	4
1.5    Alcance del proyecto .....	5
1.6    Justificación.....	5
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1    Materiales .....	7
2.1.1    Clasificación .....	7

2.1.1.1. Metales .....	7
2.1.1.2. Metales resistentes a la corrosión .....	9
2.1.1.3. Polímeros .....	11
2.1.1.4. Procesos de protección a la corrosión en los metales .....	11
2.2 Propiedades Mecánicas.....	12
2.2.1. Elasticidad.....	12
2.2.2. Plasticidad.....	12
2.2.3. Resilencia .....	13
2.2.4. Ductilidad.....	13
2.2.5. Materiales utilizados en la estructura.....	13
2.2.5.1. Propiedades del acero estructural ASTM A36 .....	13
2.2.5.2. Propiedades del acero Bohler Serie V945 .....	15
2.3 Ensayos Mecánicos .....	16
2.3.1. Ensayo de Flexión de Vigas.....	17
2.3.1.1. Características generales.....	17
2.3.1.2. Estructura del equipo de ensayo de flexión de vigas.....	20
2.3.1.3. Funcionamiento .....	21
2.3.1.4. Especificaciones de la probeta.....	22
2.3.1.5. Alcance y Aplicabilidad .....	24
2.4 Normas que rigen el ensayo de flexión de vigas .....	24
2.5 Señales.....	25
2.5.1. Característica Estática .....	27
2.5.2. Característica Dinámica.....	29
2.6 Tipos de Sensores.....	30

2.7	Adquisición de datos .....	33
2.7.1.	Tarjeta Analógica.....	35
2.8	Controlador lógico programable.....	36
2.8.1.	PLC.....	36
2.8.1.1.	Funciones de un PLC.....	37
2.8.2.	HMI.....	38
CAPÍTULO 3: DISEÑO DEL EQUIPO AUTOMATIZADO .....		40
3.1	Delimitación de los componentes del equipo .....	40
3.1.1.	Componentes electrónicos del equipo .....	40
3.1.2.	Componentes eléctricos del equipo .....	41
3.1.3.	Componentes de la estructura del equipo.....	41
3.2	Determinación de variables del equipo .....	41
3.3	Diseño mecánico de la estructura.....	42
3.3.1.	Criterio de diseño.....	42
3.3.2.	Cálculo de dimensiones.....	43
3.3.3.	Análisis de cargas .....	43
3.3.4.	Análisis de esfuerzos .....	44
3.4	Selección de la instrumentación.....	48
3.4.1.	Selección de instrumentos para medición de carga .....	48
3.4.1.1.	Alternativa A: celdas de carga tipo S.....	48
3.4.1.2.	Alternativa B: celdas de carga tipo unipunto .....	49
3.4.1.3.	Selección de la alternativa del sensor para medición de carga.....	51
3.4.1.4.	Criterios de ponderación .....	51
3.4.1.5.	Peso específico de cada criterio.....	52

3.4.1.6. Selección de la alternativa para el sistema de medición de carga .....	54
3.4.2. Selección de instrumentos para medición de desplazamiento.....	56
3.4.2.1. Alternativa A: Potenciómetro lineal.....	56
3.4.2.2. Alternativa B: Sensor laser marca Sick .....	57
3.4.2.3. Selección de la alternativa del sensor .....	58
3.4.2.4. Criterios de ponderación .....	58
3.4.2.5. Peso específico de cada criterio.....	59
3.4.2.6. Selección de la alternativa para la de medición de desplazamiento.....	62
3.5 Diseño del control .....	63
3.5.1. Selección del PLC.....	63
3.5.1.1. Para la selección del PLC se consideraron dos alternativas. ....	64
3.5.1.2. Alternativa A: PLC "Siemens S7-1200" 1212C .....	64
3.5.1.3. Alternativa B: PLC Delta.....	65
3.5.1.4. Selección del PLC.....	66
3.5.2. Selección de módulo de expansión de PLC .....	66
3.5.3. Selección de la HMI .....	67
3.5.4. Sistema de acondicionamiento de las celdas de carga .....	68
3.5.4.1. Selección de tarjetas analógicas .....	69
3.6 Programación de PLC y la HMI.....	69
3.6.1. Programación PLC .....	69
3.6.1.1. Programación de las celdas de carga .....	70
3.6.1.2. Programación del potenciómetro lineal .....	73
3.6.2. Sistema de visualización de la información en la HMI.....	75

3.7	Selección de fuentes de alimentación .....	78
3.7.1.	Selección de fuente de alimentación de PLC.....	78
3.7.2.	Selección de fuente de alimentación de tarjetas analógicas y sensores .....	79
3.8	Planos de detalle y conjunto.....	80
CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE .....		81
4.1	Elaboración de diagrama de operaciones estructura .....	81
4.2	Selección de materiales.....	81
4.3	Procesos de manufactura .....	82
4.4	Construcción y montaje de la estructura .....	84
4.4.1.	Construcción de partes de la estructura .....	84
4.4.2.	Montaje de la estructura .....	87
4.5	Ensamble del sistema eléctrico, electrónico y control.....	88
4.5.1.	Sistema eléctrico .....	88
4.5.2.	Sistema electrónico .....	89
4.5.3.	Sistema de control .....	90
4.6	Pruebas.....	91
4.7	Tabulación de resultados.....	92
4.8	Análisis de resultados.....	105
4.9	Validación de resultados .....	105
4.9.1.	Pruebas de repetibilidad .....	106
4.9.2.	Análisis comparativo de equipo de vigas universales MM-45 y MM-10 ..	107
CAPÍTULO 5: MANUALES.....		124
5.1	Guía para la realización de la practica.....	124
5.2	Manual de operación .....	125

5.3	Manual de mantenimiento.....	131
5.4	Manual de seguridad.....	132
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS ECONÓMICO Y FINANCIERO .....		135
6.1	Análisis económico.....	135
6.1.1.	Costos Directos .....	135
6.1.2.	Costos Indirectos.....	137
6.1.3.	Honorarios profesionales auxiliares.....	137
6.1.4.	Costos Totales .....	138
6.2	Análisis financiero .....	138
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....		139
7.1	Conclusiones .....	139
7.2	Recomendaciones .....	141
BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS.....		143

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Dinamómetro y comparador de reloj .....	2
Figura 2. Metales .....	8
Figura 3. Diagrama esfuerzo - deformación del aluminio .....	10
Figura 4. Resistencia a la tensión y dureza en los aceros al carbono .....	14
Figura 5. Esfuerzo – deformación del acero .....	14
Figura 6. Tipos de momentos flectores.....	18
Figura 7. Radio de curvatura de la curva elástica de una viga .....	19
Figura 8. Estructura del tipo pórtico .....	21
Figura 9. Especificaciones del Acero ASTM A36 .....	22
Figura 10. Especificaciones de aleación de Aluminio 1060 .....	22
Figura 11. Probetas de acero, aluminio para el ensayo de flexión .....	23
Figura 12. Dimensiones de las probetas.....	23
Figura 13. Señal Analógica, Figura 14. Señal Digital .....	26
Figura 15. Tipos de Señales .....	27
Figura 16. Sensor de distancia tipo LVDT.....	31
Figura 17. Celda de carga tipo “Unipunto”.....	32
Figura 18. Celda de carga tipo “S“ .....	33
Figura 19. Sistema de Adquisición de Datos .....	35
Figura 20. Tarjeta analógica con salida de 0-10V o 4-20mA .....	36
Figura 21. Controlador lógico programable.....	37
Figura 22. HMI en marca Siemens .....	39
Figura 23. Esfuerzo máximo en el pórtico sometido a una carga de 150 N.....	44
Figura 24. Desplazamiento de las platinas sometido a una carga de 150 N. ....	44

Figura 25. Comportamiento de las platinas y columna a una carga de 10780 N. ....	45
Figura 26. Perno cabeza allen M6x70.....	46
Figura 27. Análisis de desplazamiento en el empotramiento.....	47
Figura 28. Análisis de esfuerzo de Von Mises en el empotramiento .....	48
Figura 29. Celda de carga tipo S marca Sensortronics .....	49
Figura 30. Celda de carga tipo Unipunto marca Tede.....	50
Figura 31. Sensor de desplazamiento Novotechnick.....	57
Figura 32. Sensor de desplazamiento laser marca Sick .....	58
Figura 33. PLC Siemens modelo 1212C, AC/DC/RLY .....	64
Figura 34. PLC Delta.....	65
Figura 35. PLC 1212C y módulo de expansión Siemens SM1231 .....	67
Figura 36. HMI Siemens modelo KTP 400.....	68
Figura 37. Tarjeta analógica con salida de 4-20 mA .....	69
Figura 38. Diagrama de proceso para la adquisición de datos .....	70
Figura 39. Desarrollo de la programación de la celda de carga 1 en el software TIA portal V12.....	71
Figura 40. Desarrollo de la programación de la celda de carga 2 en el software TIA portal V12.....	72
Figura 41. Desarrollo de la programación de la celda de carga 3 en el software TIA portal V12.....	72
Figura 42. Desarrollo de la programación del potenciómetro lineal en el software STEP 7 Basic .....	74
Figura 43. Pantalla principal de la HMI.....	75
Figura 44. Pantalla mostrada en el tipo de ensayo de dos apoyos.....	76

Figura 45. Pantalla mostrada en el ensayo de dos apoyos un empotramiento .....	76
Figura 46. Pantalla mostrada en el ensayo de tres apoyos .....	77
Figura 47. Pantalla mostrada en el ensayo de tres apoyos un empotramiento .....	78
Figura 48. Fuente marca Delta 24Vdc/60W/1Fase.....	79
Figura 49. Fuente de Poder marca Q&W 12Vdc modelo DR30-12.....	80
Figura 50. Tubos cuadrados de 40x40 mm .....	81
Figura 51. Platinas de 50 mm de ancho y 9 mm de espesor .....	82
Figura 52. Fresadora de torreta.....	83
Figura 53. Maquinado de perfiles en C.....	83
Figura 54. Sierra de corte .....	84
Figura 55. Pilar izquierdo de la estructura .....	85
Figura 56. Pilar derecho de la estructura.....	86
Figura 57. Base transversal de la estructura.....	87
Figura 58. Platinas de acero aleado bohler V945 .....	87
Figura 59. Estructura tipo pórtico.....	88
Figura 60. Conexiones de celdas de carga con tarjetas analógicas .....	89
Figura 61. Conexión de potenciómetro lineal a PLC.....	90
Figura 62. Representación gráfica de comunicación PLC y módulo .....	91
Figura 63. Esquema del equipo .....	125
Figura 64. Partes de la estructura del equipo de flexión de vigas .....	127
Figura 65. Componentes eléctricos y electrónicos del panel de control.....	128
Figura 66. Pantalla principal que despliega la HMI .....	129
Figura 67. Tipos de ensayos que muestra la HMI .....	130

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Módulo de young de materiales comunes .....	10
Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero A36 .....	15
Tabla 3. Composición química del acero Bohler V945 .....	15
Tabla 4. Factores a considerar para la elección de un sensor .....	33
Tabla 5. Factor de seguridad en el pórtico con cargas variables .....	45
Tabla 6. Evaluación de criterios para el sistema de medición de carga .....	52
Tabla 7. Evaluación del criterio de capacidad de la celda .....	53
Tabla 8. Evaluación del criterio de resolución de la celda.....	53
Tabla 9. Evaluación del criterio de tiempo de vida útil .....	53
Tabla 10. Evaluación del criterio de menor costo .....	54
Tabla 11. Evaluación del criterio de disponibilidad de repuestos .....	54
Tabla 12. Selección de la alternativa para el sistema de medición de carga.....	55
Tabla 13. Evaluación de criterios del instrumento de medición de desplazamiento ..	59
Tabla 14. Evaluación del criterio de resolución del sensor.....	60
Tabla 15. Evaluación del criterio de facilidad de montaje .....	60
Tabla 16. Evaluación del criterio de desplazamiento del sensor .....	61
Tabla 17. Evaluación del criterio de resistencia al medio ambiente.....	61
Tabla 18. Evaluación del criterio de menor costo .....	62
Tabla 19. Selección de la alternativa del sensor de desplazamiento .....	62
Tabla 20. Número de entradas y salidas necesarias para el PLC .....	63
Tabla 21. Especificaciones técnicas del SM 1231 .....	67
Tabla 22. Pruebas de calibración de celdas.....	73
Tabla 23. Pruebas de calibración del potenciómetro lineal.....	75

Tabla 24. Codificaciones de los cables de celdas y tarjetas analógicas.....	89
Tabla 25. Codificación de los cables del potenciómetro .....	90
Tabla 26. Especificaciones técnicas módulo SM1231.....	91
Tabla 27. Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero A36, MM-45.....	92
Tabla 28. Error en ensayo de viga simplemente apoyada-Acero A36, MM-45.....	93
Tabla 29. Ensayo de viga simplemente apoyada- Aluminio, MM-45 .....	94
Tabla 30. Error en ensayo de viga simplemente apoyada-Aluminio, MM-45.....	95
Tabla 31. Ensayo de viga con tres apoyos simples- Acero A36, MM-45.....	96
Tabla 32. Error en ensayo de viga con tres apoyos -Acero A36, MM-45 .....	98
Tabla 33. Ensayo con tres apoyos simples- Aluminio, MM-45 .....	99
Tabla 34. Error en ensayo de viga con tres apoyos -Aluminio, MM-45.....	100
Tabla 35. Ensayo de viga dos apoyos un empotramiento- Acero A36, MM-45 .....	101
Tabla 36. Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Acero A36, MM-45 .....	103
Tabla 37. Ensayo de viga dos apoyos un empotramiento- Aluminio, MM-45 .....	104
Tabla 38. Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Aluminio, MM-45 .....	104
Tabla 39. Repetibilidad en celdas con carga de 200 gr.....	106
Tabla 40. Repetibilidad en celdas con carga de 500 gr.....	106
Tabla 41. Repetibilidad en celdas con carga de 1000 gr.....	106
Tabla 42. Repetibilidad del potenciómetro lineal.....	107
Tabla 43. Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-45 .....	108
Tabla 44. Error en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-45 .....	109
Tabla 45. Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10 .....	110

Tabla 46. Error de reacciones en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10 .....	110
Tabla 47. Error de desplazamiento en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10.....	110
Tabla 48. Comparación de errores en ensayo de viga simplemente apoyada de ambos equipos .....	111
Tabla 49. Ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-45.....	112
Tabla 50. Error en ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-45.....	114
Tabla 51. Ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-10.....	115
Tabla 52. Error en ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-10.....	117
Tabla 53. Comparación de errores en ensayo de viga con tres apoyos de ambos equipos .....	117
Tabla 54. Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Acero, MM-45 .....	118
Tabla 55. Error en ensayo de dos apoyos un empotramiento, Acero-MM-45 .....	121
Tabla 56. Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Acero, MM-10 .....	121
Tabla 57. Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Acero, MM-10 .....	123
Tabla 58. Comparación de errores en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento de ambos equipos .....	123
Tabla 59. Variables del equipo .....	124
Tabla 60. Datos técnicos para la práctica.....	124
Tabla 61. Datos del fabricante .....	126
Tabla 62. Costos Directos .....	136
Tabla 63. Costos Indirectos .....	137

Tabla 64. Honorarios profesionales auxiliares ..... 138

Tabla 65. Costos Totales ..... 138

## **INDICE DE ANEXOS**

ANEXO A: Planos de detalle

ANEXO B: Planos en conjunto

ANEXO C: Planos eléctricos

ANEXO D: Diagrama de operaciones.

ANEXO E: Norma A370-a03.

ANEXO F: Especificaciones técnicas de sensores

ANEXO G: Ensayos adicionales de vigas hiperestáticas

ANEXO H: Guía para la realización de la práctica de flexión de vigas

## **RESUMEN**

El equipo automatizado de flexión de vigas es un sistema de adquisición de datos mediante el cual se obtiene valores precisos de los parámetros de carga y desplazamiento, en los que se ha reemplazado elementos como los dinamómetros por celdas de carga y el comparador de reloj por un potenciómetro lineal, con ello se busca la innovación de una nueva tecnología moderna al laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, en la que intervienen componentes de control como son PLCs y módulos de expansión que permitan el procesamiento de la información de la práctica de flexión de vigas de una forma más rápida y precisa, así como también la utilización de una HMI que logre la visualización de los resultados de la práctica, esto permitirá al estudiante familiarizarse con nuevas tecnologías y brindar un mayor aporte en su preparación.

El equipo cuenta una estructura en forma de pórtico con platinas y tubos cuadrados de 40x40 mm y 3 mm de espesor, recubierta con pintura electrostática que evita la corrosión del mismo. Los sensores de carga poseen una resolución de 1 gramo, con una capacidad de 10 kg, mientras que el sensor de desplazamiento cuenta con un rango de medida de 0 a 25 mm con una resolución de 1 centésima de milímetro.

**PALABRAS CLAVES: AUTOMATIZACIÓN**

**CELDAS DE CARGA**

**MÓDULOS DE EXPANSIÓN**

**ENSAYO DE FLEXIÓN**

**VIGAS**

## **ABSTRACT**

Automated equipment bending beam is a system of data acquisition by which accurate values of the parameters of loading and movement is obtained, which has been replaced elements as dynamometers for load cells and the clock comparator for linear potentiometer, thus pioneering a new modern technology to mechanics laboratory materials at the University of the Armed-ESPE Forces, which involved control components seeks as are PLCs and expansion modules that allow processing practice information flexural beams more accurately and quickly, as well as the use of an HMI that achieves the visualization of the results of the practice, this will allow the student to become familiar with new technologies and provide a greater contribution to their preparation. The device has a portal-shaped structure with square plates and tubes 40x40 mm and 3 mm thick, coated with electrostatic paint to prevent corrosion thereof. The load sensors have a resolution of 1 gram, with a capacity of 10 kg, while the displacement sensor has a measuring range from 0 to 25 mm with a resolution of 1 hundredth of a millimeter.

**KEYWORDS: AUTOMATION**

**LOAD CELLS**

**EXPANSION MODULES**

**BEND TEST**

**BEAMS**

## **CAPÍTULO 1**

### **1. Generalidades**

#### **1.1 Antecedentes**

La Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE es una de las instituciones más prestigiosas del país reconocimiento dado por el CONEA, al ser calificada como una universidad de clase “A” a nivel nacional por su alta calidad que presenta su planta de docentes y administrativa, creada el 16 de Junio de 1922 a partir del origen de la Escuela de oficiales Ingenieros, que posteriormente se transformó en Escuela de Artillería e Ingenieros en el año de 1936. (Vistazo, 2009)

A nivel mundial el campo de la Ingeniería fue tomando una gran importancia a lo largo de los años, motivo por el cual en 1948 sufre transformaciones dando lugar a la Escuela técnica de Ingenieros, que más adelante abriría sus puertas a los civiles en 1972.

El 8 de Diciembre de 1977 se le confiere el carácter y condición por parte del Congreso Nacional de Escuela Politécnica del Ejército-ESPE, mudando hasta la actualidad como Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE siendo legalmente constituida y reconocida por la ley.(Espe, s.f.)

La ESPE cuenta con la infraestructura necesaria para brindar un servicio de calidad apuntando al continuo crecimiento de los estudiantes, debido a su alta calidad que registra su planta docente y administrativa y con el único objetivo de formar profesionales de excelencia con capacidad de liderazgo y pensamiento crítico, que ayude en su desarrollo en cada una de las áreas que se desenvuelvan.

Hoy en día la Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE cuenta con los laboratorios necesarios para poner en práctica los conocimientos teóricos impartidos en clase en cada una de sus especialidades.

En la actualidad el Laboratorio de Mecánica de Materiales (LMM), utiliza las carreras de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de cuarto y quinto nivel, maneja máquinas mecánicas, hidráulicas, manuales, de accionamiento eléctrico que realizan análisis del comportamiento mecánico y resistencia de los materiales. Dentro de su gama de ensayos, tenemos la práctica de flexión de vigas, la cual emplea un equipo que tiene 30 años de uso, que posee una limitante ergonómica en su estructura.

El equipo para la práctica de flexión de vigas del LMM, en su instrumentación cuenta con: tres dinamómetros con una capacidad de 0 a 46 N para la medición de carga, con una resolución de 25 g, tres comparadores de reloj con un rango de 0 a 25 mm y una resolución de 0.1mm, ver figura 1.



**Figura 1. Dinamómetro y comparador de reloj**

Dentro de las especificaciones del equipo también consta con un juego de vigas de materiales como: acero, latón, aluminio, todas ellas con un ancho de 19 mm, espesor de 6 mm y una longitud de 1350 mm, además de contar con pesos de 2 N, 5 N y 10 N, que simulan la carga a la cual estará sometida la viga y a su vez son colocados sobre portapesas que van ubicados a lo largo de la misma.

La práctica de flexión de vigas consiste en someter a una deformación una probeta recta de sección plena, generalmente de forma rectangular, mediante el pliegue de esta, sin inversión de su sentido de flexión, sobre un radio especificado al que se le aplica una presión constante, este se puede hacer de diferentes formas, ya que puede ser de dos apoyos, tres apoyos, dos apoyos y un empotramiento, y se utiliza para el estudio de vigas que son elementos estructurales que principalmente trabajan a flexión.

El equipo con el que cuenta el LMM para la práctica de flexión de vigas sufre dificultades en su repetitividad de los resultados, puesto que ya no es la misma, debido al desgaste que existe en las vigas y la estructura al igual que los instrumentos de medición por su manejo, como consecuencia la mayoría de las prácticas presenta datos muy dispersos.

## **1.2 Planteamiento del problema**

El presente proyecto surge bajo la necesidad que presenta el laboratorio de Mecánica de Materiales de la ESPE de obtener una mejor repetibilidad y reproducibilidad en las mediciones realizadas en la práctica de flexión de vigas, se han realizado pruebas y análisis que demuestran estas irregularidades, y que provocan inconsistencias en los resultados.

Además en la actualidad con la demanda de alumnos que presenta el laboratorio de mecánica de materiales para la práctica, es viable la adquisición de un equipo automatizado adicional que agilite los ensayos, como también el considerar los 30 años de funcionamiento y el desgaste sufrido a lo largo de ese periodo del equipo, por tanto se busca con el presente proyecto ofrecer a los estudiantes un ambiente idóneo de trabajo con una mejor área técnica y de infraestructura, que brinde a los estudiantes una mejor preparación en cada una de las áreas en la que se desenvuelvan.

### **1.3 Definición del problema**

El equipo actual de flexión de vigas con el que cuenta el laboratorio de mecánica de materiales de la “Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE”, no logra abastecer al número de estudiantes para la realización de las practicas, además de manejar tecnología obsoleta, por ello surgió la necesidad de adquirir un equipo adicional que agilite la ejecución de las mismas, y de igual manera modernice la tecnología que se utiliza en el laboratorio.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1. General**

Diseñar y construir un equipo automatizado para prácticas de flexión de vigas para el LMM de la ESPE.

#### **1.4.2. Específicos**

1. Estudiar el mecanismo y funcionamiento del equipo para la práctica de flexión de vigas.
2. Diseñar una estructura desmontable que sea de fácil uso.

3. Diseñar los circuitos eléctricos y electrónicos, necesarios para la adquisición de datos del equipo.
4. Construir la estructura e implementar el sistema de control para la fabricación del equipo de flexión de vigas automatizado que mejore la precisión de los resultados y facilite la realización de la práctica.
5. Implementar un software que procese y visualice la información adquirida en la práctica.
6. Validar el funcionamiento del equipo y analizar los resultados de los mismos.
7. Elaborar el manual de operación y de mantenimiento del equipo.

### **1.5 Alcance del proyecto**

Fabricar un equipo automatizado desmontable, que mejore la precisión y valide los resultados de la práctica de flexión de vigas, a su vez permita visualizar la información adquirida de la práctica a través de una pantalla en un tablero de control, una precisión de 0.1 milímetros para el sensor de desplazamiento con un rango de 0 a 25 mm y sensores de carga de 5 kg de capacidad y una precisión de al menos 25 g, utilizando vigas de 1350 mm de longitud, ancho de 19 a 20 mm y un espesor de 6 a 7 mm.

### **1.6 Justificación**

El Equipo para la práctica de flexión de vigas con el que cuenta el LMM, tiene alrededor de 30 años, habiendo cumplido ya su vida útil, este ha disminuido su repetibilidad y reproducibilidad en los resultados, debido al desgaste sufrido en las vigas (deformación plástica) producto de los años de manipulación y uso de los mismos, su limitante ergonómica en la estructura ofrece dificultades a los estudiantes en su utilización, también un punto importante es la tecnología obsoleta que

presentan los dinamómetros, considerando todos estos factores al igual que la demanda de alumnos para realizar la práctica, es necesario la adquisición de un equipo adicional, que agilite la ejecución de la misma, al implementar una nueva tecnología que mejore y modernice el laboratorio de mecánica de materiales con elementos novedosos que ayuden a un mejor aprendizaje de los estudiantes.

Dadas las características actuales en las que se realiza la práctica de flexión de vigas en el LMM de la ESPE, la cual es realizada de manera completamente manual, el proyecto planteado tiene como beneficio la reducción de tiempos de ciclo, al evitar los tiempos muertos generados por la ejecución manual del equipo, es decir el agilizar las prácticas por parte del docente y cumplir el cronograma según lo programado , como también mejorar la precisión de la práctica, orientado principalmente en los resultados, para obtener datos precisos y que permitan minimizar el error, de tal forma que compruebe lo visto en la teoría con la práctica.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Materiales

Los materiales son elementos que han tenido mucha importancia a lo largo del tiempo, con el pasar de los años estos materiales han sido modificados por el hombre para adaptarlos a cada necesidad. (Rodriguez & Castro, 2006)

Las propiedades físicas de los materiales son las características inherentes que permiten diferenciar un material de otro. Entre las propiedades más importantes tenemos la dureza, resiliencia, elasticidad, tenacidad, fragilidad, cohesión, plasticidad, ductilidad, maleabilidad, etc. Los materiales por tener propiedades y características diferentes hacen que cada uno de ellos se comporte de diferente forma, es por eso que es necesario analizar su comportamiento para escoger el idóneo en la aplicación que se desea que este sea utilizado. (Rodriguez & Castro, 2006)

##### 2.1.1 Clasificación

Los materiales están formados por elementos con una estructura y una composición única, que pueden ser utilizados con un propósito en específico a fin de crear cualquier producto. Generalmente se clasifican en cinco grandes grupos que son: metales, cerámicos, polímeros, semiconductores, y materiales compuestos, cada uno de estos grupos de materiales poseen estructuras y propiedades distintas. (Groover, Fundamentos de Manufactura Mode, 1997)

##### 2.1.1.1 Metales

Dentro de los materiales, el grupo de los metales es uno de los más significativos, puesto que es uno de lo más útiles en el campo industrial, particularmente en aplicaciones estructurales o de carga, poseen características como alta resistencia,

rigidez, ductilidad y una buena conductividad eléctrica y térmica.(Garmo & Kohser, 1988)

Asimismo los metales ofrecen una clasificación con dos grupos que son los elementos puros y aleaciones. Para el primer grupo, los elementos puros tienen la característica de poseer una concentración de un elemento del 99%, mientras que las aleaciones, su particularidad es la de contener una combinación de dos elementos o más.(Arenas, 2006)



**Figura 2. Metales**

*Fuente: (Villalva, 2011)*

Los metales ferrosos son aquellos que contienen hierro como su elemento principal, su característica es la resistencia a la tensión y dureza. Los materiales ferrosos predominantes son los aceros al carbono, como el acero estructural A36.

Los metales no ferrosos son como su nombre lo menciona aquellos que no contienen hierro en su composición, y entre los materiales más conocidos tenemos: aluminio, latón, bronce.(Arenas, 2006)

### **2.1.1.2. Metales resistentes a la corrosión**

#### **Corrosión**

La corrosión es el desgaste o deterioro de un material consecuencia de un ataque electroquímico del entorno al cual se encuentra sometido, causando la alteración y destrucción del mismo. (Bilurbina, Liesa, & Iribarren, 2003)

Dentro de los materiales más propensos a la corrosión tenemos el acero estructural o también conocido en el medio como acero ASTM A36, ya que tiene una alta capacidad de oxidarse si están expuestos al aire y al agua simultáneamente. (Amorim, 2000)

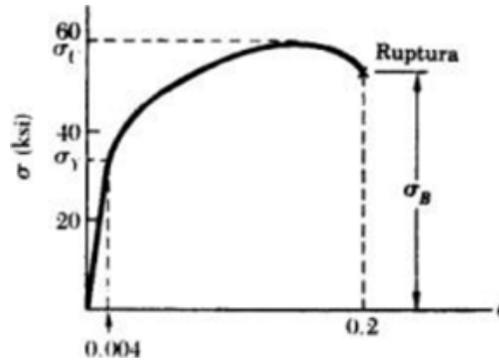
Existe en la actualidad varias alternativas para solucionar el problema de la corrosión en los aceros, puesto que se busca evitar el desgaste y aumentar la vida útil del material. En el caso de un pórtico o una estructura formada por acero ASTM A36 en la que se requiera evitar la corrosión, se conoce de algunos procedimientos que pueden ayudar en la solución de este problema, dentro los más comunes tenemos el proceso de galvanizado, que consiste en recubrir el acero con zinc y el utilizar pinturas especiales.

#### **Aluminio y sus aleaciones**

“El aluminio y sus aleaciones se caracteriza por tener elevada conductividad eléctrica y térmica y resistencia a la corrosión en algunos medios”. (Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 2007)

El aluminio presenta características como las de ser liviano, dúctil, fácil de maquinar y posee un módulo de Young de  $7.1 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup> o  $70 \times 10^3$  MPa y una resistencia a la fluencia de 28 MPa si es recocido y 105 MPa si es trabajado en frío. (Groove, 1997)

Para el presente proyecto las probetas que simulan la viga son de este material.(Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, 2007)



**Figura 3. Diagrama esfuerzo - deformación del aluminio**

*Fuente:(González, 2004)*

#### Duraluminio – Aleación de aluminio

El duraluminio es una aleación de forja, principalmente formada por elementos como aluminio y cobre con porcentajes de entre 4 y 6 %, además de estar constituida con magnesio, manganeso, silicio y zinc. Sus aplicaciones son principalmente orientadas a trabajos en los que se necesite que el elemento soporte deformación plástica, puesto que son dúctiles y maleables.(Charlie, 2012)

Debido a estas características que presentan el duraluminio o pradox se considera utilizarlo para los perfiles en C de los portaceldas.

#### **Tabla 1**

##### **Módulo de Young de materiales comunes.**

<b>Metal</b>	<b>Módulo de Young(N/m<sup>2</sup>)</b>
Acero	$20 \times 10^{10}$
Aluminio	$7 \times 10^{10}$
Latón	$9.5 \times 10^{10}$

### **2.1.1.3. Polímeros**

#### **Duralón**

Es un material sólido sintético, disponible en una gran variedad de presentaciones, utilizado en varias aplicaciones industriales por su alta elasticidad y flexibilidad.

Además el duralón posee características como las de dureza y tenacidad, ideal para trabajos en los que se requiera aliviar pesos y en los que intervengan trabajos relativamente pesados. (Navia, 2013)

Para la base en T de los portaceldas se considera aplicar el duralón debido a la fácil maquinado que este presenta, así como también las propiedades de elasticidad y flexibilidad que este ofrece, idóneas para las condiciones de trabajo que tendrá en el equipo.

### **2.1.1.4. Procesos de protección a la corrosión en los metales**

#### **Pintura Electroestática**

La pintura electrostática consiste en aplicar un fluido de polvo seco que es utilizado para dar un acabado superficial duro y más resistente en el que intervienen pistolas especiales y hornos de curado con temperaturas que llegan a los 375 °C, entre otros equipos que dan como resultado final una pieza resistente a la corrosión, abrasión, impacto y a la deformación del elemento. (Gumercindo)

“Cada partícula de polvo es cargada eléctricamente con carga positivas, y la estructura metálica a pintar es conectada con cable a tierra para que adquiera capacidad negativa, una vez que esto sucede, la pintura ya cargada se pulveriza sobre la pieza para poderla colorear y las partículas se adhieren eficazmente producto de la energía electrostática producida en la operación”. (Gamez, 2012)

Este tipo de pintura electrostática se lo realizan a elementos o estructuras que van a estar sometidas a ambientes adversos o en los que se necesita un buen acabado superficial, ejemplo: electrodomésticos o industria automotriz.(Gamez, 2012)

Para el ambiente que presenta el laboratorio de mecánica de materiales de la ESPE, este tipo de proceso es una buena alternativa para evitar la corrosión de la parte estructural del equipo de flexión de vigas.

## **2.2 Propiedades Mecánicas**

Para el presente proyecto conocer las propiedades mecánicas de un material es muy importante, ya que son aquellas que determinan el comportamiento de los metales frente a cargas o esfuerzos que tienden a alterar su forma, estas se especifican a partir de su composición química (Galeano)

A continuación se definirá las propiedades mecánicas que caracteriza a los materiales.

### **2.2.1. Elasticidad**

Es aquella propiedad que poseen los metales para recobrar su forma o volumen original cuando dejan de actuar sobre ellos fuerzas que causan su deformación.

Los metales tienen un determinado límite de elasticidad, si este es sobrepasado, el material no recupera su forma original.(Flores Cruz, 2004)

### **2.2.2. Plasticidad**

“Es la propiedad contraria a la elasticidad. Si una fuerza exterior deforma el material, este se mantiene permanentemente deformado, pero sin romperse, a diferencia del elástico, que recupera su forma original”.(Marin Garcia, 2008)

### **2.2.3. Resiliencia**

Es la capacidad de un material de absorber energía elástica cuando es deformado y de ceder esta energía cuando se deja de aplicarla. La propiedad asociada se denomina módulo de resiliencia, que es la energía de deformación por unidad de volumen que se requiere para deformar un material hasta el límite elástico.(Callister, Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales, 2002)

### **2.2.4. Ductilidad**

“Es una propiedad mecánica muy importante, siendo una unidad de medida del grado de deformación plástica que puede ser soportada hasta la fractura”. La ductilidad puede expresarse cuantitativamente como alargamiento relativo o porcentual.(Callister, Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales, 2002)

### **2.2.5. Materiales utilizados en la estructura**

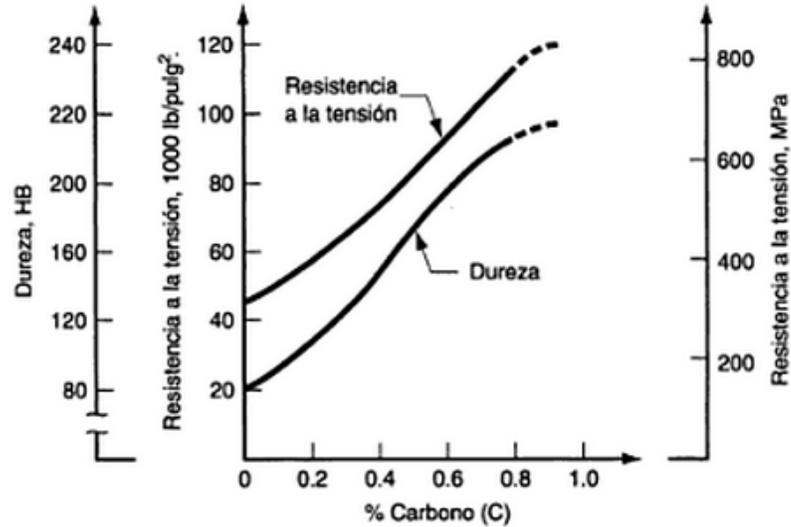
#### **2.2.5.1. Propiedades del acero estructural ASTM A36**

“El acero es una aleación de hierro que contiene entre el 0.02% y 2.11% de carbono en peso.” (Groover, Fundamentos de manufactura moderna, 1997)

El acero ASTM A36 es un acero estructural al carbono, utilizado generalmente en construcción de estructuras metálicas, de buena soldabilidad, son aplicables a la mayoría de procesos de soldadura, entre los más comunes tenemos el SMAW y GMAW. (Groover, Fundamentos de manufactura moderna, 1997)

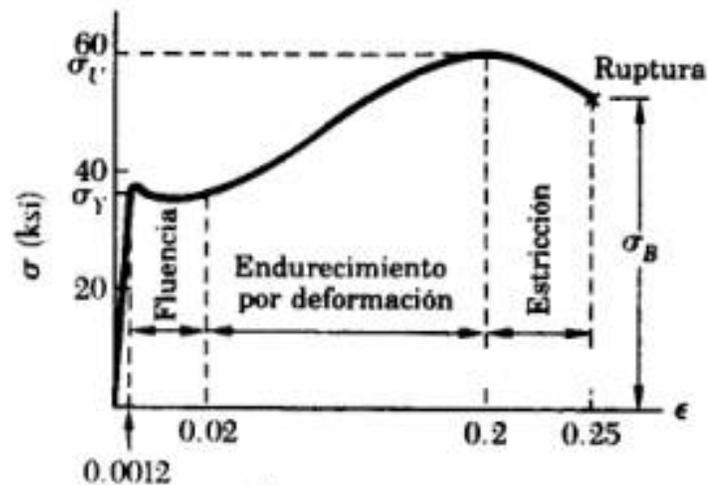
El Módulo de Elasticidad o Módulo de Young, para el cálculo y diseño de estructuras de acero en el rango elástico, toma convencionalmente el siguiente valor:

$$E = 210000 \frac{N}{mm^2}$$



**Figura 4. Resistencia a la tensión y dureza como una función del contenido de carbono en los aceros al carbono**

*Fuente:*(Groover, Fundamentos de manufactura moderna, 1997)



**Figura 5. Esfuerzo – deformación del acero**

*Fuente:*(González, 2004)

En el caso del acero estructural A36 con el que se va a construir la parte de los pilares de la estructura del equipo cuenta con propiedades tales como:

**Tabla 2**  
**Propiedades mecánicas del Acero A36.**

<b>Límite de fluencia</b>		<b>Resistencia a la tracción</b>			
<b>mínimo</b>		<b>Psi</b>		<b>Mpa</b>	
<b>Mpa</b>	<b>Psi</b>	<b>Min</b>	<b>Máx.</b>	<b>Min</b>	<b>Máx.</b>
250	36000	58000	80000	400	550

### 2.2.5.2. Propiedades del acero Bohler Serie V945

Estos aceros se utilizan por su resistencia y dureza para la fabricación de componentes de maquinarias, no presenta buen comportamiento en lugares donde el entorno de trabajo es altamente corrosivo. (Bohler)

**Tabla 3**  
**Composición química del acero Bohler V945**

<b>C%</b>	<b>Si%</b>	<b>Mn%</b>
<b>0.45</b>	<b>0.30</b>	<b>0.70</b>

Este acero es equivalente al AISI 1045, se lo encuentra en el mercado normalizado a 900 ° C y recocido a 790 °C, son utilizados generalmente en la fabricación de pasadores, chavetas, platinas y pernos.(Bohler)

El acero bohler V945 debido a las propiedades que presenta de buena soldabilidad, además de ser fáciles de mecanizar, se lo considera en el diseño de la estructura para la adquisición de las platinas, ya que se busca un material que no presente mayor dificultad en el maquinado para la rectificación de las mismas.

### 2.3 Ensayos Mecánicos

Los ensayos mecánicos son aquellos procedimientos en los que se busca conocer las propiedades mecánicas de los metales o de sus aleaciones, y que permiten obtener singularidades que los caracterizan, de tal forma que se los pueda emplear de mejor manera a partir de las propiedades que estos ofrecen.

Las propiedades mecánicas de un metal obtenidas a partir de los ensayos mecánicos son de mucha importancia en la industria ya que determina información valiosa y útil para su aplicación, es por ello que dichos ensayos se los realiza bajo máquinas y sobre probetas controladas y reguladas a través de normas que certifican la realización del ensayo.

“Los ensayos mecánicos consisten en someter las probetas a esfuerzos controlados que se aplican en condiciones determinadas.” (Bernau, 1958)

Los resultados obtenidos ofrecen mediante valores cuantitativos las cualidades de los materiales.

Existen muchos tipos de ensayos mecánicos, los cuales unos indican cifras mecánicas exactas, mientras que otros solamente sirven para hacer ciertas observaciones.(Bernau, 1958)

Dentro de los ensayos mecánicos tenemos dos grandes grupos que son: los ensayos no destructivos que son aquellos que no causan daño en el material y que pueden ser utilizados posteriormente, dentro de los más comunes tenemos al ensayo de dureza, ensayo de ultrasonido, ensayo de tintas penetrantes, etc.

Los ensayos destructivos se lo hacen a algunos materiales como por el ejemplo al acero y que causa deformaciones del material, dentro de los más utilizados tenemos

el ensayo de tensión, de flexión, de compresión, de fatiga, de torsión, de resiliencia entre otros.(Bernau, 1958)

### **2.3.1. Ensayo de Flexión de Vigas**

El ensayo de flexión es utilizado para determinar la deformación que puede tener un elemento estructural alargado en una dirección perpendicular a su eje longitudinal, usado generalmente en el caso de las vigas que son elementos estructurales que trabajan principalmente a flexión.

Dependiendo del tipo de ensayo que se realice en el equipo, se puede aplicar una o varias fuerzas a lo largo de una barra, en la que podrá estar soportada en dos o tres apoyos, inclusive utilizando un empotramiento, para determinar la resistencia del material y el valor máximo de deformación que el material puede sufrir sometido a cargas variables.(Bueno Saenz, 2012)

El ensayo de flexión de vigas se puede utilizar para casi cualquier estudio que involucre el análisis de vigas sometidas a flexión bajo la acción de cargas puntuales, cargas distribuidas y carga en movimiento.

#### **2.3.1.1. Características generales**

El ensayo de flexión de vigas se lo realiza en materiales estructurales como el acero, el aluminio, el latón entre otros. Un equipo didáctico de este tipo consta de una estructura en el cual se instala los instrumentos de medición, como son los medidores de carga y los medidores de deflexión.

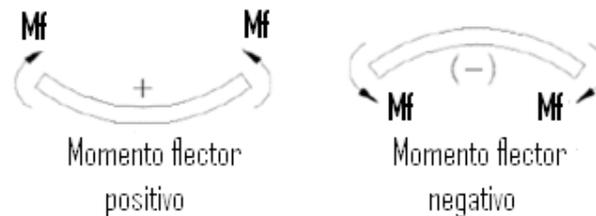
El tipo de ensayos que se realiza en el equipo puede ser de: dos apoyos, dos apoyos un empotramiento, tres apoyos y tres apoyos un empotramiento

Para la solución de problemas de vigas isostáticas que se pueden presentar en el equipo, se puede plantear las condiciones de equilibrio que son:

$$\sum F_x = 0, \sum F_y = 0, \sum M = 0$$

Este tipo de ecuaciones expresan que las componentes de las fuerzas externas en las direcciones x e y, así como los momentos se encuentran en equilibrio.

De manera general se encontró que para el caso de las vigas isostáticas se puede determinar las reacciones mediante las ecuaciones de equilibrio, caso contrario ocurre con las vigas hiperestáticas en las que es necesario utilizar otros métodos, ya que el número de incógnitas que estos problemas presentan, son mayores al número de ecuaciones que se pueden obtener con la estática.



**Figura 6. Tipos de momentos flectores**

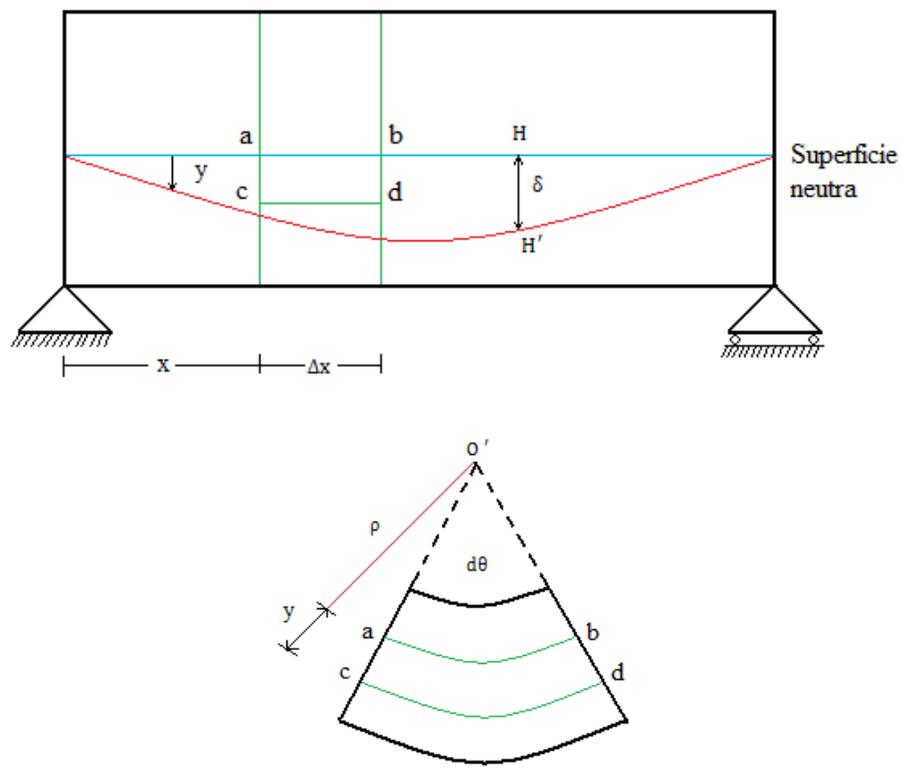
#### **Ecuación diferencial de la curva elástica**

El tipo de vigas hiperestáticas se presenta en la práctica de flexión de vigas cuando se emplea dos apoyos un empotramiento y tres apoyos simples, para ello se deben emplear otros métodos para su resolución, entre los más comunes tenemos: el método de la doble integración y el método de superposición.

##### *Método de la doble integración*

El método de la doble integración es un modo práctico para la solución de problemas de vigas hiperestáticas y se basa en la doble integración de la ecuación diferencial de la curva elástica, para ello se debe obtener la ecuación de momento flector del último tramo de la viga al realizar un corte a una distancia x, posteriormente se procede a integrar dicha ecuación sin destruir sus paréntesis con lo

cual se obtiene un constante  $C1$ , luego de ello se integra por segunda vez la ecuación de momento y se obtiene una constante  $C2$ , una vez finalizado este proceso se procede a reemplazar las condiciones de borde obtenidos de los apoyos de la viga y como consecuencia se obtiene varias ecuaciones que sumadas con las de la estática logran un sistema consistente ya que poseen el mismo número de ecuaciones que de incógnitas, con lo cual se puede determinar las reacciones teóricas en cada apoyo y demás variables.



**Figura 7. Radio de curvatura de la curva elástica de una viga**

Línea en azul: Superficie neutra

Línea en rojo: Curva elástica de la viga  $\delta = f(x)$

$\rho$  : Radio de curvatura

$\delta$ : Deflexión

$$\text{tag}(\theta) = \frac{dy}{dx}$$

$$\text{tag}(\theta) = \frac{d\delta}{dx}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{d^2\delta}{dx^2}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{\sigma}{E \cdot y} = \frac{My}{IEy}$$

$$\frac{1}{\rho} = \frac{My}{EI}$$

Igualando las ecuaciones se obtiene:

$$\boxed{EI \frac{d^2\delta}{dx^2} = M}$$

**Ecuación diferencial de la curva elástica**

$$I = \frac{b x h^3}{12}$$

**Inercia de una sección rectangular**

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I}$$

**Fórmula de la deflexión en una viga con carga en el centro**

### 2.3.1.2. Estructura del equipo de ensayo de flexión de vigas

El tipo de estructura que posee el equipo de ensayo de flexión de vigas es de tipo pórtico, en el que intervienen elementos conformados por pilares o columnas y vigas, el pie de la columna puede ser articulado o empotrado.

Este tipo de estructura trabaja a flexión y compresión, además presenta una gran versatilidad en aplicaciones industriales, ya que pueden construirse pórticos múltiples en los cuales se utiliza varias columnas que soporta vigas horizontales conectadas rígidamente. (Villeta, 2000)



**Figura 8. Estructura del tipo pórtico**

### 2.3.1.3. Funcionamiento

El funcionamiento del equipo para el ensayo de flexión de vigas es relativamente sencillo y consta de los siguientes pasos:

1. Poner los medidores de carga (Dinamómetros) en las posiciones requeridas. Colocar la viga en los soportes de borde cuchillo que presenta cada dinamómetro en su parte superior.

2. Ubicar los comparadores de reloj sobre el soporte superior de la estructura que a su vez funciona como regla.

3. Ubicar las puntas de contacto de los comparadores de reloj sobre cada uno de los apoyos o puntos deseados a lo largo de la viga donde se desee medir la deflexión, ajustar la altura del soporte girando el tornillo moleteado del comparador de reloj hasta que este marque cero, de tal manera que la viga se encuentre nivelada.

Nota: Si el ensayo es con una viga en voladizo entonces el nivel de la viga debe ser tomada con respecto a la parte empotrada de la misma.

4. Colocar los pesos deseados sobre la viga.

Nota: Los medidores de carga y comparadores de reloj deben ser encerrados antes de cada lectura.

5. Se registra las lecturas obtenidas en los medidores de carga, siendo estas las reacciones de la viga sobre los soportes.

6. Se registra la deflexión de la viga a través de la lectura del comparador de reloj.

#### 2.3.1.4. Especificaciones de la probeta

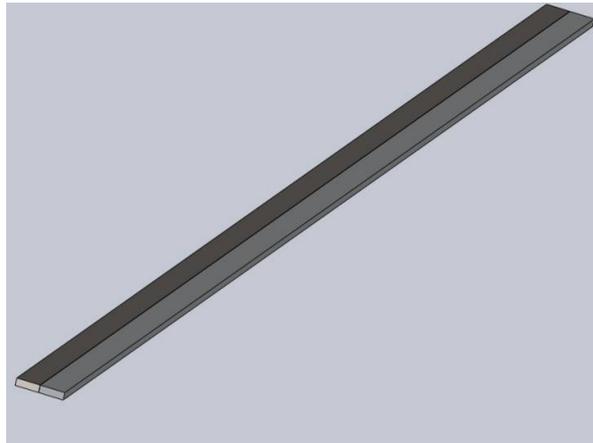
La probeta que se utiliza para realizar el ensayo de flexión de vigas posee una longitud de 1350 mm, además se utilizan materiales para la viga como acero y aluminio.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+011	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	7.93e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidad	7850	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	400000000	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión en X		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	250000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica en X		/K

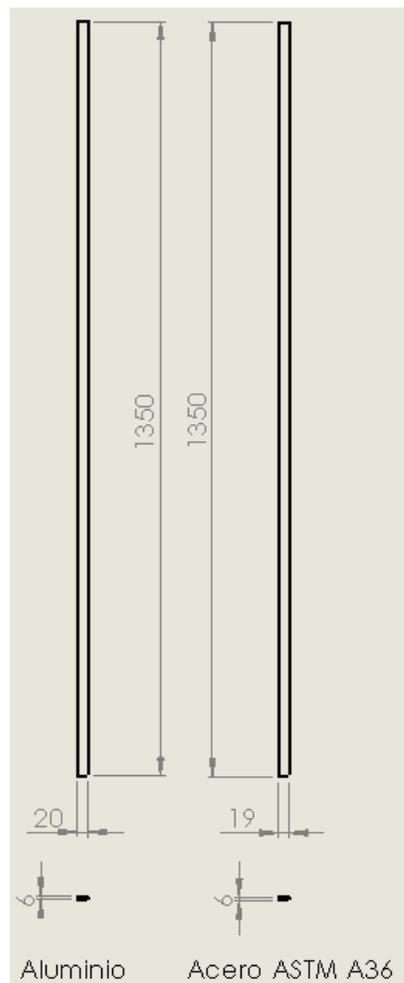
**Figura 9. Especificaciones del Acero ASTM A36**

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	6.9e+010	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33	N/D
Módulo cortante	2.7e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidad	2700	kg/m <sup>3</sup>
Límite de tracción	68935600	N/m <sup>2</sup>
Límite de compresión en X		N/m <sup>2</sup>
Límite elástico	27574200	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansión térmica	2.4e-005	/K

**Figura 10. Especificaciones de aleación de Aluminio 1060**



**Figura 11. Probetas de acero, aluminio para el ensayo de flexión**



**Figura 12. Dimensiones de las probetas**

### **2.3.1.5. Alcance y Aplicabilidad**

El alcance que posee un equipo didáctico para el ensayo de flexión de vigas no debe sobrepasar un peso de viga de 30 kg, como también una sección transversal de la misma de 19 a 20 mm de ancho y 6 a 7 mm de espesor y un largo de 1350 mm.

Es utilizado para materiales como aceros suaves, aleaciones de aluminio, ya que son elementos bastantes comunes utilizados en el campo estructural.

Este tipo de ensayos son estrictamente didácticos puesto que no utilizan elementos reales, que sirven al estudiante a complementar y comprobar los conocimientos adquiridos de la teoría de flexión de vigas.

Sin embargo existe otro tipo de ensayos de flexión, utilizados para el análisis del hormigón, usado en la construcción de bloques y pavimentos, estos ayudan al diseño estructural partiendo de la resistencia que puede poseer la viga a la flexión hasta su rotura, las normas que las rigen son las ASTM.

## **2.4 Normas que rigen el ensayo de flexión de vigas**

Para la fabricación del equipo de flexión de vigas es necesario conocer algunos requerimientos que norme la práctica, debido a ello se consideró algunos parámetros importantes como son las dimensiones de las probetas y características que debe poseer el equipo para su correcto funcionamiento, para ello se utilizó como la referencia la norma ASTM A 370-03, que define las dimensiones de las probetas para ensayos mecánicos de productos de acero, ver anexo E.

## 2.5 Señales

Las señales aparecen en muchos ámbitos y son utilizadas en diferentes áreas del conocimiento, estas pueden ser de diferente naturaleza, ya que pueden ser señales generadas por fuentes de sonido, señales de tipo mecánico, térmico o eléctrico, producto de los mismos procesos.

Todas las señales tienen algo en común: “cada señal tiene una o más características que reflejan el comportamiento de uno o varios fenómenos físicos; es decir, que en alguna de sus características contiene información acerca de los fenómenos físicos que entran en juego.”(Kuhlmann & Alonso)

Las señales son muy importantes puesto que llevan consigo información ya sea de un elemento o proceso determinado. Los procesos o máquinas son fuentes de señales y se ven representadas en: temperatura, presión, caudal, posición, nivel etc.

Una magnitud, forma de onda, frecuencia, ancho de banda, son aquellos componentes donde se encuentra la información.

En el equipo de flexión de vigas el principio de transformación de la señal del parámetro de carga, se basa en transformar una señal mecánica (fuerza o peso) en una señal eléctrica, a través de un transductor de deformación, conocido como galgas extensiométricas que se encuentran alojadas en la celda de carga y que al ser deformadas envían una señal de milivoltios. Con el parámetro de desplazamiento la señal es obtenida a través de un potenciómetro lineal, cuyo principio de funcionamiento es basado en una resistencia variable que al cambiar el valor de la resistencia varia el voltaje de salida.

Las señales sin información o que no poseen una función útil se les denomina ruido siempre y cuando proceda del mismo canal o camino por el cual se transmite la

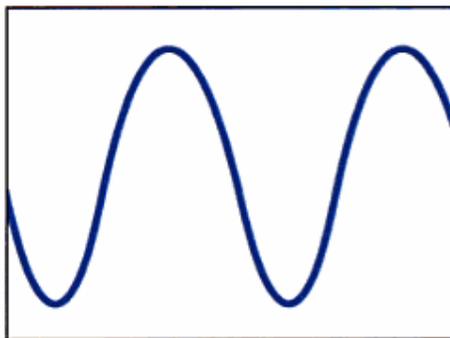
información, mientras que son llamadas interferencias aquellas señales que proceden de otro canal.(Kuhlmann & Alonso)

Existen dos tipos de señales que son: las señales analógicas y las discretas.

“Las señales analógicas son aquellas que pueden ser representadas por funciones que toman un número infinito de valores en cualquier intervalo considerado”.(Castro & Fusario, 2006)

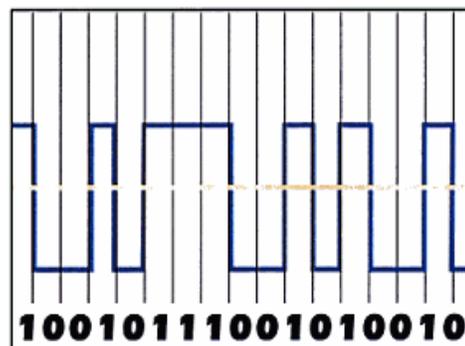
Un claro ejemplo de una señal analógica es el de la electricidad, con una onda senoidal que posee valores continuos dentro de un rango determinado, es decir que pasa por todos los valores posibles dentro de dicho rango, además estas se pueden clasificar en variables y continuas.(Castro & Fusario, 2006)

“Las señales digitales son aquellas que pueden ser representadas por funciones que toman un número finito de valores en cualquier intervalo considerado”. Los ordenadores manejan señales digitales al igual que el código binario con valores únicos de 0 y 1.(Castro & Fusario, 2006)



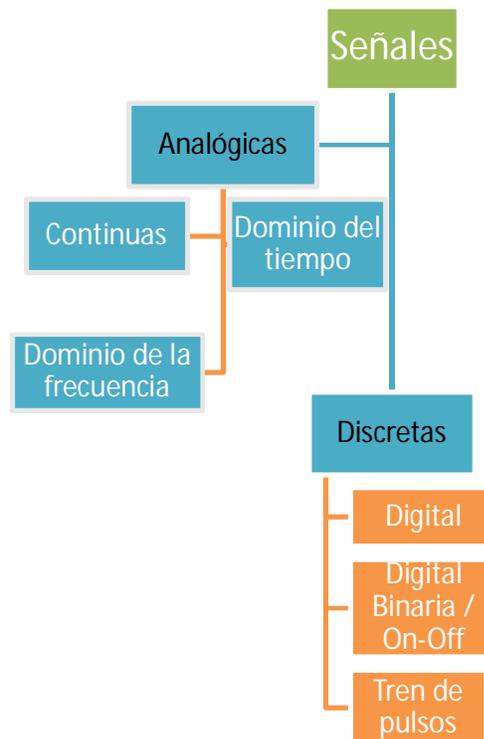
**Figura 13. Señal Analógica**

*Fuente:*(Bravo, 2006)



**Figura 14. Señal Digital**

*Fuente:*(Bravo, 2006)



**Figura 15. Tipos de Señales**

### 2.5.1. Característica Estática

La característica estática es la relación entre la entrada de un sistema versus la salida del mismo y se la puede expresar en términos de:

- Una función algebraica (Salida=  $f(\text{Entrada})$ )
- Un gráfico que representa la salida versus la entrada.
- Un diagrama de la función

Las características estáticas de un instrumento son:

#### **Rango**

Son los valores mínimos o máximos de las señales de entrada y salida de un instrumento. (Echeverría, 2009)

**Alcance**

Es la máxima variación de la entrada o de la salida de un instrumento.

(Echeverria, 2009)

**Histéresis**

Es cuando la relación de entrada-salida de un instrumento no es la misma.

$$\text{Entrada-Salida} \neq \text{Salida- Entrada}$$

(Echeverria, 2009)

**Sensibilidad**

“Es la tasa de cambio de la salida con respecto a la entrada”.

$$\text{Sensibilidad} = \frac{\Delta \text{magnitud de salida}}{\Delta \text{magnitud de entrada}}$$

Un sensor se dice que es más sensible en cuanto la variación de salida sea mayor a la creada por la señal de entrada. (Balcells & Romeral, 1998)

**Efectos medio ambientales**

Son señales distintas al proceso de medición y que alteran las señales de entrada de un instrumento.

**Resolución**

Es la capacidad que tiene un sensor para analizar entre valores próximos a la variable de entrada y es medida entre dos valores cercanos a los que el sensor puede distinguir, siendo la resolución el más pequeño incremento de la entrada.

“Si un sensor responde con una salida para cualquier valor de entrada se dice que tiene una resolución infinita. Cuando el incremento de la entrada se produce a partir de cero, se suele llamar umbral a la resolución”.(Balcells & Romeral, 1998)

## **Errores**

El error en un sensor aparece como un valor de medida, y pueden ser de dos tipos sistemáticos y aleatorios.(Echeverria, 2009)

### **2.5.2. Característica Dinámica**

La característica dinámica representa la respuesta instantánea de un sensor a una señal de entrada y el tiempo en responder y ser analizado, depende de su composición interna.

#### **Velocidad de Respuesta**

En un sensor la velocidad de respuesta es la capacidad para que la señal de salida siga sin retraso alguno las variaciones de la señal de entrada.

Los factores más importantes en los que interviene la velocidad de respuesta son los siguientes:

##### Tiempo de Retardo

“Es el tiempo transcurrido desde la aplicación del escalón de entrada hasta que la salida alcanza el 10% de su valor permanente”. (Balcells & Romeral, 1998)

##### Tiempo de Subida

“Es el tiempo transcurrido desde que la salida alcanza el 10% de su valor permanente hasta que llega por primera vez al 90%”. (Balcells & Romeral, 1998)

##### Tiempo de establecimiento

“Es el tiempo transcurrido desde la aplicación de un escalón de entrada hasta que la respuesta alcanza el régimen permanente”.(Balcells & Romeral, 1998)

### **Respuesta frecuencial**

La respuesta frecuencial está directamente relacionada con la velocidad de respuesta, y es la relación que existe entre la sensibilidad y la frecuencia.

## **2.6 Tipos de Sensores**

### **Medidores de posición o Distancia**

Dentro de los transductores de posición podemos distinguir dos grandes grupos:

- Los indicadores de posición lineal o angular para grandes distancias
- Los detectores de pequeñas deformaciones o detectores de presencia de objetos a una cierta distancia que dan una señal analógica o digital proporcional a dicha distancia.

#### Potenciómetros

El potenciómetro es un transductor de posición angular, de tipo absoluto y con salida de tipo analógica. Consiste en una resistencia de hilo bobinado o en una pista de material conductor, distribuida a lo largo de un soporte en forma de arco y un cursor solidario a un eje de salida, que puede deslizarse sobre dicho conductor.

Existen también potenciómetros con carrera lineal pero los más frecuentes, cuando se usa como detectores de posición es emplear los rotativos. (Balcells & Romeral, 1998)

#### LVDT

Los medidores de posición o distancia tipo LVDT son elementos de medida inductivo, ya que su principio se basa en el de un transformador de núcleo variable. Un LVDT logra que un movimiento lineal del núcleo en el interior del cuerpo del sensor provoque una variación de inducción entre primario y secundario, lo que se traduce en un cambio de señal de salida, proporcional a ese desplazamiento.

Los rangos de medida de este tipo de sensores pueden alcanzar distancias de hasta 500 mm con una medida inicial de por lo menos un milímetro, por eso son adecuados para rangos de medida bajos y medios, con salida analógica 0-10 V o 4-20 mA, y salida digital, utilizado generalmente en la ingeniería civil, para análisis de vigas de hormigón.(Sensing)



**Figura 16. Sensor de distancia tipo LVDT**

Fuente:(Sensing)

### **Medidores de pequeños desplazamientos y deformaciones.**

#### Galgas extensiométricas

Son sensores de deformación basados en la variación de resistencia de un hilo conductor calibrado o, resistencias construidas, a base de pistas de semiconductor. Se utilizan combinados con muelles o piezas deformables generalmente para detectar de forma indirecta esfuerzos de tracción, compresión, torsión etc. Se utilizan en otros tipos de sensores acelerómetros detectores de presión, células de pesaje etc.(Balcells & Romeral, 1998)

#### Celdas de carga

El principio de una celda de carga se basa en la conformación de cuatro galgas extensiométricas conectadas en una configuración de tipo puente wheatstone,

también existen celdas de carga desarrolladas solo con una o dos galgas extensiométricas.

Las celdas de carga o sensores de peso son aquellos dispositivos electrónicos creados con la finalidad de detectar una carga sobre una balanza o báscula, en la que aparece una variación eléctrica generada por el puente de wheatstone, producto de una deformación que ocurre al aplicar la carga.(Pesaje y control)

#### Celda de carga tipo unipunto

Las celdas de carga tipo un punto están diseñadas para soportar cargas a compresión, puede manejar capacidades desde los 2 kg, su diseño otorga un mejor pesaje, ya que permite colocar una plataforma de peso que puede ser fijada a la celda de carga directamente, dando lugar a un pesaje directo, este tipo de celdas son muy utilizadas en el campo industrial por su versatilidad y la gran gama de capacidades que este ofrece, su señal de salida es mV.



**Figura 17. Celda de carga tipo “Unipunto”**

*Fuente: (Tedeo)*

#### Celda de carga tipo S

Las celdas de carga de tipo “S” son ideales para aplicaciones en las que la celda está sometida a cargas a tensión, trabaja con cargas mayores a los 30 kg y permite una gran versatilidad en las operaciones industriales, a su vez envía señales eléctricas de voltaje que puede oscilar entre los 0 a 10 mV.



**Figura 18. Celda de carga tipo “S”**

*Fuente:* (Pesaje y control)

**Tabla 4**

**Factores a considerar para la elección de un sensor**

Característica de Salida		Magnitud a medir	
*Sensibilidad	*Impedancia	*Rango	*Ancho de banda
*Tipo: Tensión, corriente	*Destino	*Exactitud	*Tiempo de respuesta
*Forma de señal: diferencial,		*Resolución	*Límites de la magnitud a medir.
*Unipolar, Flotante.		*Estabilidad	*Magnitudes *medioambientales
Características ambientales		Característica de alimentación	
Temperatura	Ruido mecánico	Tensión	Frecuencia
Humedad	Agentes químicos	Corriente	Estabilidad
	Atmosfera		
Ruido eléctrico	explosiva	Potencia	
Otros Factores			
	Peso		Longitud y necesidades de cables
	Dimensiones		Tipo y disponibilidad de conectores
	Vida media		Situación en caso de fallo
	Costo de Adquisidor		Costo de mantención y calibración
	Disponibilidad		Costo de reposición
	Tiempo de instalación		

*Fuente:*(Echeverría, 2009)

## 2.7 Adquisición de datos

La adquisición de datos es aquel proceso que permite la lectura de uno o varios sensores, que a su vez van comunicados a un acondicionador de señal, a través de una tarjeta electrónica que permite la visualización y procesamiento de la información en un computador.

Los sensores utilizados para cualquier tipo de instrumentación están conectados, por lo general después de someterlos a un acondicionamiento de señal, a una tablilla de adquisición de datos, que posteriormente se coloca en el computador.

“Se trata de una tablilla analógica de circuito impreso que, para entradas analógicas, cuenta con circuitos para realizar funciones de multiplexión, amplificación, conversión analógica a digital, registro y control, a fin de alimentar las señales digitales muestreadas en el sistema de computación”.(Bolton, 2001)

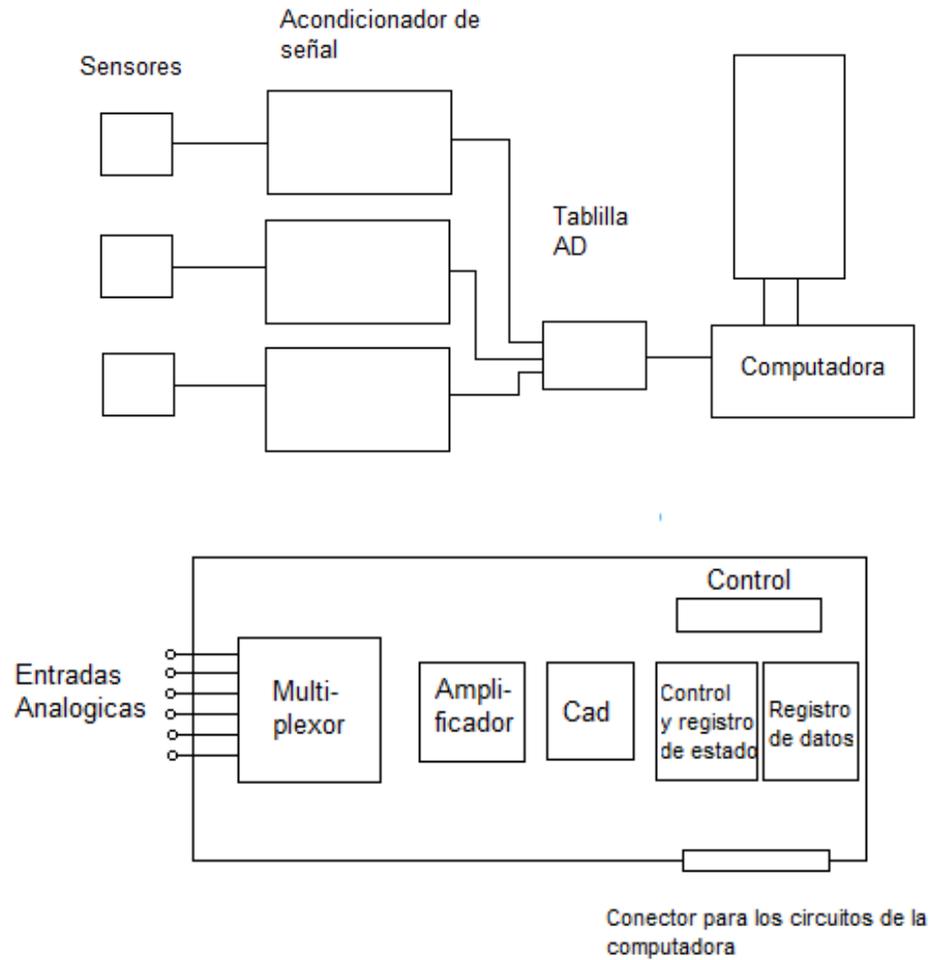
La tablilla AD necesita de un software, este faculta mediante el mismo el procesar la información adquirida a través de la tarjeta.

Cuando se requiera conectar un sensor adicional al programa, se activa la tablilla mediante el envío de una palabra de control al registro de control y estatus, este consigue conmutar con el multiplexor con el canal de entrada correspondiente.(Alciatore & Histan, 2008)

“La entrada del sensor conectada al canal de entrada en cuestión pasa por un amplificador y llega al convertidor analógico digital. Después de la conversión, la señal obtenida pasa al registro de datos y la palabra que se encuentra en el registro de control y estado se modifica para indicar la llegada de la señal”. (Bolton, 2001)

Las ventajas que presenta la tablilla AD son: una mayor precisión de datos, permite el manejo de datos en tiempo real y habilita un procesamiento rápido de los eventos que hayan acontecido.

Al igual que todo proceso estos presenta desventajas, dentro del más relevante es la limitante que ofrece al no permitir emplear cualquier tipo de sensor.



**Figura 19. Sistema de Adquisición de Datos**

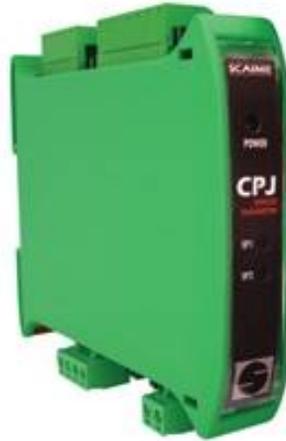
*Fuente: (Bolton, 2001)*

### 2.7.1. Tarjeta Analógica

Una tarjeta analógica es un acondicionador de señal que permite amplificar un voltaje o corriente, con salidas de 0-10V o de 4-20mA respectivamente, siendo esta utilizada para la comunicación entre un sensor y un PLC o una tarjeta AD.

En el campo industrial las tarjetas analógicas son bastante aplicadas, principalmente en el sistema de pesaje de muchas empresas, puesto que manejan básculas de altas capacidades que desean ser controladas y que su precisión es primordial para el desarrollo de un proceso industrial de calidad.

El principio de estos sistemas de pesaje son las celdas de carga que envían valores bajos de voltaje que deben ser acondicionados por la tarjeta analógica para ser enviados a un indicador.



**Figura 20. Tarjeta analógica con salida de 0-10V o 4-20mA**

Fuente: (Scaime)

## **2.8 Controlador lógico programable**

El controlador lógico programable es denominado así porque utiliza la información de todas las partes externas de un sistema para generar acciones de control correspondientes para cada una de las etapas de un proceso, a la vez se comunica con un HMI (Interfaz Humano Máquina), una herramienta que permite visualizar datos o resultados de un proceso para el control del mismo mediante un operador.

### **2.8.1. PLC**

El controlador lógico programable (PLC), es un equipo electrónico, maneja un lenguaje no informático, diseñado para controlar en tiempo real procesos de forma secuencial y automática, apropiados para entornos industriales.



**Figura 21. Controlador lógico programable**

*Fuente: (Siemens, sebatelec)*

El PLC o controlador lógico programable posee en su estructura interna los siguientes elementos: CPU, memoria, dispositivos de programación y comunicaciones, puerto de alimentación, entradas y salida de señales.

El CPU interpreta las señales de entrada y posteriormente las procesa, se pueden realizar cálculos o ejecutar instrucciones de acuerdo a lo establecido en el programa.

La memoria almacena la información adquirida, para ser utilizada en un proceso diferente o posterior.

El puerto de alimentación permite energizar el PLC mediante entradas de 110V/AC, 220V/AC, o 24V/DC.

Los dispositivos de programación y comunicaciones permiten establecer conexión con otros elementos externos como un HMI, otros PLCs, etc.(Echeverria, 2009)

#### **2.8.1.1. Funciones de un PLC**

Programación: Admite introducir, elaborar y cambiar el programa de aplicación del autómeta. Además acepta modificar el programa incluso con el autómeta controlando una máquina.

Detección: Lectura de la señal de los captadores distribuidos por el sistema de fabricación.

Mando: Ejecuta instrucciones establecidas en el PLC.

Comunicación hombre máquina: Mantiene un diálogo con los operadores del equipo, alcanzando siempre un control constante o periódico de un proceso en particular.

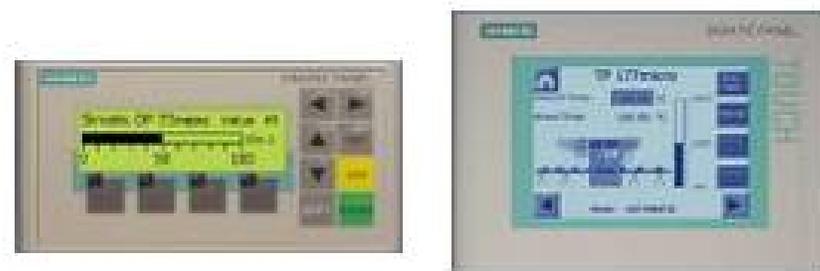
Redes de comunicación: Permite establecer comunicación con otras partes periféricas como redes de control. Las redes industriales permiten la comunicación y el intercambio de datos entre autómatas a tiempo real.

Sistema de supervisión: “También los autómatas permiten comunicarse con ordenadores provistos de programas de supervisión industrial. Esta comunicación se realiza por una red industrial o por medio de una simple conexión por el puerto serie del ordenador”.(Loiola, 2001)

Control de procesos continuos: Permite controlar uno o varios procesos a la vez de forma continua.

### **2.8.2. HMI**

HMI (Human Machine Interface,) significa interfaz entre el hombre y la máquina, siendo un dispositivo que interactúa con un operador, es controlado por un PLC, de tal forma que logra indicar datos o procesos industriales, en los que responde principalmente a la necesidad de tener un control más preciso y agudo de las variables de producción y de contar con información relevante de los distintos procesos en tiempo real. (Ulloa, 2007)



**Figura 22. HMI en marca Siemens**

Fuente:(Siemens, sebatelec)

## CAPÍTULO 3

### 3. DISEÑO DEL EQUIPO AUTOMATIZADO

#### 3.1 Delimitación de los componentes del equipo

Debido a la necesidad de diseñar un equipo automatizado para la práctica de ensayo de flexión de vigas para el LMM de la ESPE, se establecen una serie de requerimientos que se debe satisfacer con el diseño a realizarse. Por lo tanto, en este capítulo se fundamentarán las necesidades a cubrir, tomando en cuenta todos los detalles como: selección de materiales electrónicos, eléctricos, control, estructurales y dimensiones.

##### 3.1.1. Componentes electrónicos del equipo

En el equipo de ensayo de flexión de vigas se automatizará dos parámetros importantes como son: visualizar las cargas ejercidas sobre la viga en cada uno de sus apoyos, como también el desplazamiento producto de las cargas.

Para el primer parámetro se utilizará 3 celdas de carga que reemplazarán los dinamómetros, su rango de capacidad debe ser mayor o igual a los 5 kg y su resolución debe ser de al menos 25 g.

Para el parámetro de desplazamiento se necesitará un sensor que cumpla con un rango de entre 0 a 25 mm de recorrido y una resolución de al menos 0.1 mm.

Es necesario para la adquisición de datos y el acondicionamiento de los sensores los siguientes elementos:

- Un PLC que permita la adquisición de datos y procesamiento de la información de los sensores, con 4 entradas analógicas y si es necesario la adquisición de un módulo de expansión que complete el número de entradas necesarias.

- Tres tarjetas analógicas que permitan el acondicionamiento y amplificación de la señal de las celdas de carga.
- Una pantalla que permita visualizar los datos adquiridos con la información enviada del PLC.

### **3.1.2. Componentes eléctricos del equipo**

Para la automatización del equipo de ensayo de flexión de vigas se necesitará dispositivos eléctricos que protejan al equipo, para aquello se necesitara un braker de máximo 6A y un fusible que respalde el PLC de máximo 2A.

Dentro de la alimentación de los componentes electrónicos se necesitará 2 fuentes de poder DC, la primera para la alimentación del PLC y la siguiente alimentará a los sensores de carga y desplazamiento.

### **3.1.3. Componentes de la estructura del equipo**

El equipo debe tener una altura de entre 1.20 m a 1.30 m, para la mejor manipulación de los instrumentos. Su ancho debe ser de 1.80 m.

Las cargas que debe soportar la estructura deben ser superiores a los 15 kg y no debe sobrepasar los 30 kg.

## **3.2 Determinación de variables del equipo**

En el equipo de ensayo de flexión de vigas automatizado deberá permitir medir variables de carga y de desplazamiento, para el primer parámetro el equipo deberá mostrar las cargas en gramos (g), mientras que para el desplazamiento en milímetros (mm).

Las probetas o vigas utilizadas en el ensayo de flexión de vigas deberán tener una longitud de 1350 mm, un ancho de 19 a 20 mm y un espesor de 6 a 7 mm. El material de las vigas deben ser aluminio y acero.

### **3.3 Diseño mecánico de la estructura**

#### **3.3.1. Criterio de diseño**

Para el diseño del pórtico se hizo un análisis con la finalidad de determinar los materiales y dimensiones idóneas de cada una de las partes de la estructura.

La estructura del equipo es de tipo pórtico, debido a las bajas cargas a las cuales estará sometida la estructura, para la construcción de los pilares se buscó un elemento que presente facilidad para hacer los empalmes, de igual manera fácil de pulir y de soldar, que sea asequible en el mercado y su costo no sea muy elevado, razón por la cual se decidió adquirir tubos cuadrados de 4x4 cm y 3 mm de espesor de material acero ASTM A36.

Para el sistema de transporte de los portaceldas, se consideró elementos que fueran resistentes al desgaste, que soporte cargas medianas, que no presente mayor dificultad para su maquinado. Debido a todos esos requerimientos y considerando el sistema ya existente en el equipo actual del laboratorio de mecánica de materiales de la ESPE, se decidió adquirir platinas Bohler V945 de 50 mm de ancho y 10 mm de espesor, que permitan formar una tipo corredera.

En el diseño para el empotramiento y los coches que llevaran las celdas de carga se tomó en cuenta materiales resistentes a la corrosión y al desgaste, que sean livianos y de fácil maquinado, por ello se seleccionó el duralón y el duraluminio.

#### **Selección de elementos secundarios en la estructura**

Para mayor sujeción y firmeza del pórtico se colocara ángulos en L de 4x4 cm, de 4 mm de espesor y 40 mm de ancho de material ASTM A36, soldados con electrodos SMAW- E6011 en la unión de columna con bases o patas de la estructura.

Para ofrecer al operario una mayor facilidad para la lectura de los datos del ensayo, se soldará un brazo en la parte derecha de la columna del pórtico para colocar el tablero de control junto con la HMI.

Los pernos utilizados en la estructura serán M6 para la unión de las columnas con las platinas.

### **3.3.2. Cálculo de dimensiones**

La dimensión de los elementos del pórtico fueron determinados a partir de un análisis que se detalla a continuación.

Para las dimensiones de los pilares en lo que respecta a la columna, se consideró para el largo del tubo cuadrado encontrar una altura idónea que sumada a la base del pilar permita a los estudiantes una buena manipulación de los instrumentos en la estructura. Para aquello se tomó en cuenta la estatura promedio de una persona y la facilidad que esta tenga para manejar con sus manos los elementos del equipo, como consecuencia se decidió cortar 2 tubos de 1210 mm de largo.

Debido al largo de los tubos se determinó para la base de los pilares cortar tubos cuadrados de 60 cm de largo para dar una mayor estabilidad a la estructura.

Tomando en cuenta la estructura del equipo de flexión de vigas con el que cuenta el laboratorio actualmente, se decidió cortar 3 platinas de 1.80 m de largo.

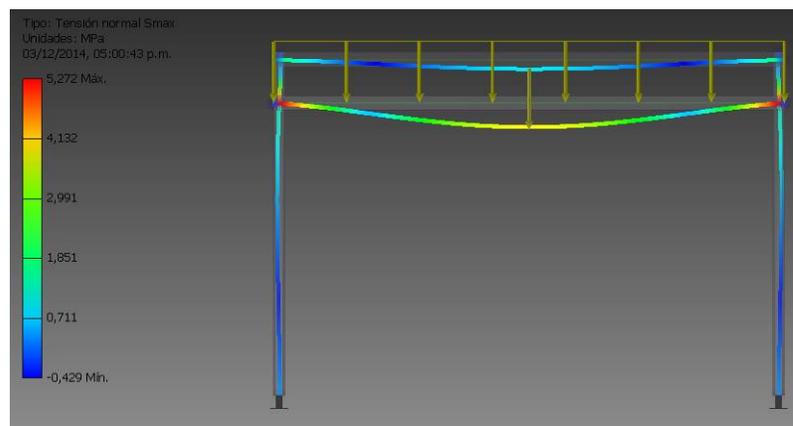
### **3.3.3. Análisis de cargas**

El análisis de carga realizado de la estructura fue desarrollado a partir del estudio efectuado en el laboratorio de mecánica de materiales de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, en el que se determinó que las cargas máximas a las cuales se ve sometida la estructura son de 15 kg aproximadamente, parámetro obtenido por la suma de pesas que posee el laboratorio para cargar al equipo.

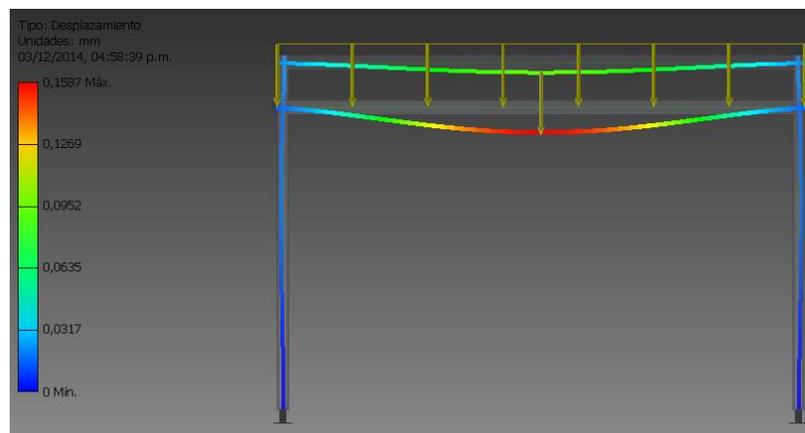
Puesto que la estructura no se ve sometida a mayor esfuerzo ni cargas, se consideró en el diseño la adquisición de materiales medianamente resistentes para la construcción de la misma.

### 3.3.4. Análisis de esfuerzos

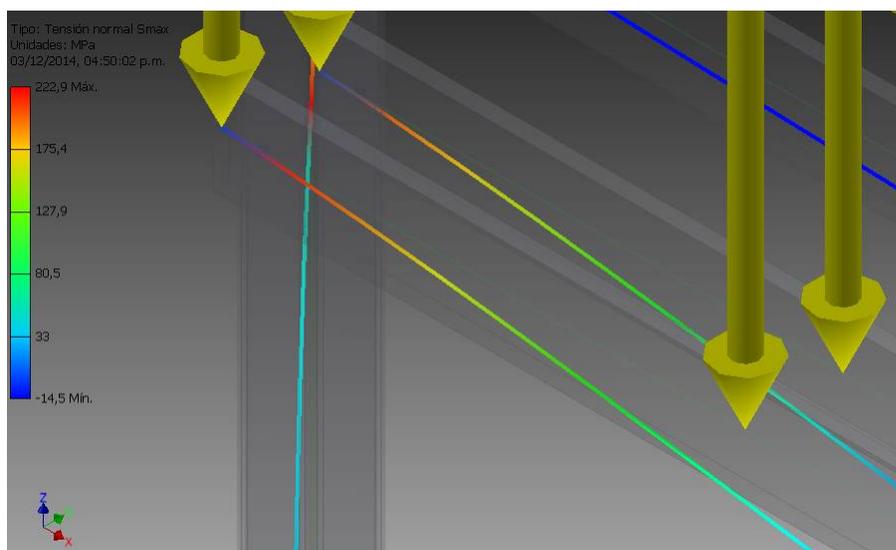
Para el análisis del pórtico se empleó un software comercial en el cual se realizó las simulaciones.



**Figura 23. Esfuerzo máximo en el pórtico sometido a una carga de 150 N.**



**Figura 24. Desplazamiento de las platinas en el pórtico sometido a una carga de 150 N.**



**Figura 25. Comportamiento de las platinas y columna a una carga de 10780 N.**

Los parámetros que se consideraron en la simulación del pórtico fue el peso propio de la estructura, que es de 40.2 kg y un peso de las platinas de 5 kg cada una con el cual se obtiene un desplazamiento de 0.15 mm.

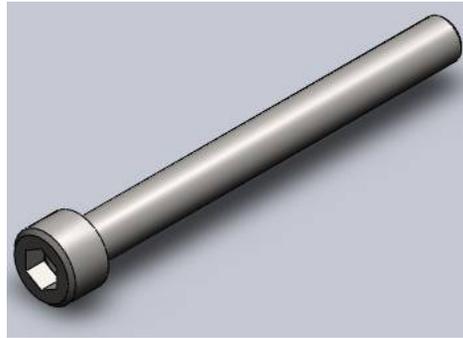
**Tabla 5**

**Factor de seguridad en el pórtico con cargas variables**

Carga aplicada (N)	Carga Aplicada (Kg)	Columna		Platina	
		Smax (MPa)	F.S	Smax (MPa)	F.S
150	15.29	5.272	47.42	4.695	58.74
500	50.97	12.43	20.11	12.125	22.75
750	76.45	17.596	14.21	15.61	17.67
1000	101.94	22.688	11.02	22	12.54
5000	509.68	104.678	2.39	92.734	2.97
6500	662.59	135.452	1.85	119.98	2.30
7200	733.94	149.84	1.67	132.73	2.08
8000	815.49	166.078	1.51	160.46	1.72
9500	968.40	196.92	1.27	189.86	1.45
9800	998.98	203.124	1.23	179.924	1.53
10200	1039.76	211.31	1.18	187.17	1.47
10780	1098.88	222.9	1.12	214.88	1.28

Como conclusión se determinó que la estructura tipo pórtico fallará con una carga superior de 1098 kg, causando en la platinas una deformación de 6.5 mm, además se determinó que primero se deformaría el tubo por aplastamiento, posteriormente se doblaría las platinas y por último colapsaría los pernos.

### **Análisis de esfuerzo cortante a los pernos**



**Figura 26. Perno cabeza allen M6x70**

Para el análisis de esfuerzo cortante que sufrirá el perno respecto a las platinas se realizó el siguiente análisis:

El esfuerzo cortante en los pernos en el caso más crítico y considerando el peso propio de la platina es de 250 N.

$$\tau = \frac{V}{A}$$

$$\tau = \frac{250 \text{ N}/8}{\pi \cdot r^2}$$

$$\tau = \frac{250 \text{ N}/8}{\pi \cdot (3)^2 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = \frac{31.25 \text{ N}}{28.27 \text{ mm}^2}$$

$$\tau = 1.105 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$\tau = 1105 \text{ KPa}$$

$$\tau_{admisible} = 0.5 \sigma_y$$

$$\tau_{admisible} = 0.5 \times 330 \text{ MPa}$$

$$\tau_{admisible} = 165 \text{ MPa}$$

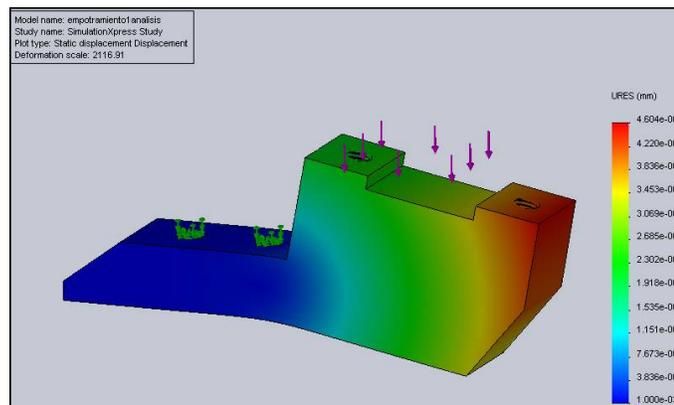
Debido a que el perno es un acero aleado con un esfuerzo de fluencia de 330 MPa, y esfuerzo admisible de corte de 165 MPa, por consiguiente se concluye que el elemento soportara las cargas, ya que el esfuerzo cortante al que se encuentra sometidos los pernos es de 1105 KPa.

Para una carga de 10780 N sometida al pórtico, el esfuerzo cortante en los pernos es de 47.65 MPa, valor con el cual se pudo concluir que los pernos no fallarán.

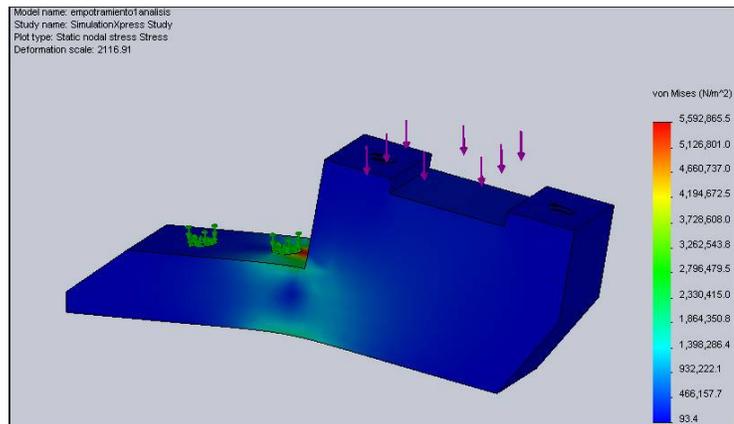
$$\tau_{cortante} < \tau_{admisible} < \sigma_{fl}$$

### **Análisis de esfuerzo cortante en el empotramiento**

Mediante el análisis realizado a la pieza de empotramiento de la estructura se determinó que la deformación sufrida al aplicar una carga de 5 kg en el área de contacto con la viga es de 0.04mm, y que el esfuerzo de Von Mises de 5.12 MPa no supera el esfuerzo de fluencia del material de duraluminio, dando un factor de seguridad  $n = 56.6$ , con el cual se estima que el material no fallará.



**Figura 27. Análisis de desplazamiento en el empotramiento**



**Figura 28. Análisis de esfuerzo de Von Mises en el empotramiento**

### 3.4 Selección de la instrumentación

#### 3.4.1. Selección de instrumentos para medición de carga

Para la selección de los instrumentos de carga se partió de la necesidad de alcanzar una capacidad de carga de al menos 5 kg con una resolución de al menos 25 g, debido a ello consideramos dos alternativas:

##### 3.4.1.1. Alternativa A: celdas de carga tipo S

Las celdas de carga tipo S son instrumentos de medición utilizados para trabajar a tensión y compresión, que soportan cargas altas que superan los 22 kg. El costo en el mercado de una celda de carga tipo S con capacidad de 25 kg está entre los 260 dólares americanos.

##### Cálculo de resolución celda de carga tipo S

$$\text{Resolución en gramos} = \frac{\text{Capacidad (g)}}{\text{Número de divisiones Máx}} = \frac{25000 \text{ g}}{3000} = 8 \text{ g}$$

### **Celda de carga Tipo S modelo 60001 marca Sensortronics**

#### Ventajas

- Tienen un diseño interno que lo hacen más resistente, posee un revestimiento resistente a la humedad además de cables blindados.
- Es idóneo para ambientes hostiles.
- El material del que está hecho la celda de carga es resistente a la corrosión.
- Funciona principalmente a tensión.
- Soporta altas cargas de presión y esfuerzos.

#### Desventajas

- No existen en el mercado modelos con capacidades de carga bajas.
- Son más costosos respecto a las celdas de carga tipo unipunto.
- Su resolución disminuye a medida que la capacidad de la celda es mayor



**Figura 29. Celda de carga tipo S marca Sensortronics**

Fuente:(Sensortronics)

#### **3.4.1.2. Alternativa B: celdas de carga tipo unipunto**

Las celdas de carga tipo unipunto trabajan con capacidades bajas de carga que oscilan entre las 5 kg hasta los 80 kg, trabajan en voladizo, colocando cargas puntuales en el extremo de la celda. El costo de una celda de carga de 10 kg de capacidad cuesta en el mercado alrededor de 113 dólares americanos.

Cálculo de resolución celda de carga Tedeo modelo 1022

$$\text{Resolución en gramos} = \frac{\text{Capacidad (g)}}{\text{Número de divisiones Max}} = \frac{10000 \text{ g}}{5000} = 2 \text{ g}$$

**Celda de carga tipo unipunto modelo 1022 marca “Tedeo”**

Ventajas

- Maneja capacidades de carga bajas que van generalmente desde los 3 kg hasta los 200 kg.
- Son celdas de carga diseñadas para un montaje fácil.
- Tiene un bajo costo y son accesibles en el mercado.
- Su tamaño es pequeño y adaptable a cualquier aplicación
- Es liviano debido a que su estructura es de aluminio.
- No implica mayor complicación su instalación y montaje.
- Buena resolución.

Desventajas

- Su estructura no es muy robusta.
- Su diseño no permite la medición de cargas altas.
- La celda de carga tipo unipunto trabaja solo en voladizo.



**Figura 30. Celda de carga tipo Unipunto marca Tedeo**

Fuente:(Tedeo)

### **3.4.1.3. Selección de la alternativa del sensor para medición de carga**

Para la selección de una de las alternativas del sensor de carga se realiza criterios de ponderación de acuerdo a las ventajas y desventajas.

### **3.4.1.4. Criterios de ponderación**

**Costos:** El factor costo tiene una gran importancia, ya que influye en la inversión que se debe hacer en el proyecto, considerando costos accesibles para su adquisición, y un producto de buena calidad que cumpla con todos los requerimientos buscados.

**Capacidad:** En el presente proyecto la capacidad es un parámetro que se debe tomar en consideración ya que se busca un instrumento de medición que satisfaga los rangos de carga necesarios para las practicas, tomando en cuenta los pesos a los cuales estarán sometidos el equipo.

**Resolución:** Es un aspecto importante ya que se busca una buena resolución para la medición de carga del equipo de flexión de vigas ya que este permitirá datos más precisos.

**Funcionalidad:** Es necesario la adquisición de un instrumento de medición de carga que sea practico y utilitario, considerando que va a trabajar a compresión y sea sencillo su instalación y manejo.

**Tiempo de vida útil:** Es importante la determinación de de la vida útil del elemento que se utilice para evitar la compra prematura de un elemento que implique una mayor inversión económica.

### 3.4.1.5. Peso específico de cada criterio

Evaluación del peso específico (ponderación) de cada criterio, ver Tabla 6.

<i>Capacidad &gt; Resolución = Tiempo de vida útil = Costo &gt; Funcionalidad</i>
<i>A: Capacidad</i>
<i>B: Resolución.</i>
<i>C: Tiempo de vida útil.</i>
<i>D: Costo.</i>
<i>E: Funcionalidad.</i>

**Tabla 6**

**Evaluación de criterios para el sistema de medición de carga**

<b>Criterio</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>	<b>E</b>	<b>Σ+1</b>	<b>Ponderación</b>
<b>A</b>		1	1	1	1	5	0,333
<b>B</b>	0		0,5	0,5	1	3	0,200
<b>C</b>	0	0,5		0,5	1	3	0,200
<b>D</b>	0	0,5	0,5		1	3	0,200
<b>E</b>	0	0	0	0		1	0,067
<b>Suma:</b>						15	1

- **Peso específico de las alternativas de selección para cada criterio del sistema de medición de carga**

Evaluación del peso específico en el criterio de capacidad, ver Tabla 7.

<i>Celda de carga tipo unipunto &gt; Celda de carga tipo S</i>
<i>A: Celda de carga tipo unipunto</i>
<i>B: Celda de carga tipo S.</i>

Tabla 7

## Evaluación del criterio de capacidad de la celda

Capacidad	B	A	$\Sigma+1$	Ponderación
B		0	1	0,333
A	1		2	0,667
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de resolución, ver Tabla 8.

*Celda de carga tipo unipunto > Celda de carga tipo S*

A: Celda de carga tipo unipunto

B: Celda de carga tipo S.

Tabla 8

## Evaluación del criterio de resolución de la celda

Resolución	B	A	$\Sigma+1$	Ponderación
B		0	1	0,333
A	1		2	0,667
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de tiempo de vida útil, ver Tabla 9.

*Celda de carga tipo S > Celda de carga tipo unipunto*

A: Celda de carga tipo unipunto

B: Celda de carga tipo S.

Tabla 9

## Evaluación del criterio de tiempo de vida útil

Tiempo de vida útil	B	A	$\Sigma+1$	Ponderación
B		1	2	0,667
A	0		1	0,333
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de menor costo, ver Tabla 10.

<i>Celda de carga tipo unipunto &gt; Celda de carga tipo S</i>	
<i>A: Celda de carga tipo unipunto</i>	
<i>B: Celda de carga tipo S.</i>	

**Tabla 10**

**Evaluación del criterio de menor costo**

Menor costo	B	A	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>B</b>		0	1	0,333
<b>A</b>	1		2	0,667
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de funcionalidad, ver Tabla 11.

<i>Celda de carga tipo unipunto &gt; Celda de carga tipo S</i>	
<i>A: Celda de carga tipo unipunto</i>	
<i>B: Celda de carga tipo S.</i>	

**Tabla 11**

**Evaluación del criterio de funcionalidad**

Funcionalidad	B	A	$\Sigma+1$	Ponderación
<b>B</b>		0	1	0,333
<b>A</b>	1		2	0,667
<b>Suma:</b>			3	1

**3.4.1.6. Selección de la alternativa para el sistema de medición de carga,  
valoración de criterios**

Cálculo de tabla de conclusiones, ver Tabla 12.

<i>A: Capacidad</i>
<i>B: Resolución.</i>
<i>C: Tiempo de vida útil.</i>
<i>D: Costo.</i>
<i>E: Funcionalidad.</i>
<i>F: Celda de carga tipo unipunto.</i>
<i>G: Celda de carga tipo S.</i>

**Tabla 12**

**Selección de la alternativa para el sistema de medición de carga**

Conclusión	A	B	C	D	E	$\Sigma$	Prioridad
<b>G</b>	0,111	0,067	0,133	0,067	0,022	0.4	2
<b>F</b>	0,222	0,133	0,067	0,133	0,044	0.599	1
<b>Suma:</b>						1	

- Según el análisis realizado la celda de carga idónea para el equipo de flexión de vigas es la de tipo unipunto, ya que obtuvo un mayor porcentaje de ponderación con un valor de 0.599 mayor al 0.4 que consiguió la celda de carga tipo S, con lo cual se logró determinar que esta será la mejor alternativa, ya que soporta cargas bajas y su resolución es muy buena a diferencia de la celda de carga tipo S, además está diseñada para trabajar a compresión y su costo resulta económico comparándolo con otros modelos, para mayor revisión de datos técnicos ver Anexo F.

### 3.4.2. Selección de instrumentos para medición de desplazamiento

Para la selección del instrumento de medición de desplazamiento se partió de la necesidad de alcanzar un rango de recorrido de entre 0 y 25 mm, con una resolución de al menos 0.1 mm, debido a ello consideramos dos alternativas:

#### 3.4.2.1. Alternativa A: Potenciómetro lineal

Los potenciómetros lineales son instrumentos de medición utilizados para medir desplazamientos cortos. El costo en el mercado de un potenciómetro lineal con un rango de desplazamiento de entre 0 a 25 mm está entre los 400 dólares.

##### **Potenciómetro lineal marca “novotechnik” modelo TR25**

###### Ventajas

- Mide el desplazamiento de cualquier material.
- Son robustos y tiene una larga vida útil.
- La señal de salida es análoga.
- La señal de salida del sensor es en voltios ideal para la conexión al PLC.
- Posee acondicionadores de señal que faciliten su manejo.
- Buena sensibilidad.
- Bajo costo.

###### Desventajas

- La estabilidad de la señal no es muy buena.
- Debido al resorte interno que posee en su diseño este proporciona una presión con su vástago al momento de estar a compresión.



**Figura 31. Sensor de desplazamiento Novotechnick**

*Fuente:(Novotechnik)*

### **3.4.2.2. Alternativa B: Sensor laser marca Sick**

Los sensores laser son utilizados para detectar elementos cercanos y medir su distancia o desplazamiento respecto a su posición. El costo en el mercado puede superar los 700 dólares.

#### **Sensor laser marca Sick**

##### Ventajas

- Buena resolución
- Posee rangos de medida mayores a los del potenciómetro lineal.
- Inmunes a las interferencia eléctricas
- Alto nivel de fiabilidad operativa
- Rápido método de medición sin contacto
- Posee salida análoga.

##### Desventajas

- Alto costo respecto a los potenciómetros lineales
- Poco robustos
- El mantenimiento de los lentes ópticos debe ser periódico
- Son sensores delicados que merecen el cuidado en su manipulación.
- Soportan temperaturas de trabajo menores a las de los potenciómetros.



**Figura 32. Sensor de desplazamiento laser marca Sick**

Fuente:(Sick)

### **3.4.2.3. Selección de la alternativa del sensor para la medición de desplazamiento**

Para la selección de una de las alternativas del sensor de desplazamiento se realiza criterios de ponderación de acuerdo a las ventajas y desventajas, a continuación se desarrollará el correspondiente análisis.

### **3.4.2.4. Criterios de ponderación**

**Costo:** Se necesita un sensor que no implique una mayor inversión económica, pero a su vez satisfaga las necesidades del proyecto.

**Rango de desplazamiento:** Es necesario un sensor que mida rangos cortos de desplazamiento que alcance al menos los 25 mm de recorrido.

**Resolución:** Es un factor importante en la elección del sensor ya que se busca un sensor que tenga una resolución de al menos 0.1 mm.

**Robustez:** La robustez es un parámetro en el que interviene la resistencia del sensor a las posibles caídas o golpes.

**Resistencia al medio ambiente:** Para la elección del instrumento de medición de desplazamiento se debe considerar la resistencia que este ofrece a un entorno adverso como humedad, temperatura o presencia de polvo o suciedad.

### 3.4.2.5. Peso específico de cada criterio

Evaluación del peso específico (ponderación) de cada criterio de evaluación, ver Tabla 13.

<i>Resolución &gt; Robustez = Rango de desplazamiento = Resistencia al medio ambiente &gt; Costo</i>
<i>A: Resolución</i>
<i>B: Robustez.</i>
<i>C: Rango de desplazamiento.</i>
<i>D: Resistencia al medio ambiente.</i>
<i>E: Costo.</i>

**Tabla 13**

**Evaluación de criterios para el instrumento de medición de desplazamiento**

Criterio	A	B	C	D	E	$\sum+1$	Ponderación
<b>A</b>		1	1	1	1	5	0,333
<b>B</b>	0		0,5	0,5	1	3	0,200
<b>C</b>	0	0,5		0,5	1	3	0,200
<b>D</b>	0	0,5	0,5		1	3	0,200
<b>E</b>	0	0	0	0		1	0,067
<b>Suma:</b>						15	1

- **Peso específico de las alternativas de selección para cada criterio del sensor de desplazamiento**

Evaluación del peso específico en el criterio de Resolución, ver Tabla 14.

<i>Potenciómetro lineal &gt; Sensor laser</i>
<i>A: Sensor - potenciómetro lineal</i>
<i>B: Sensor laser.</i>

**Tabla 14****Evaluación del criterio de resolución del sensor**

Resolución del sensor	A	B	$\sum+1$	Ponderación
A		1	2	0,667
B	0		1	0,333
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de Robustez, ver Tabla 15.

<i>Potenciómetro lineal &gt; Sensor laser</i>
<i>A: Sensor – potenciómetro lineal.</i>
<i>B: Sensor laser.</i>

**Tabla 15****Evaluación del criterio de robustez**

Robustez del sensor	A	B	$\sum+1$	Ponderación
A		1	2	0,667
B	0		1	0,333
<b>Suma:</b>			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de desplazamiento del sensor, ver

Tabla 16.

<i>Sensor laser &gt; Sensor – potenciómetro lineal</i>
<i>A: Sensor –potenciómetro lineal.</i>
<i>B: Sensor laser.</i>

Tabla 16

## Evaluación del criterio de desplazamiento del sensor

Rango de desplazamiento	A	B	$\Sigma+1$	Ponderación
A		0	1	0,333
B	1		2	0,667
Suma:			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de resistencia al medio ambiente,

ver Tabla 17.

<i>Potenciómetro lineal &gt; Sensor laser</i>
<i>A: Potenciómetro lineal.</i>
<i>B: Sensor laser.</i>

Tabla 17

## Evaluación del criterio de resistencia al medio ambiente

Resistencia al medio ambiente	A	B	$\Sigma+1$	Ponderación
A		1	2	0,667
B	0		1	0,333
Suma:			3	1

Evaluación del peso específico en el criterio de menor costo, ver Tabla 18.

<i>Potenciómetro lineal &gt; Sensor laser.</i>
<i>A: Potenciómetro lineal.</i>
<i>B: Sensor laser.</i>

**Tabla 18**  
**Evaluación del criterio de menor costo**

Menor Costo	A	B	$\Sigma+1$	Ponderación
A		1	2	0,667
B	0		1	0,333
<b>Suma:</b>			3	1

**3.4.2.6. Selección de la alternativa para el sistema de medición de desplazamiento, valoración de criterios**

Calculo de tabla de conclusiones, ver Tabla 19.

<i>Resolución &gt; Robustez= Rango de desplazamiento = Resistencia al medio ambiente &gt; Costo</i>
<i>A: Resolución</i>
<i>B: Robustez.</i>
<i>C: Rango de desplazamiento.</i>
<i>D: Resistencia al medio ambiente.</i>
<i>E: Costo.</i>
<i>F: Potenciómetro lineal</i>
<i>G: Sensor laser</i>

**Tabla 19**  
**Selección de la alternativa del sensor de desplazamiento**

Conclusión	A	B	C	D	E	$\Sigma$	Prioridad
F	0,222	0,133	0,067	0,133	0,044	0,600	1
G	0,111	0,067	0,133	0,067	0,022	0,400	2
<b>Suma:</b>						1	

- Según el análisis realizado el sensor idóneo para el equipo de ensayo de flexión de vigas es el potenciómetro lineal, ya que obtuvo un mayor porcentaje de ponderación de 0.6 mayor al obtenido por el sensor laser con 0.4, con lo cual se logró determinar que esta será la mejor alternativa , ya que posee una buena resolución, sus rangos de medida son los más cercanos a los buscados en el equipo, su estructura es robusta y resistente a entornos adversos y su costo no representa mayor inversión, para mayor datos técnicos ver Anexo F.

### 3.5 Diseño del control

#### 3.5.1. Selección del PLC

Para realizar la selección del PLC se requiere saber el número de entradas y salidas para el sistema, las cuales se describen en la tabla 20.

**Tabla 20**

#### **Número de entradas y salidas necesarias para el PLC**

ENTRADAS	SALIDAS
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entrada para celda de carga uno.</li> <li>• Entrada para celda de carga dos.</li> <li>• Entrada para celda de carga tres.</li> <li>• Entrada para medicion de desplazamiento con potenciómetro lineal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No existen salidas necesarias para el PLC.</li> </ul>

A partir de la tabla 20, se observa que se requiere un PLC con 4 entradas analógicas para la medición de cargas y desplazamientos de los sensores, además no es necesario salidas puesto que el equipo será utilizado solo para adquisición de datos.

**3.5.1.1. Para la selección del PLC se consideraron dos alternativas.**

**3.5.1.2. Alternativa A: PLC “Siemens S7-1200” 1212C**

Los PLC de marca “Siemens” son de procedencia alemana, utilizados frecuentemente en la industria por su amplia gama de productos y aplicaciones que ofrece. El costo en el mercado de un PLC “Siemens”, el más básico alcanza los 400 dólares.(Siemens, Siemens Industry)

**PLC Siemens S7-1200 modelo 1212C, AC/DC/RLY**

Ventajas

- Mayor capacidad de producción debido a la CPU de alta velocidad.
- Su programación es amigable a diferencia de otros PLC.
- Mayor información disponible para la programación del CPU.
- Son equipo robustos y compactos ideales para entornos de trabajo pesados.
- Memoria de 50KB.

Desventajas

- Alto costo en el mercado.
- Posee tan solo 2 entradas analógicas.



**Figura 33. PLC Siemens modelo 1212C, AC/DC/RLY**

Fuente:(Siemens, Siemens Industry)

### 3.5.1.3. Alternativa B: PLC Delta

Los PLC de marca “Delta” son de procedencia japonesa, su costo en el mercado es de aproximadamente 300 dólares.

#### PLC “Delta” modelo DVP20EX

##### Ventajas

- Posee 4 entradas analógicas
- Menor costo respecto al PLC “Siemens”
- Alto desempeño y velocidad en su respuesta.

##### Desventajas

- Su programación representa mayor dificultad debido al lenguaje que maneja.
- No existe mucha información o tutoriales para la programación.
- No soy muy robustos.
- No posee mayor prestigio su marca a diferencia de la Siemens.
- Menor memoria de almacenamiento
- Menor resolución



**Figura 34. PLC Delta**

Fuente:(Delta)

#### **3.5.1.4. Selección del PLC**

Basándose en los datos obtenidos y al considerar las ventajas y desventajas que cada equipo ofrece, se escogió el PLC Siemens S7-1200 modelo 1212C, AC/DC/RLY, ya que sin importar el costo, el beneficio que el equipo ofrece al tener mayor capacidad y resolución y una programación más accesible que otros lenguajes de otros PLCs, es idóneo para satisfacer nuestras necesidades, para mayor datos técnicos ver Anexo F.

#### **3.5.2. Selección de módulo de expansión de PLC**

Debido a la selección del PLC 1212C, y de sus especificaciones técnicas como son las de 8 entradas digitales de 24Vdc, 6 salidas digitales tipo relé, y tan solo dos entradas analógicas de 0 a 10 Vdc, se requiere un módulo de expansión que permita alcanzar las 4 entradas analógicas necesarias para nuestras 3 celdas de carga y el sensor de desplazamiento.

El módulo de expansión elegido es el SM1231 de marca Siemens, que posee 4 entradas analógicas compatible con el modelo de PLC y con las siguientes características:

Tabla 21

## Especificaciones técnicas del SM 1231

Número de entradas analógicas	• Permite la conexión directa de sensores.
Tensión de alimentación Valor nominal	• 24 V DC
Rango de entrada de corriente	• 0 a 20 mA
Rango de entrada de voltaje	• 0 a 10 V DC
Resolución	• 14 bits de resolución y diferentes rangos de entrada permiten la conexión de sensores sin amplificador.



Figura 35. PLC 1212C y módulo de expansión Siemens SM1231

## 3.5.3. Selección de la HMI

Para la visualización de los datos de la práctica es necesaria una HMI, ya que presentará de forma inmediata los valores censados, por ello para la elección se

consideró parámetros importantes como son marca, tamaño de la pantalla y el tipo de conexión.

La HMI escogida es la KTP400 marca Siemens que cumple con todos los requerimientos buscados, que posee una pantalla de 3.8 pulgadas monocromática, con conexión Ethernet, con 4 teclas para sus funciones, además de una pantalla táctil para su cómoda utilización, para mayores especificaciones técnicas ver Anexo F.



**Figura 36. HMI Siemens modelo KTP 400**

#### **3.5.4. Sistema de acondicionamiento de las celdas de carga**

En el equipo de ensayo de flexión de vigas, el principio de la práctica es conocer la deformación que sufre una viga a una determinada carga, motivo por el cual es necesario obtener las reacciones de cada uno de los apoyos en los que estará ubicada la viga.

Las celdas de carga seleccionadas para el equipo son marca Tedeo tipo unipunto que envían señales bajas de  $2\text{mV/V}$ , por ello es indispensable la adquisición de 3 tarjetas analógicas, una para cada celda de carga, ya que permitirá amplificar la señal

de cada una de las celdas de forma independiente y enviar una señal idónea al PLC para su posterior procesamiento.

#### **3.5.4.1. Selección de tarjetas analógicas**

La función de las tarjetas analógicas es acondicionar una señal, por ello para la selección de las tarjetas se consideró dos parámetros importantes como son: la señal de salida de la celda y el tipo de señal que acepta el PLC.

Dadas las características técnicas del PLC Siemens S7-1200 modelo 1212C y las celdas de carga marca Tedeo, se seleccionó un convertor genérico análogo modelo “EX1”, con salida de 4-20 mA, cuya alimentación es de 12Vdc ideal para los equipos antes mencionados.

Es importante señalar que este tipo de tarjeta analógica permite una calibración fina, además de poseer una buena estabilidad que ofrece una mejor señal para la posterior programación en el PLC.



**Figura 37. Tarjeta analógica con salida de 4-20 mA**

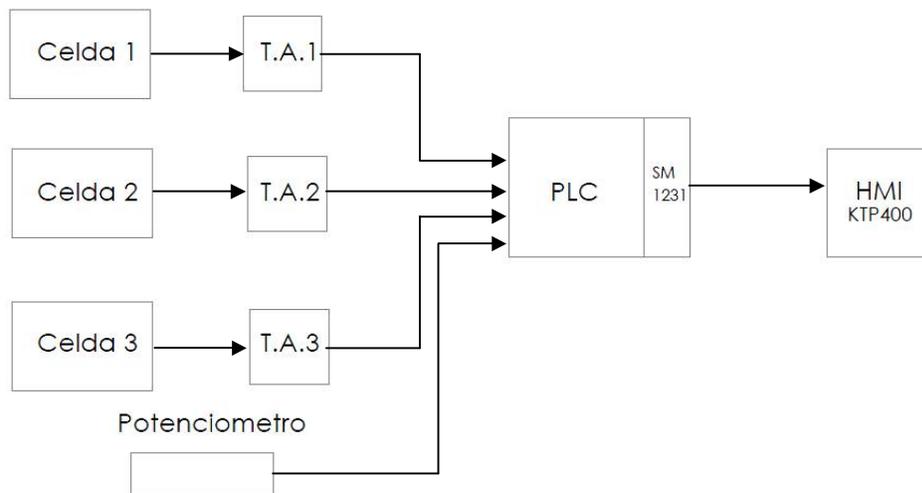
Fuente: (Ingelsoft)

### **3.6 Programación de PLC y la HMI**

#### **3.6.1. Programación PLC**

Para la programación del PLC Siemens 1212C se utilizó un software llamado “TIA Portal V12”, un programa de la Siemens que ofrece la programación de todos los controladores S7-1200. El método de programación empleado para la adquisición de datos de las celdas de carga y sensor de desplazamiento fue diagrama de escalera (Ladder).

La programación se realizó en dos partes, la primera consta con la programación de las celdas de carga y la segunda con el potenciómetro lineal.



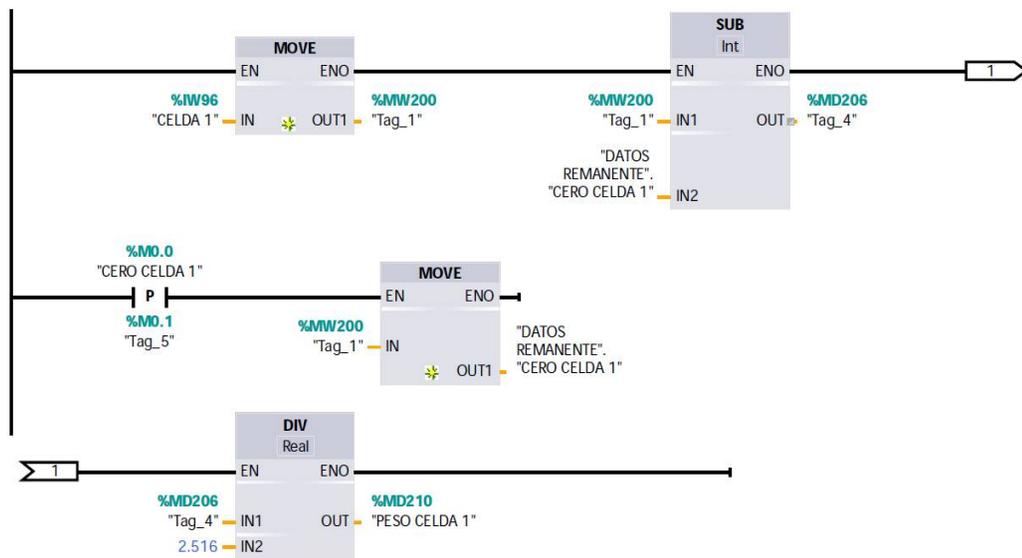
**Figura 38. Diagrama de proceso para la adquisición de datos**

### 3.6.1.1. Programación de las celdas de carga

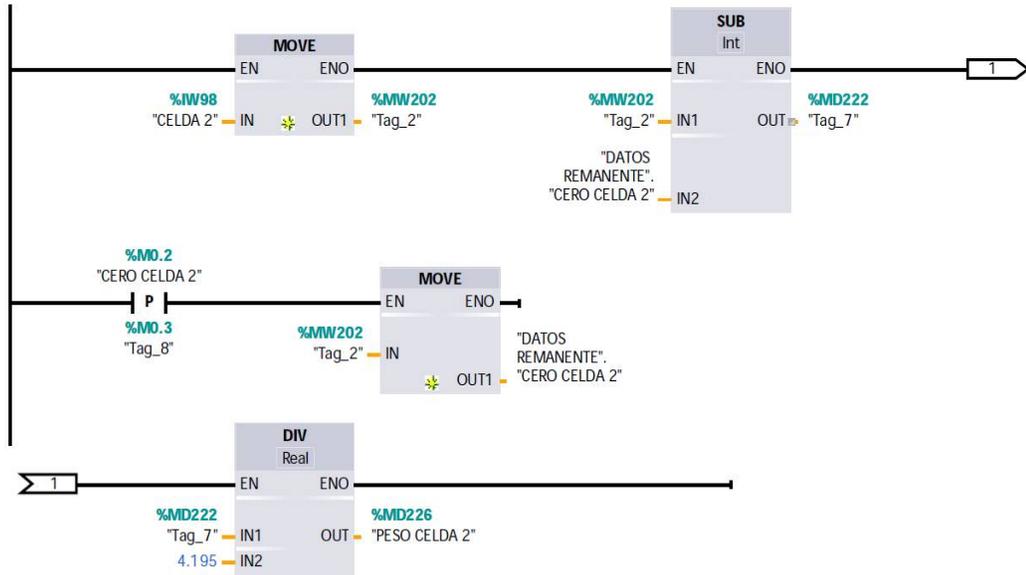
La programación realizada en cada una de las celdas de carga consta de 3 etapas, recepción, enceramiento y calibración, a continuación se detalla los pasos realizados:

1. Se carga el valor de entrada de la señal de la celda en una variable interna del PLC, para aquello se utiliza el comando Move.
2. La variable asignada en el PLC que guarda la información de la celda se resta con el valor de carga inicial permitiendo el enceramiento, para aquello se utiliza el comando Sub.

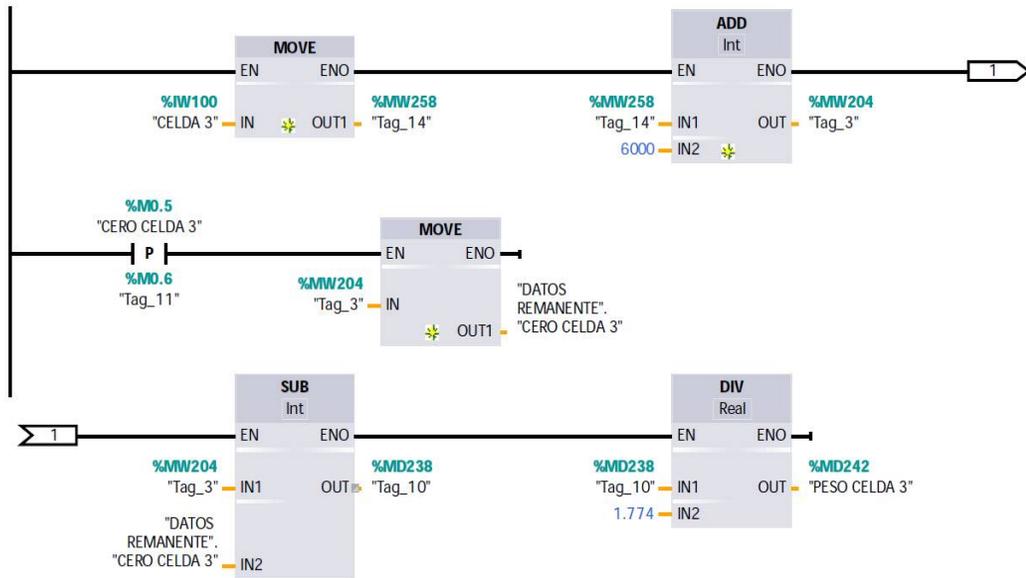
3. Se coloca el botón para encerrar la celda de carga con la dirección correspondiente.
4. Se realiza la calibración de la celda al dividir la señal final de la celda receptada por el PLC para una constante dando lugar al peso en gramos, para ello se utiliza el comando Div.



**Figura 39. Desarrollo de la programación de la celda de carga 1 en el software TIA portal V12**



**Figura 40. Desarrollo de la programación de la celda de carga 2 en el software TIA portal V12.**



**Figura 41. Desarrollo de la programación de la celda de carga 3 en el software TIA portal V12**

Para la calibración de las celdas de carga se realizó varias pruebas y toma de datos, para determinar un factor, que es una constante divisible a la señal de la celda y que determina el peso final en gramos.

$$\text{Peso de celda de carga}(g) = \frac{\text{Señal de celda de carga}}{\text{Constante}}$$

Se ha determinado que para la celda de carga 1 el factor divisor para obtener el peso real al cual está sometida es de 2.516, mientras que para la CC 2 es de 4.195 y para la CC3 es de 1.774, ver tabla 22.

La constante se determinó realizando un promedio de los factores obtenidos en cada prueba.

**Tabla 22**  
**Pruebas de calibración de celdas**

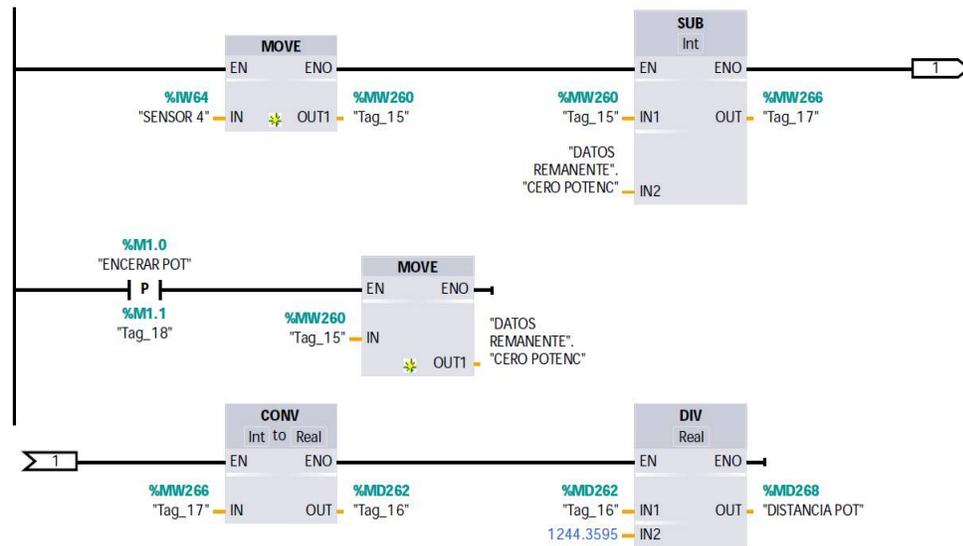
Celdas de carga	Peso						Promedio factores
	200 gramos		500 gramos		1000 gramos		
	Señal	Factor	Señal	Factor	Señal	Factor	
CC1	504	2.52	1256	2.512	2516	2.516	2.516
CC2	844	4.22	2096	4.192	4195	4.192	4.195
CC3	356	1.775	887	1.774	1773	1.773	1.774

### 3.6.1.2. Programación del potenciómetro lineal

Para la programación del potenciómetro lineal se realizó los siguientes pasos:

1. Se carga el valor de entrada de la señal del potenciómetro en una variable interna del PLC, para aquello se utiliza el comando Move.
2. La variable asignada en el PLC que guarda la información del potenciómetro se resta con el valor de carga inicial permitiendo el enceramamiento, para aquello se utiliza el comando Sub.
3. Se coloca el botón para encerar el desplazamiento del potenciómetro.
4. Se convierte la señal final del potenciómetro de enteros a reales para manejar valores más precisos, para aquello se utilizó el comando Conv.

5. Se realiza la calibración de la celda al dividir la señal final del potenciómetro lineal receptada por el PLC para una constante dando lugar al desplazamiento en mm, para ello se utiliza el comando Div.



**Figura 42. Desarrollo de la programación del potenciómetro lineal en el software STEP 7 Basic**

Para la calibración del potenciómetro lineal al igual que las celdas de carga se realizó varias pruebas para determinar un factor divisible para la señal de entrada, logrando así el desplazamiento real del sensor, con una resolución de una centésima de milímetro, es importante conocer que los sensores fueron calibrados una vez terminado el equipo y montada la parte eléctrica y electrónica.

$$Desplazamiento(mm) = \frac{\text{Señal del potenciómetro lineal}}{\text{Constante}}$$

Se ha determinado que la constante a la cual debe ser dividido la señal del potenciómetro es de 1244,3595, ver tabla 23.

Tabla 23

## Pruebas de calibración del potenciómetro lineal

	Señal	Desplazamiento (mm)	Factor
Prueba 1	11741	9.55	1229.42408
Prueba 2	17882	14.2	1259.29577
Prueba 3	16502	13.26	1244.3588
		Promedio	1244.35955

## 3.6.2. Sistema de visualización de la información en la HMI.

En el equipo de flexión de vigas la HMI muestra una pantalla inicial con los datos generales del equipo, ver figura 43.

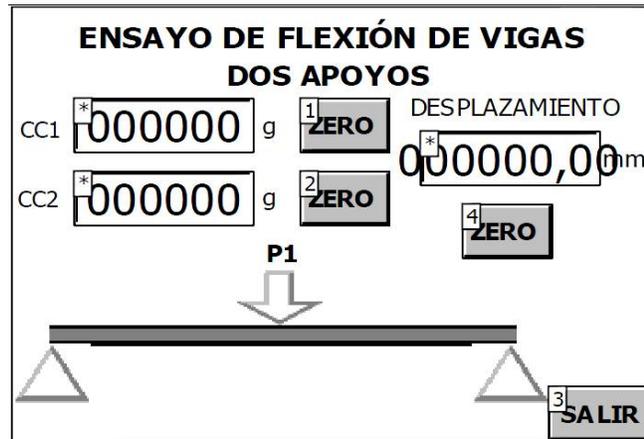


Figura 43. Pantalla principal de la HMI

Posteriormente al presionar la tecla siguiente se despliega una pantalla secundaria que muestra el tipo de ensayo que se desea realizar, en la que aparecen opciones como: dos apoyos, dos apoyos un empotramiento, tres apoyos y tres apoyos un empotramiento.

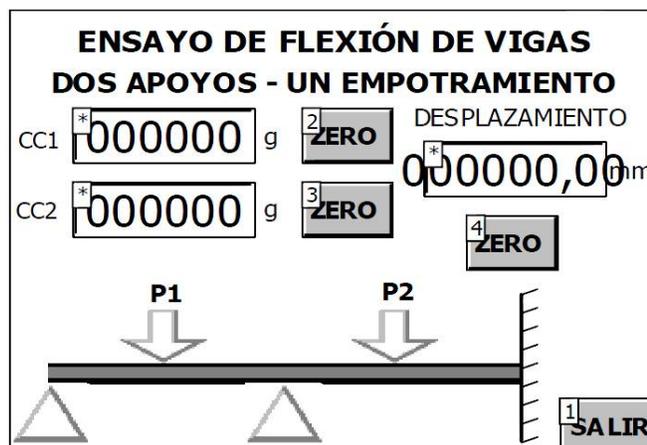
En la opción número uno que corresponde al tipo de ensayo de dos apoyos aparece el valor obtenido de las celdas de carga 1 y 2 al igual que el valor del desplazamiento y su respectivo botón de enceramiento. La simbología que se utilizó

para representar a las celdas de carga es la de “CC” y los valores de carga obtenidos son en gramos, mientras que en el desplazamiento son en milímetros. Una figura en la parte inferior de la pantalla ilustra el tipo de ensayo, ver figura 44.



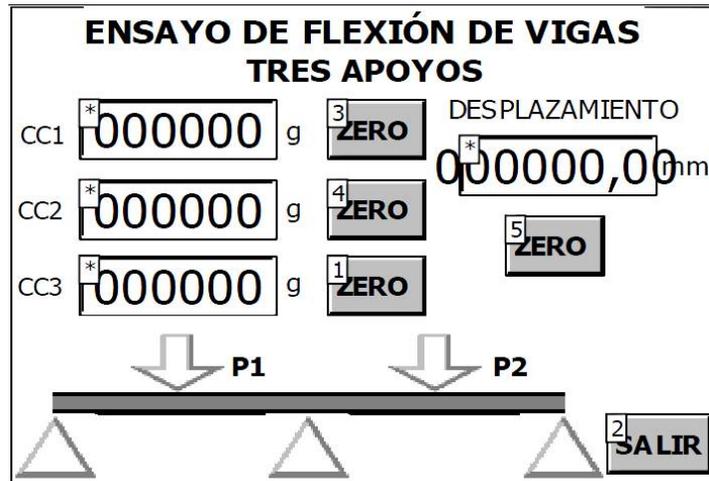
**Figura 44. Pantalla mostrada en el tipo de ensayo de dos apoyos**

En la opción número dos que corresponde al tipo de ensayo de dos apoyos un empotramiento, al igual que en la opción número uno aparecen los valores obtenidos de las celdas de carga 1 y 2 y el desplazamiento del potenciómetro lineal. Una figura en la parte inferior de la pantalla ilustra el tipo de ensayo, ver figura 45.



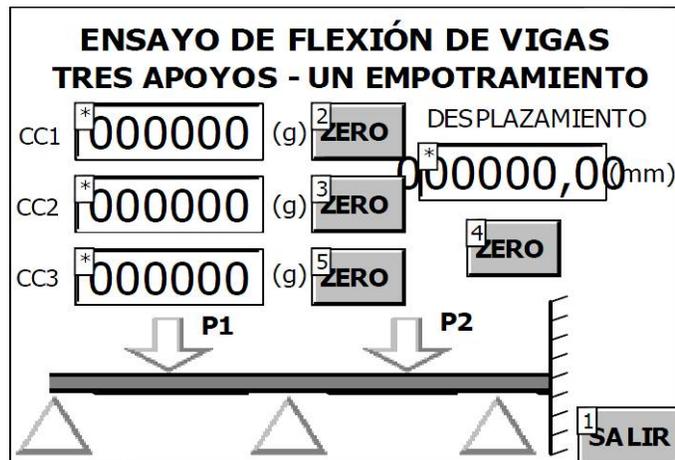
**Figura 45. Pantalla mostrada en el tipo de ensayo de dos apoyos un empotramiento**

En la opción número tres que corresponde al tipo de ensayo de tres apoyos intervienen los valores de las tres celdas de carga, CC1, CC2, CC3, junto con el valor del desplazamiento, ver figura 46.



**Figura 46. Pantalla mostrada en el tipo de ensayo de tres apoyos**

En la cuarta opción que presenta la HMI tenemos el ensayo de tres apoyos un empotramiento, en la que intervienen los valores de las tres celdas de carga y del potenciómetro lineal, además de una figura que ilustra en qué posición debe estar colocado el empotramiento ver figura 47, es importante acotar que cada una de las pantallas posee un botón de “salir” que permite regresar a la selección del tipo de ensayo de flexión de vigas.



**Figura 47. Pantalla mostrada en el tipo de ensayo de tres apoyos un empotramiento**

### 3.7 Selección de fuentes de alimentación

#### 3.7.1. Selección de fuente de alimentación de PLC

Dadas las especificaciones técnicas del PLC Siemens 1212C –AC/DC/RLY, es necesario una fuente de alimentación que cumpla las siguientes características:

- Voltaje de entrada en AC sea de 110 o 220.
- Voltaje de Salida en DC sea de 24.
- Corriente de salida no debe superar los 4 A.
- Frecuencia de entrada de la fuente debe ser 60 HZ.

Según los requerimientos mostrados la fuente de marca DELTA es la idónea para la alimentación del PLC, ya que posee un rango nominal de entrada de 100-240 Vac, voltaje de salida de 24 Vdc, corriente de salida 2.5 A y su frecuencia nominal de entrada es de 50 a 60 HZ, además es una de las marcas más prestigiosas a nivel industrial.(Varitel)



**Figura 48. Fuente marca Delta 24Vdc/60W/1Fase**

Fuente:(DELTA)

### **3.7.2. Selección de fuente de alimentación de tarjetas analógicas y sensores**

En el equipo de ensayo de flexión de vigas para la alimentación de las tarjetas analógicas y consecuentemente de las celdas de carga y el sensor de desplazamiento, es necesaria la adquisición de una fuente de poder adicional que cumpla las siguientes características:

- Voltaje de Salida en DC sea de 12.
- Voltaje de entrada en AC sea de 110 o 220 o 24Vdc
- Frecuencia de entrada de la fuente debe ser 60HZ.
- Corriente de salida no debe superar los 4 A.

Es importante conocer que este tipo de fuentes se puede construir utilizando un circuito sencillo con un regulador de voltaje, sin embargo por protección de los sensores se encontró necesaria la compra de una fuente industrial para mayor seguridad del equipo. Debido a ello se optó por la adquisición de una fuente marca

Q&W que posee 12 Vdc de salida, corriente de salida de 2A, y su entrada es de Vac de 85-264 o Vdc de 120-370.



**Figura 49. Fuente de Poder marca Q&W 12Vdc modelo DR30-12**

### **3.8 Planos de detalle y conjunto**

Los planos del equipo de flexión de vigas en detalle y conjunto se encuentra en el Anexo A y Anexo B.

## CAPÍTULO 4

### 4. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE

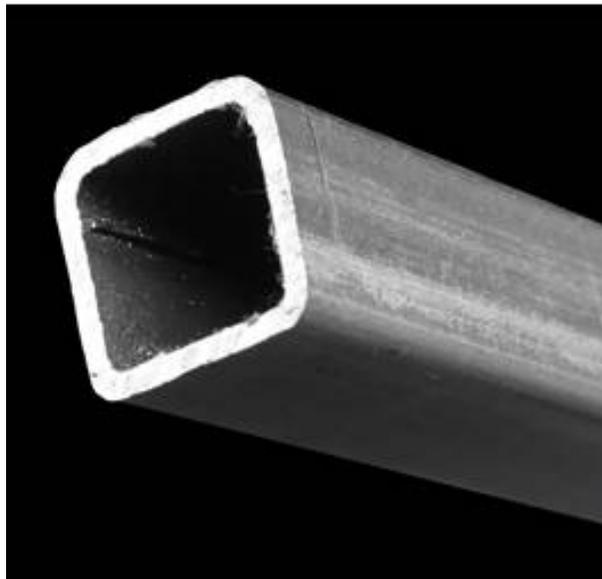
#### 4.1 Elaboración de diagrama de operaciones estructura

El diagrama de operaciones de la estructura se encuentra en el anexo D.

#### 4.2 Selección de materiales

Para la selección de materiales de la estructura se consideraron varios aspectos como los materiales disponibles en el mercado, cargas que soportarán, tipo de material y costo.

Debido a que las cargas que soportará la estructura no supera los 15 kg, y no va a sufrir mayor esfuerzo, se decidió para la construcción de los pilares del pórtico comprar 6 metros de tubos cuadrados de 40x40 mm y 3 mm de espesor, de material acero ASTM A36.



**Figura 50. Tubos cuadrados de 40x40 mm**

*Fuente:(Dipac)*

Para el mecanismo de transporte de las celdas de carga y potenciómetro lineal se decidió adquirir platinas de acero aleado bohler V945 para formar correderas y poder desplazar de un lugar a otro los sensores de carga y desplazamiento, para ello se compro 6 metros de platinas de 50 mm de ancho y 9 mm de espesor.



**Figura 51. Platinas de 50 mm de ancho y 9 mm de espesor**

*Fuente:(Dipac)*

#### **4.3 Procesos de manufactura**

Para la construcción de la estructura fue necesario realizar varios procesos de manufactura, los cuales se detalla a continuación.

##### **Fresadora de torreta**

Con la fresadora de torreta se procedió el desbaste de las platinas con la finalidad de tener caras paralelas y con una superficie lisa que permita el desplazamiento idóneo de los porta sensores como también evitar alteraciones en la toma de datos del equipo.



**Figura 52. Fresadora de torreta**

### **Taladro fresador**

Para el maquinado de los porta celdas, formado por materiales como duralón y duraluminio se utilizó el taladro fresador, así como para la elaboración de los apoyos rectangulares y triangulares de las celdas de carga y del coche en el que se encuentra empotrado el potenciómetro lineal.



**Figura 53. Maquinado de perfiles en C**

### Sierra de disco

Para el corte de tubos y platinas se utilizó la sierra de disco permitiendo hacer cortes rápidos y precisos.



**Figura 54. Sierra de corte**

*Fuente: (Bosch)*

## 4.4 Construcción y montaje de la estructura

### 4.4.1. Construcción de partes de la estructura

A continuación se realiza una descripción detallada de los pasos ejecutados para la construcción de la estructura:

#### Elemento 1 - Pilar izquierdo de la estructura

1. Para la construcción del pilar izquierdo del pórtico se realizó corte de tubos cuadrados de 600 y 1210 mm.
2. El tubo de 1210 mm se suelda verticalmente en el centro del tubo de 600 mm que se coloca horizontalmente para formar el soporte o pata de la estructura.
3. Se suelda ángulos en L de 40x40 mm de 4 mm de espesor y 40 mm de ancho en las uniones de la base del pilar.

4. Se taladra el extremo superior de la columna del pilar 4 agujeros de 6 mm de diámetro para el montaje posterior de las platinas.

Nota: Para el procedimiento de soldadura se empleó electrodos SMAW-E6011.



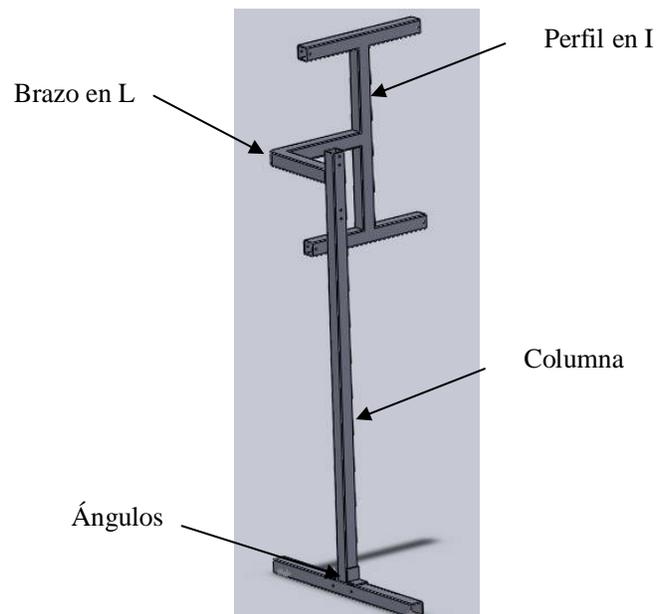
**Figura 55. Pilar izquierdo de la estructura**

Elemento 2 - Pilar derecho de la estructura

1. Se realiza corte de tubos cuadrados de 600 y 1210 mm.
2. El tubo de 1210 mm se suelda verticalmente en el centro del tubo de 600 mm que se coloca horizontalmente para formar el soporte o pata de la estructura.
3. Se sueldan ángulos en L de 40x40 mm con espesor de 4 mm y ancho de 40 mm en las uniones de la base reforzando el pilar.
4. Se taladra 4 agujeros de 6 mm de diámetro en el extremo superior de la columna.
5. Para el empotramiento del panel de control se suelda un brazo en L hecho de tubos cuadrados de 250 x 290 mm en el extremo superior de la columna.

6. Se utiliza tubos cuadrados de 40x40 mm, para formar un perfil en I con alas de 390 mm de largo y un alma de 510 mm que va soldado en el extremo del brazo.

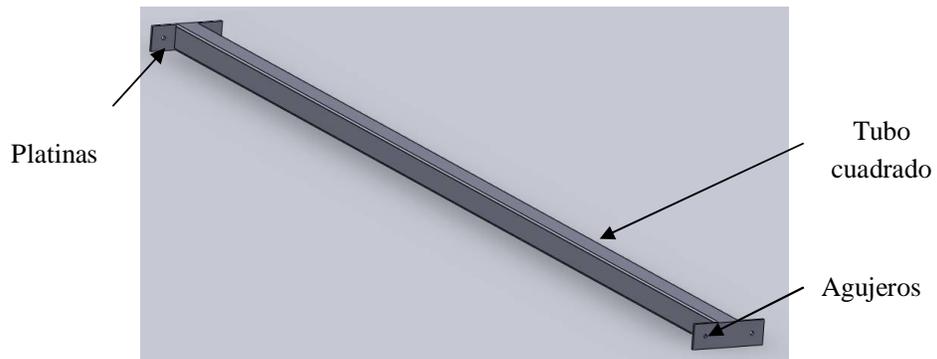
Nota: Para el procedimiento de soldadura se empleó electrodos SMAW-E6011.



**Figura 56. Pilar derecho de la estructura**

Elemento 3 – Base transversal de estructura

1. Se cortó un tubo cuadrado de 1720 mm de longitud.
2. Se cortó dos platinas de 40x4 mm de sección transversal y una longitud de 120 mm.
3. Se soldó las platinas en los extremos del tubo cuadrado.
4. Se taladra en los extremos de las platinas agujeros de 6mm de diámetro



**Figura 57. Base transversal de la estructura**

Elemento 4 – Platinas

1. Se realizó el corte de tres platinas de 1.80 m de largo.
2. Fresado de platinas.
3. Se taladra agujeros de 6mm de diámetro en los extremos de las platinas.



**Figura 58. Platinas de acero aleado bohler V945**

**4.4.2. Montaje de la estructura**

Para el montaje de la estructura se utilizaron pernos M6x50, M6x60 y M6x70, con los cuales se pudieron realizar ensambles tales como:

- Ensamble del tablero de control al brazo del pilar derecho del pórtico.
- Ensamble de la base transversal a los pilares.
- Ensamble de las platinas a los pilares.

Para ello, el primer paso que se realizó fue el empernar ambos pilares en los extremos de la base transversal, utilizando arandelas a la medida y tuercas para mayor fijación, posteriormente se colocaron las platinas en el extremo superior de las columnas, como también se insertaron regatones de caucho en los extremos libres de los tubos cuadrados.



**Figura 59. Estructura tipo pórtico**

#### **4.5 Ensamble del sistema eléctrico, electrónico y control.**

El ensamble del sistema eléctrico, electrónico y de control se lo realizó en un tablero de control de 40 cm de ancho 60 cm de alto y 20 cm de profundidad.

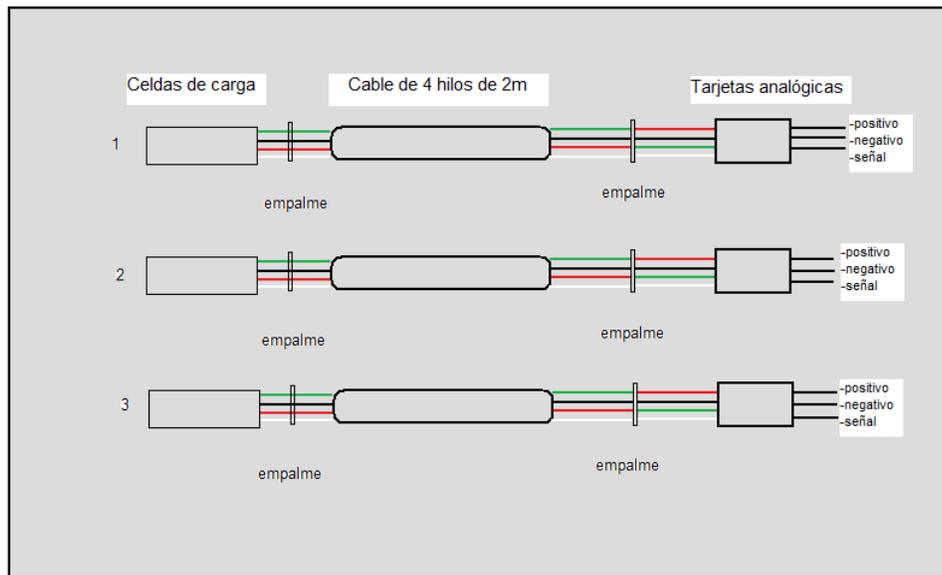
##### **4.5.1. Sistema eléctrico**

El sistema eléctrico del equipo de flexión de vigas consta de un cable gemelo de 300V de 1.50 m de largo con conector en un extremo, conectado a un braker de dos polos de 4 A marca Siemens, posteriormente a la salida del braker se conecta con cables número 18 una fuente de alimentación Marca DELTA con salida de 24Vdc, que permite la alimentación del PLC SiemensS7-1200, una fuente de 12Vdc y a su vez las tarjetas analógicas y sensores.

#### 4.5.2. Sistema electrónico

Para las conexiones de la parte electrónica del equipo de flexión de vigas se utilizaron 8 metros de cable de 4 hilos, a continuación se detalla las conexiones realizadas:

##### Celdas de carga- Tarjetas analógicas



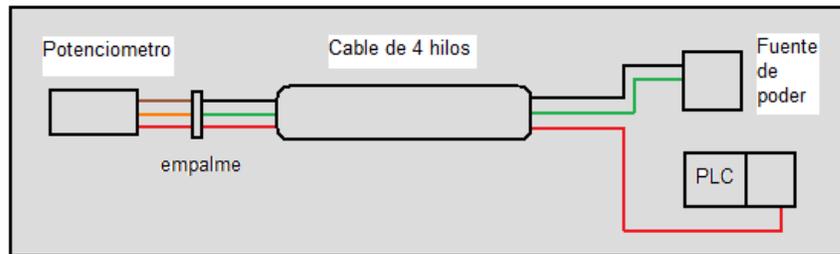
**Figura 60. Conexiones de celdas de carga con tarjetas analógicas**

**Tabla 24**

##### **Codificaciones de los cables de celdas y tarjetas analógicas**

<i>Señal de Salida de celda de carga</i>	<i>Señal de entrada de tarjeta analógica.</i>	<i>Salida tarjeta analógica</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verde: Excitación positiva</li> <li>• Negro: Excitación negativa</li> <li>• Rojo: Señal positiva</li> <li>• Blanco: Señal negativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rojo Excitación positiva</li> <li>• Negro: Excitación negativa</li> <li>• Verde: Señal positiva</li> <li>• Blanco: Señal negativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Rojo-Positivo: Conexión a fuente de 12Vdc.</li> <li>• Negro-Negativo: Conexión a fuente de 12 Vdc.</li> <li>• Verde-Señal: Conexión a modulo de expansión.</li> </ul>

### Potenciómetro lineal- PLC



**Figura 61. Conexión de potenciómetro lineal a PLC**

**Tabla 25**

#### Codificación de los cables del potenciómetro

<i>Señal de Salida de potenciometro lineal</i>	<i>Fuente de poder</i>	PLC
<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cafe: Excitación positiva</li> <li>•Tomate: Excitación negativa</li> <li>•Rojo: Señal del sensor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Negro: Positivo</li> <li>•Verde: Negativo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rojo: Señal del sensor</li> </ul>

Es importante conocer que se utilizaron 28 borneras que ayudaron a la conexión de los sensores, así como también ferrules para los cables permitiendo una mejor conexión, ver anexo C para la descripción de los planos eléctricos del equipo.

#### 4.5.3. Sistema de control

Dentro del ensamble para el sistema de control del equipo se utilizó un panel formado de regletas empotradas a un tablero que sirvieron para la fijación de elementos como PLC, braker, fuentes de poder, tarjetas analógicas, etc.

Para la conexión de PLC a la HMI se utilizó un cable de red de 1m de largo que permitió la comunicación directa, así como también se amplió el número de canales analógicos de E/S al PLC.

**Tabla 26**  
**Especificaciones técnicas módulo SM1231**

Módulos de señales	SM 1231 AI
	AI 4 X 13 BIT
Entrada analógica	$\pm 10$ V DC, $\pm 5$ V DC, $\pm 2.5$ V DC o 0-20 mA



**Figura 62. Representación gráfica de comunicación PLC y módulo**

*Fuente:(Siemens, Siemens Industry)*

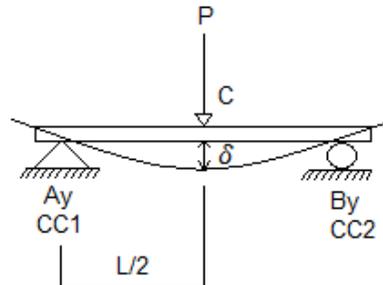
#### 4.6 Pruebas

Los tipos de pruebas a realizar en el equipo de flexión de vigas son los siguientes:

1. Prueba de viga – Dos apoyos y carga en el centro
2. Prueba de viga –Tres apoyos
3. Prueba de viga – Dos apoyos un empotramiento.

#### 4.7 Tabulación de resultados

##### Ensayo de viga simplemente apoyada con barra de acero A36 en equipo MM-45



##### Datos técnicos

Ancho= 18.8 mm, Espesor = 6.3 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 2.0 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$

Carga aplicada (P) = 1 kg = 1000 g

L= 133 cm, L/2= 66.5

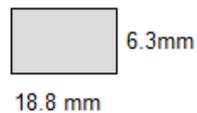


Tabla 27

##### Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero A36, MM-45

Mediciones	CC1 Reacción A (g)	CC2 Reacción B (g)	Punto C $\delta_{practico}$ (mm)
Medición 1	461	458	6,46
Medición 2	459	455	6,45
Medición 3	458	455	6,45
Medición 4	457	456	6,43
Medición 5	460	459	6,43
Promedio	459	456,6	6,444

##### Calculo Teórico

##### Inercia

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{1.88 \text{ cm} \times (0.63)^3 \text{ cm}^3}{12}$$

$$I = 0.039 \text{ cm}^4$$

### Deflexión

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48xEI}$$

$$\delta_{max} = \frac{1 \text{ kg} \times (133)^3 \text{ cm}^3}{48 \times 2.0 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 0.0391 \text{ cm}^4}$$

$$\delta_{max} = 0.62 \text{ cm} = 6.2 \text{ mm}$$

**Tabla 28**

**Error en ensayo de viga simplemente apoyada-Acero A36, MM-45**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	500	461	7,8
	By (g)	500	458	8,4
2	Ay (g)	500	459	8,2
	By (g)	500	455	9,0
3	Ay (g)	500	458	8,4
	By (g)	500	455	9,0
4	Ay (g)	500	457	8,6
	By (g)	500	456	8,8
5	Ay (g)	500	460	8,0
	By (g)	500	459	8,2
Promedio	Ay (g)	500	459	8,2
	By (g)	500	456,6	8,7
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,46	4,2
2	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,45	4,0
3	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,45	4,0
4	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,43	3,7
5	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,43	3,7
Promedio	$\delta_C$ (mm)	6,2	6,44	3,9

**Ensayo de viga simplemente apoyada con barra de aluminio en equipo MM-45**

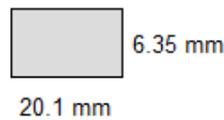
**Datos técnicos**

Ancho= 20.1 mm, Espesor = 6.35 mm

Módulo de elasticidad del aluminio  $E = 7.1 \times 10^5 \frac{kg}{cm^2}$

Carga aplicada (P) = 1 kg = 1000 g

L= 133 cm, L/2= 66.5



**Tabla 29**

**Ensayo de viga simplemente apoyada- Aluminio, MM-45**

	CC1	CC2	Punto C
Mediciones	Reacción A	Reacción B	$\delta_{practico}$
	(g)	(g)	(mm)
Medición 1	453	455	15,85
Medición 2	453	455	15,85
Medición 3	452	454	15,36
Medición 4	452	453	15,36
Medición 5	451	452	15,26
Promedio	452,2	453,8	15,536

*Calculo Teórico*

**Inercia**

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{2.01 \text{ cm} \times (0.635)^3 \text{ cm}^3}{12}$$

$$I = 0.042 \text{ cm}^4$$

**Deflexión**

$$\delta_{max} = \frac{PL^3}{48xEI}$$

1.64 cm= 16.4 mm

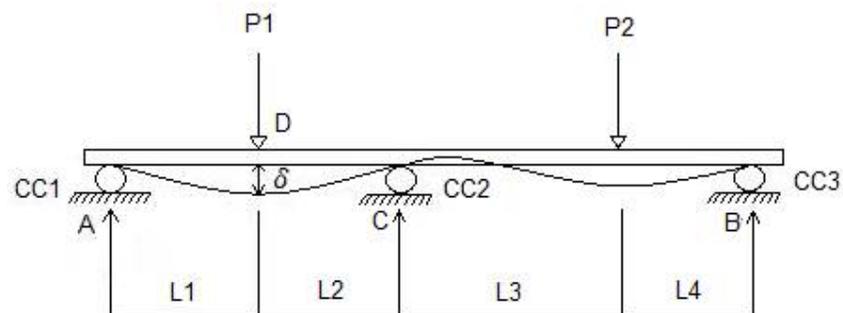
**Tabla 30**

**Error en ensayo de viga simplemente apoyada-Aluminio, MM-45**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	500	453	9,4
	By (g)	500	455	9,0
2	Ay (g)	500	453	9,4
	By (g)	500	455	9,0
3	Ay (g)	500	452	9,6
	By (g)	500	454	9,2
4	Ay (g)	500	452	9,6
	By (g)	500	453	9,4
5	Ay (g)	500	451	9,8
	By (g)	500	452	9,6
Promedio	Ay (g)	500	452,2	9,6
	By (g)	500	453,8	9,2
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	(mm)	16,4	15,85	3,4
2	(mm)	16,4	15,85	3,4
3	(mm)	16,4	15,36	6,3
4	(mm)	16,4	15,36	6,3
5	(mm)	16,4	15,26	7,0
Promedio	(mm)	16,4	15,536	5,26

**Ensayo de viga con tres apoyos simples con barra de acero A36 en equipo MM-**

**45**



**Datos técnicos**

Ancho= 18.8 mm, Espesor = 6.3 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 200 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

$P1 = 2 \text{ kg} = 2000 \text{ g}$

$P2 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$

$L1= 20 \text{ cm}$ ,  $L2 = 25 \text{ cm}$ ,  $L3 = 44 \text{ cm}$ ,  $L4 = 44 \text{ cm}$

**Tabla 31****Ensayo de viga con tres apoyos simples- Acero A36, MM-45**

Mediciones	CC1	CC2	CC3	Punto D $\delta$ (mm)
	Reacción A (g)	Reacción C (g)	Reacción B (g)	
Medición 1	753	1931	317	0,28
Medición 2	752	1933	317	0,28
Medición 3	753	1935	313	0,28
Promedio	752.6	1933	315.6	0,28

*Ejemplo de cálculo*

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 2 \text{ kg} = 29.43 \text{ N} \quad (1)$$

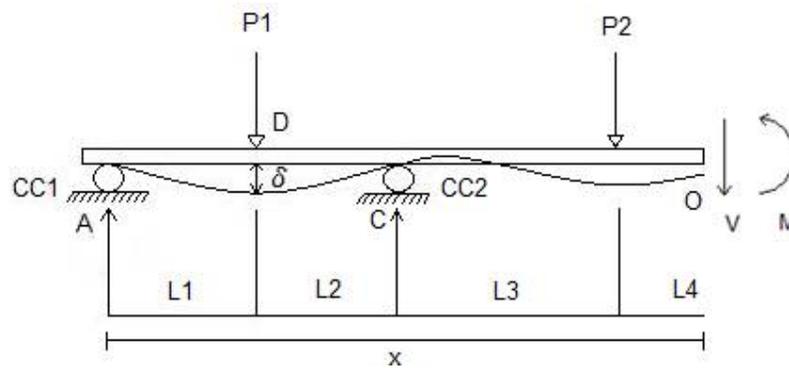
$$\sum MA = 0$$

$$19.62 \text{ N} * 200 \text{ mm} - Cy (450 \text{ mm}) + 9.81 \text{ N} * (890 \text{ mm}) - By(1330 \text{ mm}) = 0$$

$$Cy(450 \text{ mm}) + By(1330 \text{ mm}) = 8730.9 \text{ Nmm} + 3924 \text{ Nmm}$$

$$Cy(450 \text{ mm}) + By(1330 \text{ mm}) = 12654.9 \text{ Nmm}$$

$$Cy + 2.95By = 28.12 \text{ Nmm} \quad (2)$$



$$\sum M_o = 0$$

$$-M + Ay(x) - 19.62N(x - 200) + Cy(x - 450) - 9.81(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay \frac{(x)^2}{2} - 19.62N \frac{(x - 200)^2}{2} + Cy \frac{(x - 450)^2}{2} - 9.81 \frac{(x - 890)^2}{2} + C1$$

$$EI\delta = M = Ay \frac{(x)^3}{6} - 19.62N \frac{(x - 200)^3}{6} + Cy \frac{(x - 450)^3}{6} - 9.81 \frac{(x - 890)^3}{6} + C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 0, x = 0, C2 = 0$$

Apoyo en C

$$\delta = 0, x = 450$$

$$0 = Ay \frac{(450)^3}{6} - 19.62N \frac{(450 - 200)^2}{6} + C1x + C2$$

$$0 = 15.18x10^6Ay - 51.09x10^6 + C1 * 450 (3)$$

Apoyo en B

$$\delta = 0, x = 1330$$

$$0 = Ay \frac{(1330)^3}{6} - 19.62N \frac{(1330 - 200)^3}{6} + Cy \frac{(1330 - 450)^3}{6} - 9.81 \frac{(1330 - 890)^3}{6} + C1(1330)$$

$$0 = 392.10 \times 10^6 A_y - 4718.2 \times 10^6 + 113.57 \times 10^6 C_y - 139.27 \times 10^6 + 1330 C_1$$

$$0 = 392.10 \times 10^6 A_y - 4857.47 \times 10^6 + 113.57 \times 10^6 C_y + 1330 C_1 \quad (4)$$

$$A_y = 7.34 \text{ N} = 252.80 \text{ g}$$

$$B_y = 3.09 \text{ N} = 345.56 \text{ g}$$

$$C_y = 18.89 \text{ N} = 1399 \text{ g}$$

$$C_1 = -134107.84$$

$$EI\delta = A_y \frac{(x)^3}{6} + C_1 x$$

$$\delta = \frac{7.34 \frac{(200)^3}{6} + (-134107.84 * 200)}{200 \times 10^3 * 391.74} = 0.22 \text{ mm}$$

**Tabla 32**

**Error en ensayo de viga con tres apoyos -Acero A36, MM-45**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	Ay (g)	748,21	753	0,64
	Cy (g)	1925,58	1931	0,28
	By (g)	314,98	317	0,64
<b>2</b>	Ay (g)	748,21	752	0,51
	Cy (g)	1925,58	1933	0,39
	By (g)	314,98	317	0,64
<b>3</b>	Ay (g)	748,21	753	0,64
	Cy (g)	1925,58	1935	0,49
	By (g)	314,98	313	0,63
<b>Promedio</b>	Ay (g)	748,21	752,67	0,60
	Cy (g)	1925,58	1933	0,39
	By (g)	314,98	315,67	0,22
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	$\delta_D$ (mm)	0,22	0,28	27,27
<b>2</b>	$\delta_D$ (mm)	0,22	0,28	27,27
<b>3</b>	$\delta_D$ (mm)	0,22	0,28	27,27
<b>Promedio</b>	$\delta_D$ (mm)	0,22	0,28	27,27

**Ensayo de viga con tres apoyos simples con barra de aluminio en equipo MM-45**

**Datos técnicos**

Ancho= 20.1 mm, Espesor = 6.35 mm

Módulo de elasticidad del aluminio  $E= 70 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

$P1 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$

$P2 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$

$L1= 20 \text{ cm}$ ,  $L2 = 25 \text{ cm}$ ,  $L3 = 44 \text{ cm}$ ,  $L4 = 44 \text{ cm}$

**Tabla 33**

**Ensayo con tres apoyos simples- Aluminio, MM-45**

Mediciones	CC1	CC2	CC3	Punto D
	Reacción A	Reacción C	Reacción B	$\delta$
	(g)	(g)	(g)	(mm)
Medición 1	256	1384	346	0.10
Medición 2	266	1390	346	0.11
Medición 3	256	1385	346	0.10
Promedio	259.3	1386.3	346	0.103

*Ejemplo de cálculo*

$$EI\delta = Ay \frac{(x)^3}{6} + C1X$$

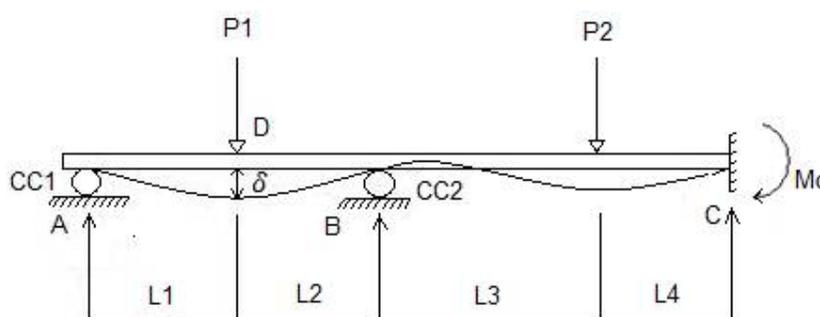
$$\delta = \frac{2.48 \frac{(200)^3}{6} + (-29039.43 * 200)}{70 \times 10^3 * 428.8}$$

$$\delta = 0.08 \text{ mm}$$

Tabla 34

## Error en ensayo de viga con tres apoyos -Aluminio, MM-45

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	252,8	256	1,3
	Cy (g)	1399,5	1384	1,1
	By (g)	345,5	346	0,1
2	Ay (g)	252,8	266	5,2
	Cy (g)	1399,5	1390	0,7
	By (g)	345,5	346	0,1
3	Ay (g)	252,8	256	1,3
	Cy (g)	1399,5	1385	1,0
	By (g)	345,5	346	0,1
Promedio	Ay (g)	252,8	259,3	2,6
	Cy (g)	1399,5	1386,3	0,9
	By (g)	345,5	346	0,1
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_D$ (mm)	0,08	0,10	25
2	$\delta_D$ (mm)	0,08	0,11	37,5
3	$\delta_D$ (mm)	0,08	0,10	25
Promedio	$\delta_D$ (mm)	0,08	0,103	29,1

Ensayo de viga con dos apoyos y un empotramiento con barra de acero A-36en equipo MM-45**Datos técnicos**

Ancho= 18.8 mm, Espesor = 6.3 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 200 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

$P1 = 2 \text{ kg} = 2000 \text{ g}$

$$P2 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$$

$$L1 = 20 \text{ cm}, L2 = 25 \text{ cm}, L3 = 44 \text{ cm}, L4 = 44 \text{ cm}$$

**Tabla 35**

**Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Acero A36, MM-45**

Mediciones	CC1	CC2	Punto D
	Reacción A	Reacción B	$\delta$
	(g)	(g)	(mm)
Medición 1	820	1721	0,31
Medición 2	838	1729	0,34
Medición 3	830	1728	0,31
Promedio	829.3	1726	0.32

**Ejemplo de cálculo**

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 3 \text{ kg} = 29.43 \text{ N} \quad (1)$$

$$\sum Mc = 0$$

$$Mc + 1330Ay + 880By = 26487 \text{ Nmm} \quad (2)$$

$$\sum Mo = 0$$

$$-M + Ay(x) - 19.62N(x - 200) + By(x - 450) - 9.81 N(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay \frac{(x)^2}{2} - 19.62N \frac{(x - 200)^2}{2} + By \frac{(x - 450)^2}{2} - 9.81 N \frac{(x - 890)^2}{2}$$

$$+ C1$$

$$EI\delta = M = Ay \frac{(x)^3}{6} - 19.62N \frac{(x - 200)^3}{6} + By \frac{(x - 450)^3}{6} - 9.81 N \frac{(x - 890)^3}{6}$$

$$+ C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 0, x = 0, C2 = 0$$

Apoyo en B

$$\delta = 0, x = 450$$

$$EI\delta = Ay \frac{(450)^3}{6} - 19.62N \frac{(450 - 200)^2}{6} + C1(450)$$

$$0 = 15.18x10^6 Ay - 51.05x10^6 + C1 * 450$$

$$51.05x10^6 = 15.18x10^6 Ay + C1 * 450 \quad (3)$$

Apoyo en C

$$\theta = 0, x = 1330$$

$$13.469x10^6 = 0.88x10^6 Ay + 0.3872x10^6 By + C1 \quad (4)$$

Apoyo en C

$$\delta = 0, x = 1330$$

$$4857.47x10^6 = 392.10x10^6 Ay + 113.57x10^6 By + 1330 * C1 \quad (5)$$

$$Ay = 7.97 \text{ N} = 812.43 \text{ g}$$

$$By = 17.07 \text{ N} = 1740 \text{ g}$$

$$Cy = 4.38 \text{ N} = 446.48 \text{ g}$$

$$C1 = -155446.1$$

$$Mc = 862.96 \text{ Nmm}$$

$$EI\delta = Ay \frac{(x)^3}{6} + C1x$$

$$\delta = \frac{7.97 \frac{(200)^3}{6} + (-155446.1 * 200)}{200x10^3 * 391.74}$$

$$\delta = 0.26 \text{ mm}$$

Tabla 36

**Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Acero A36, MM-45**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	Ay (g)	812,43	820	0,93
	By (g)	1740	1721	1,09
	Cy (g)	446,48	-	-
<b>2</b>	Ay (g)	812,43	838	3,15
	By (g)	1740	1729	0,63
	Cy (g)	446,48	-	-
<b>3</b>	Ay (g)	812,43	830	2,16
	By (g)	1740	1728	0,69
	Cy (g)	446,48	-	-
<b>Promedio</b>	Ay (g)	812,43	829,33	2,08
	By (g)	1740	1726	0,80
	Cy (g)	446,48	-	-
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	$\delta_D$ (mm)	0,26	0,31	19,2
<b>2</b>	$\delta_D$ (mm)	0,26	0,34	30,7
<b>3</b>	$\delta_D$ (mm)	0,26	0,31	19,2
<b>Promedio</b>	$\delta_D$ (mm)	0,26	0,32	23,03

**Ensayo de viga con dos apoyos y un empotramiento con barra de aluminio en equipo MM-45**

**Datos técnicos**

Ancho= 20.1 mm, Espesor = 6.35 mm

Módulo de elasticidad del aluminio  $E= 70 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

P1 = 1.5 kg = 1500 g

P2 = 0.5 kg = 500 g

L1= 20 cm, L2 = 25 cm, L3 = 44 cm, L4 = 44 cm

Tabla 37

## Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Aluminio, MM-45

Mediciones	CC1	CC2	Punto D
	Reacción A (g)	Reacción B (g)	$\delta$ (mm)
Medición 1	661	1132	0.70
Medición 2	663	1129	0.70
Medición 3	663	1129	0.70
Promedio	662.3	1130	0.70

Ejemplo de cálculo

$$EI\delta = Ay\frac{(x)^3}{6} + C1x$$

$$\delta = \frac{6.33\frac{(200)^3}{6} + (-128449 * 200)}{70 \times 10^3 * 428.8} = 0.57 \text{ mm}$$

Tabla 38

## Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Aluminio, MM-45

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	645,25	662	2,60
	By (g)	1162	1132	2,58
	Cy (g)	189,6	-	-
2	Ay (g)	645,25	663	2,75
	By (g)	1162	1129	2,84
	Cy (g)	189,6	-	-
3	Ay (g)	645,25	663	2,75
	By (g)	1162	1129	2,84
	Cy (g)	189,6	-	-
Promedio	Ay (g)	645,25	662,67	2,70
	By (g)	1162	1130	2,75
	Cy (g)	189,6	-	-
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_D$ (mm)	0,57	0,70	22,81
2	$\delta_D$ (mm)	0,57	0,70	22,81
3	$\delta_D$ (mm)	0,57	0,70	22,81
Promedio	$\delta_D$ (mm)	0,57	0,70	22,81

#### **4.8 Análisis de resultados**

- De acuerdo al análisis realizado en el ensayo de viga simplemente apoyada para una barra de acero A36 se observa que los datos no superan un error del 9 %, teniendo un promedio de 8.2% en la reacción del apoyo A y un 8.7 % en la reacción del apoyo B, con un error promedio en el desplazamiento de 3.9%, mientras que para una barra de aluminio en el mismo ensayo el error en las reacciones y desplazamiento se incrementa en un 1% aproximadamente con respecto al material anterior, siendo valores que se encuentran dentro de lo aceptable.
- Para el ensayo de viga con tres apoyos simple con barra de acero A36, se tiene que los datos obtenidos no superan un error del 1% en las reacciones en los apoyos A, B y C; mientras que para una barra de aluminio se tiene un error menor al 3% en las reacciones en los apoyos. En cambio en el desplazamiento el error para la barra de aluminio tiene un 2% mayor al obtenido para la barra de acero A36 que es del 27%.
- Para el ensayo de dos apoyos y un empotramiento se determina que el error en las reacciones en los apoyos A y B no supera el 3% tanto para una barra de acero A36 y una barra de aluminio, además se obtuvo un error en el desplazamiento del 23% aproximadamente en ambos materiales.

#### **4.9 Validación de resultados**

Para la validación de los resultados del equipo de vigas universales “MM-45”, se decidió realizar pruebas de repetibilidad tanto de las celdas de carga como del sensor de desplazamiento, además de comparar los resultados del equipo automatizado “MM-45” con el equipo manual “MM-10”, sometido a diferentes tipos de ensayos.

#### 4.9.1. Pruebas de repetibilidad

**Tabla 39**

**Repetibilidad en celdas con carga de 200 gr**

Carga Aplicada (g)	Análisis de repetibilidad celda de carga CC1		Análisis de repetibilidad celda de carga CC2		Análisis de repetibilidad celda de carga CC3	
	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)
200	199	0.5	200	0	200	0
200	199	0.5	200	0	200	0
200	199	0.5	200	0	200	0
200	200	0	200	0	200	0
200	200	0	200	0	200	0

**Tabla 40**

**Repetibilidad en celdas con carga de 500 gr**

Carga Aplicada (g)	Análisis de repetibilidad celda de carga CC1		Análisis de repetibilidad celda de carga CC2		Análisis de repetibilidad celda de carga CC3	
	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)
500	498	0.4	497	0.6	497	0.6
500	498	0.4	497	0.6	497	0.6
500	498	0.4	497	0.6	496	0.8
500	498	0.4	497	0.6	496	0.8
500	499	0.2	497	0.6	497	0.6

**Tabla 41**

**Repetibilidad en celdas con carga de 1000 gr**

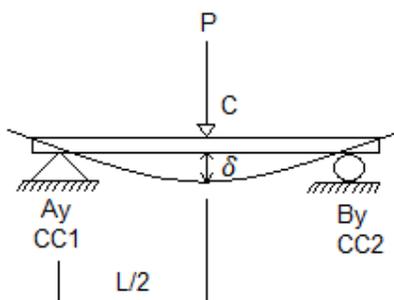
Carga Aplicada (g)	Análisis de repetibilidad celda de carga CC1		Análisis de repetibilidad celda de carga CC2		Análisis de repetibilidad celda de carga CC3	
	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)
1000	997	0.3	994	0.6	993	0.7
1000	997	0.3	995	0.5	993	0.7
1000	997	0.3	995	0.5	993	0.7
1000	998	0.2	995	0.5	993	0.7
1000	997	0.3	995	0.5	993	0.7

**Tabla 42**  
**Repetibilidad del potenciómetro lineal**

Análisis de repetibilidad Prueba #1		Análisis de repetibilidad Prueba #2		Análisis de repetibilidad Prueba #3	
0.45 mm		0.7 mm		1.00 mm	
Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)	Valor obtenido	Error (%)
0.47	4.4	0.73	4.2	1.04	4
0.46	2.2	0.74	5.7	1.03	3
0.45	0	0.74	5.7	1.02	2
0.46	2.2	0.74	5.7	1.03	3
0.45	0	0.74	5.7	1.02	2

#### 4.9.2. Análisis comparativo de equipo de vigas universales “MM-45” y “MM-10”

##### Ensayo de viga simplemente apoyada con barra de acero en equipo MM-45



##### Datos técnicos

Ancho= 19.3 mm, Espesor = 6.36 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 2.1 \times 10^6 \frac{kg}{cm^2}$

Carga aplicada (P) = 1 kg = 1000 g

*Calculo Teórico*

##### Inercia

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{1.93 \text{ cm} \times (0.63)^3 \text{ cm}^3}{12}$$

$$I = 0.0402 \text{ cm}^4$$

Longitud entre apoyos = 133 cm,  $\frac{L}{2} = 66.5 \text{ cm}$

$$M_{\max} = \frac{PL}{4} = \frac{1 \text{ kg} \times 133 \text{ cm}}{4} = 33.25 \text{ kg.cm}$$

$$R = V = \frac{P}{2} = 0.5 \text{ kg} = 500 \text{ g}$$

$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{48xExI}$$

$$\delta_{\max} = \frac{1 \text{ kg} \times (133)^3 \text{ cm}^3}{48 \times 2.1 \times 10^6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \times 0.0402 \text{ cm}^4}$$

$$\delta_{\max} = 0.58 \text{ cm} = 5.8 \text{ mm}$$

**Tabla 43**

**Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-45**

	CC1	CC2	Punto C
Mediciones	Reacción A (g)	Reacción B (g)	$\delta_{\text{practico}}$ (mm)
Medición 1	469	467	5.43
Medición 2	467	466	5.42
Medición 3	471	468	5.41
Medición 4	502	501	5.8
Medición 5	488	487	5.62
Promedio	479.4	477.8	5.53

El desplazamiento en los apoyos A y B tienden a 0.

Tabla 44

## Error en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-45

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	500	469	6,2
	By (g)	500	467	6,6
2	Ay (g)	500	467	6,6
	By (g)	500	466	6,8
3	Ay (g)	500	471	5,8
	By (g)	500	468	6,4
4	Ay (g)	500	502	0,4
	By (g)	500	501	0,2
5	Ay (g)	500	488	2,4
	By (g)	500	487	2,6
Promedio	Ay (g)	500	479,4	4,12
	By (g)	500	477,8	4,44
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,43	6,38
2	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,42	6,55
3	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,41	6,72
4	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,8	0,00
5	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,61	3,28
Promedio	$\delta_C$ (mm)	5,8	5,53	4,66

*Ejemplo de Cálculo*

$$\%E = \frac{E_{teorico} - E_{practico}}{E_{teorico}} * 100$$

$$\%E = \frac{500 - 479.4}{500} * 100 = 4.12$$

*Ejemplo de Cálculo*

$$\%E = \frac{\delta_T - \delta_P}{\delta_T} * 100$$

$$\%E = \frac{5.8 - 5.53}{5.8} * 100 = 4.65$$

**Ensayo de viga simplemente apoyada con barra de acero en equipo MM-10****Tabla 45****Ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10**

Mediciones	RAy (N)	RBy(N)	$\Delta A$ (mm)	$\Delta B$ (mm)	$\Delta C$ (mm)
1	4.5	4.75	1.6	1.6	7.3
2	4.5	4.5	1.6	1.5	7.2
3	4.5	4.5	1.6	1.5	7.2
4	4.5	4.75	1.6	1.5	7.2
5	4.75	4.75	1.6	1.6	7.2
<b>Promedio</b>	4.55	4.65	1.6	1.54	7.22

**Tabla 46****Error de reacciones en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10**

Mediciones	Práctico				Teórico	Error (%)	
	RAy (N)	RBy (N)	RAy (g)	RBy (g)	RAy = RBy (g)	RAy	RBy
1	4.5	4.75	458.71	484.2	500	8.25	3.16
2	4.5	4.5	458.71	458.71	500	8.25	8.25
3	4.5	4.5	458.71	458.71	500	8.25	8.25
4	4.5	4.75	458.71	484.2	500	8.25	3.16
5	4.75	4.75	484.2	484.2	500	3.16	3.16
<b>Promedio</b>	4.55	4.65	463.81	474.00	500	7.23	5.19

**Tabla 47****Error de desplazamiento en ensayo de viga simplemente apoyada- Acero, MM-10**

$\Delta A$ (mm)	$\Delta B$ (mm)	$\Delta C$ (mm)	$\delta_{practico}$ (mm)	$\delta_{teorico}$ (mm)	Error (%)
1.6	1.6	7.3	5.7	5.8	1.72
1.6	1.5	7.2	5.65	5.8	2.59
1.6	1.5	7.2	5.65	5.8	2.59
1.6	1.5	7.2	5.65	5.8	2.59
1.6	1.6	7.2	5.6	5.8	3.45
1.6	1.54	7.22	5.65	5.8	2.59

*Ejemplo de cálculo*

$$\delta = \Delta C - \frac{\Delta A + \Delta B}{2}$$

$$\delta = 7.22 \text{ mm} - \frac{1.6 \text{ mm} + 1.54 \text{ mm}}{2}$$

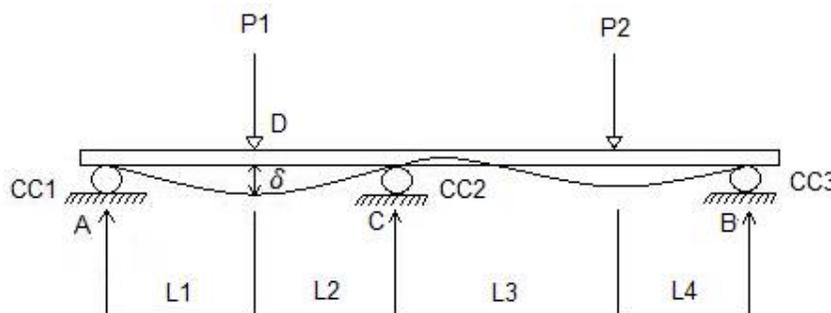
$$\delta = 5.65 \text{ mm}$$

Tabla 48

Comparación de errores en ensayo de viga simplemente apoyada de ambos equipos

Medición	Error (%)		Error (%)		Error (%)	Error (%)
	Equipo MM-45		Equipo MM-10		Equipo MM-45	Equipo MM-10
	RAy	RBy	RAy	RBy	$\delta C$ (mm)	$\delta C$ (mm)
1	6.2	6.6	8.25	3.16	6.37	1.72
2	6.6	6.8	8.25	8.25	6.55	2.59
3	5.8	6.4	8.25	8.25	6.72	2.59
4	0.4	0.2	8.25	3.16	0	2.59
5	2.4	2.6	3.16	3.16	3.1	3.45
<b>Promedio</b>	4.12	4.44	7.23	5.19	4.65	2.59

### Ensayo de viga con tres apoyos simples con barra de acero en equipo MM-45



### Viga de acero



### Datos técnicos

Ancho= 19.3 mm, Espesor = 6.3 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 210 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

$$P1 = 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$$

$$P2 = 1 \text{ kg} = 2000 \text{ g}$$

$$L1 = 20 \text{ cm}, L2 = 25 \text{ cm}, L3 = 44 \text{ cm}, L4 = 44 \text{ cm}$$

**Tabla 49**

**Ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-45**

Mediciones	CC1	CC2	CC3	Punto D
	Reacción A	Reacción C	Reacción B	$\delta$
	(g)	(g)	(g)	(mm)
Medición 1	275	1392	348	0,05
Medición 2	264	1382	349	0,04
Medición 3	287	1408	347	0,05
Promedio	275.3	1394	348	0,046

**Inercia**

$$I = \frac{bxh^3}{12}$$

$$I = \frac{19.3 \text{ mm} \times (6.3)^3 \text{ mm}^3}{12}$$

$$I = 402.15 \text{ mm}^4$$

Cálculo de deflexión con carga aplicada a 20 cm de apoyo A.

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N} \quad (1)$$

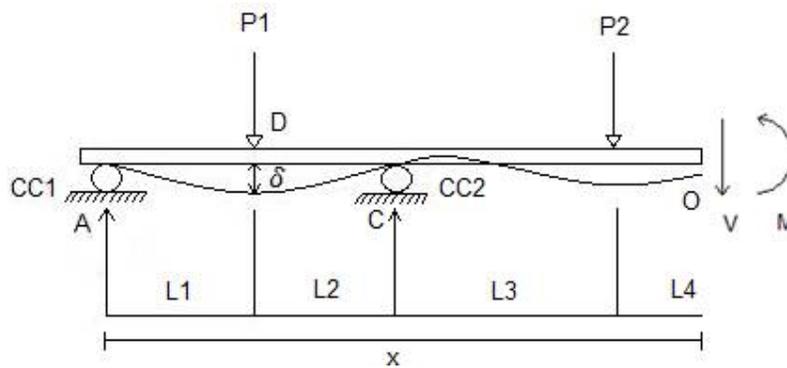
$$\sum MA = 0$$

$$9.81 \text{ N} * 200 \text{ mm} - Cy (450 \text{ mm}) + 9.81 \text{ N} * (890 \text{ mm}) - By(1330 \text{ mm}) = 0$$

$$Cy(450 \text{ mm}) + By(1330 \text{ mm}) = 1962 \text{ Nmm} + 8730.9 \text{ Nmm}$$

$$Cy(450 \text{ mm}) + By(1330 \text{ mm}) = 10692.9 \text{ Nmm}$$

$$Cy + 2.95By = 23.76 \text{ Nmm} \quad (2)$$



$$\sum M_o = 0$$

$$-M + Ay(x) - 9.81N(x - 200) + Cy(x - 450) - 9.81(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay\frac{(x)^2}{2} - 9.81N\frac{(x - 200)^2}{2} + Cy\frac{(x - 450)^2}{2} - 9.81\frac{(x - 890)^2}{2} + C1$$

$$EI\delta = M = Ay\frac{(x)^3}{6} - 9.81N\frac{(x - 200)^3}{6} + Cy\frac{(x - 450)^3}{6} - 9.81\frac{(x - 890)^3}{6} + C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 0, x = 0, C2 = 0$$

Apoyo en C

$$\delta = 0, x = 450$$

$$0 = Ay\frac{(450)^3}{6} - 9.81N\frac{(450 - 200)^2}{6} + C1x + C2$$

$$0 = 15.18x10^6Ay - 25.54x10^6 + C1 * 450 \quad (3)$$

Apoyo en B

$$\delta = 0, x = 1330$$

$$0 = Ay \frac{(1330)^3}{6} - 9.81N \frac{(1330 - 200)^3}{6} + Cy \frac{(1330 - 450)^3}{6} - 9.81 \frac{(1330 - 890)^3}{6} + C1(1330)$$

$$0 = 392.10x10^6Ay - 2359.1x10^6 + 113.57x10^6Cy - 139.27x10^6 + 1330C1$$

$$0 = 392.10x10^6Ay - 2498.37x10^6 + 113.57x10^6Cy + 1330C1 \quad (4)$$

$$Ay = 2.48 \text{ N} = 252.80 \text{ g}$$

$$By = 3.39 \text{ N} = 345.56 \text{ g}$$

$$Cy = 13.73 \text{ N} = 1399 \text{ g}$$

$$C1 = -29039.43$$

$$EI\delta = Ay \frac{(x)^3}{6} + C1X$$

$$\delta = \frac{2.48 \frac{(200)^3}{6} + (-29039.43 * 200)}{210X10^3 * 402.15} = 0.03 \text{ mm}$$

**Tabla 50**

**Error en ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-45**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	Ay (g)	252,8	275	8,8
	Cy (g)	1399	1392	0,5
	By (g)	345,5	348	0,7
<b>2</b>	Ay (g)	252,8	264	4,4
	Cy (g)	1399	1382	1,2
	By (g)	345,5	349	1,0
<b>3</b>	Ay (g)	252,8	287	13,5
	Cy (g)	1399	1408	0,6
	By (g)	345,5	347	0,4
<b>Promedio</b>	Ay (g)	252,8	275,3	8,9
	Cy (g)	1399	1394	0,7
	By (g)	345,5	348	0,7
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	$\delta_D$ (mm)	0,03	0,05	66,7
<b>2</b>	$\delta_D$ (mm)	0,03	0,04	33,3
<b>3</b>	$\delta_D$ (mm)	0,03	0,05	66,7
<b>Promedio</b>	$\delta_D$ (mm)	0,03	0,046	55,56

**Ensayo de viga con tres apoyos simples con barra de acero en equipo**

**MM-10**

Para el cálculo teórico en el equipo de vigas universales MM-10 se considera el desplazamiento que se posee en los apoyos, a continuación se detalla el cálculo realizado.

**Tabla 51**

**Ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-10**

Mediciones	RAy (g)	RCy(g)	RBy(g)	$\delta A$ (mm)	$\delta C$ (mm)	$\delta B$ (mm)	$\delta D$ (mm)
1	509,7	1019,4	458,7	1,8	3,5	1,45	2,2
2	458,7	815,5	433,2	1,6	3,3	1,5	2,1
3	509,7	1019,4	458,7	1,8	3,5	1,45	2,2
Promedio	492,7	951,4	450,2	1,7	3,4	1,46	2.16

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N} \quad (1)$$

$$\sum MA = 0$$

$$Cy + 2.95By = 23.76 \text{ Nmm} \quad (2)$$

$$\sum Mo = 0$$

$$-M + Ay(x) - 9.81N(x - 200) + Cy(x - 450) - 9.81(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay \frac{(x)^2}{2} - 9.81N \frac{(x - 200)^2}{2} + Cy \frac{(x - 450)^2}{2} - 9.81 \frac{(x - 890)^2}{2} + C1$$

$$EI\delta = M = Ay \frac{(x)^3}{6} - 9.81N \frac{(x - 200)^3}{6} + Cy \frac{(x - 450)^3}{6} - 9.81 \frac{(x - 890)^3}{6} + C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 1.8, x = 0, C2 = 152.01 \times 10^6$$

Apoyo en C

$$\delta = 1.45, x = 450$$

$$EI\delta = Ay \frac{(450)^3}{6} - 9.81N \frac{(450 - 200)^2}{6} + C1x + 152.01 \times 10^6$$

$$210 \times 10^3 * 402.15 * 1.45 = 15.18 \times 10^6 Ay - 25.54 \times 10^6 + C1 * 450 + 152.01 \times 10^6$$

$$-4.02 \times 10^6 = 15.18 \times 10^6 Ay + C1 * 450 \quad (3)$$

Apoyo en B

$$\delta = 3.5, x = 1330$$

$$2641.97 \times 10^6 = 392.10 \times 10^6 Ay + 113.57 \times 10^6 Cy + 1330C1 \quad (4)$$

$$Ay = 3.80 \text{ N} = 387.35 \text{ g}$$

$$By = 4.072 \text{ N} = 415.08 \text{ g}$$

$$Cy = 11.74 \text{ N} = 1196.73 \text{ g}$$

$$C1 = -137142.29$$

$$EI\delta = Ay \frac{(x)^3}{6} + C1x + C2$$

$$\delta = \frac{3.80 \frac{(200)^3}{6} + (-137142.29 * 200) + 152.01 \times 10^6}{210 \times 10^3 * 402.15}$$

$$\delta = 1.53 \text{ mm}$$

Tabla 52

## Error en ensayo de viga con tres apoyos- Acero, MM-10

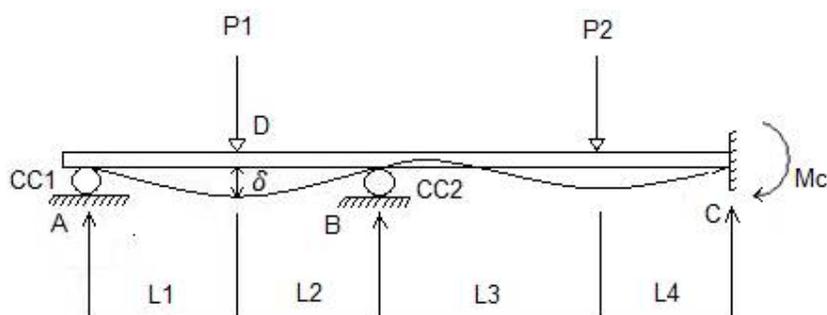
Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	387,4	509,6	31,6
	Cy (g)	1196,7	1019,3	14,8
	By (g)	415,1	458,7	10,5
2	Ay (g)	341,5	458,7	34,3
	Cy (g)	1265,0	815,5	35,5
	By (g)	391,4	433,2	10,7
3	Ay (g)	387,4	509,6	31,6
	Cy (g)	1196,7	1019,3	14,8
	By (g)	415,1	458,7	10,5
Promedio	Ay (g)	372,06	492,6	32,4
	Cy (g)	1219,5	951,4	22,0
	By (g)	407,2	450,2	10,6
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_D$ (mm)	1,5	2,2	46.67
2	$\delta_D$ (mm)	1,4	2,1	50.0
3	$\delta_D$ (mm)	1,5	2,2	46.67
Promedio	$\delta_D$ (mm)	1,46	2.16	47.78

Tabla 53

## Comparación de errores en ensayo de viga con tres apoyos de ambos equipos

Medición	Error (%)			Error (%)			Error (%)	
	Equipo MM-45			Equipo MM-10			Equipo MM-45	Equipo MM-10
	RAy	RCy	RBy	RAy	RCy	RBy	$\delta_D$	$\delta_D$
1	8,8	0,5	0,7	31,6	14,8	10,5	66,7	46.67
2	4,4	1,2	1	34,3	35,5	10,7	33,3	50.00
3	13,5	0,6	0,4	31,6	14,8	10,5	66,7	46.67
Promedio	8,9	0,7	0,7	32,5	22	10,6	55,56	47.78

**Ensayo de viga con dos apoyos simples un empotramiento con barra de acero en equipo MM-45**



**Viga de acero**



**Datos técnicos**

Ancho= 19.3 mm, Espesor = 6.3 mm

Módulo de elasticidad del acero  $E= 210 \times 10^3 \frac{N}{mm^2}$

$P1= 1.5 \text{ kg} = 1500 \text{ g}$

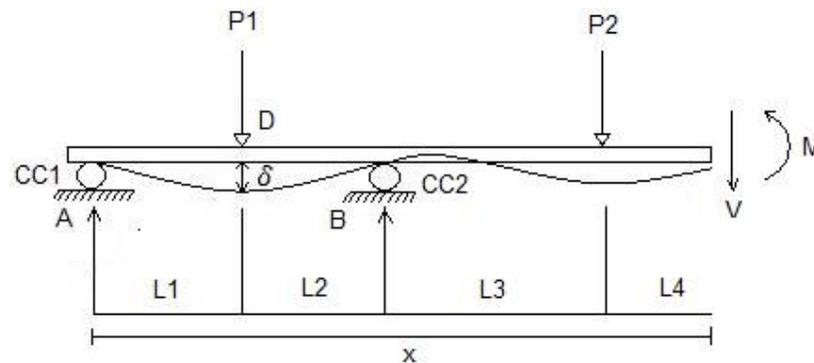
$P2 = 0.5 \text{ kg} = 500 \text{ g}$

$L1= 20 \text{ cm}$ ,  $L2 = 25 \text{ cm}$ ,  $L3 = 44 \text{ cm}$ ,  $L4 = 44 \text{ cm}$

**Tabla 54**

**Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento-Acero, MM-45**

Mediciones	CC1	CC2	Punto D
	Reacción A	Reacción B	$\delta$
	(g)	(g)	(mm)
Medición 1	635	1097	0,29
Medición 2	676	1149	0,29
Medición 3	674	1142	0,29
Promedio	661.6	1129.3	0,29



### Calculo teórico equipo MM-45

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N} \quad (1)$$

$$\sum Mc = 0$$

$$Mc + 1330Ay + 880By = 18782.7 \text{ Nmm} \quad (2)$$

$$\sum Mo = 0$$

$$-M + Ay(x) - 14.71N(x - 200) + By(x - 450) - 4.905(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay \frac{(x)^2}{2} - 14.71N \frac{(x - 200)^2}{2} + By \frac{(x - 450)^2}{2} - 4.905 \frac{(x - 890)^2}{2} + C1$$

$$EI\delta = M = Ay \frac{(x)^3}{6} - 14.71N \frac{(x - 200)^3}{6} + By \frac{(x - 450)^3}{6} - 4.905 \frac{(x - 890)^3}{6} + C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 0, x = 0, C2 = 0$$

Apoyo en B

$$\delta = 0, x = 450$$

$$EI\delta = Ay \frac{(450)^3}{6} - 14.71N \frac{(450 - 200)^2}{6} + C1(450)$$

$$0 = 15.18x10^6Ay - 38.30x10^6 + C1 * 450$$

$$38.30x10^6 = 15.18x10^6Ay + C1 * 450 \quad (3)$$

Apoyo en C

$$\theta = 0, x = 1330$$

$$9.864x10^6 = 0.88x10^6Ay + 0.3872x10^6By + C1 \quad (4)$$

Apoyo en C

$$\delta = 0, x = 1330$$

$$3607.13x10^6 = 392.10x10^6Ay + 113.57x10^6By + 1330 * C1 \quad (5)$$

$$Ay = 6.33 \text{ N} = 645.25 \text{ g}$$

$$By = 11.4 \text{ N} = 1162 \text{ g}$$

$$Cy = 1.86 \text{ N} = 189.60 \text{ g}$$

$$C1 = -128449$$

$$Mc = 323.34 \text{ Nmm}$$

$$EI\delta = Ay \frac{(x)^3}{6} + C1x$$

$$\delta = \frac{6.33 \frac{(200)^3}{6} + (-128449 * 200)}{210x10^3 * 402.15}$$

$$\delta = 0.21 \text{ mm}$$

Tabla 55

Error en ensayo de viga dos apoyos un empotramiento, Acero-MM-45

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
1	Ay (g)	645,25	635	1,6
	By (g)	1162	1097	5,5
	Cy (g)	189,6	-	-
2	Ay (g)	645,25	676	4,7
	By (g)	1162	1149	1,1
	Cy (g)	189,6	-	-
3	Ay (g)	645,25	674	4,45
	By (g)	1162	1142	1,72
	Cy (g)	189,6	-	-
Promedio	Ay (g)	645,25	661,6	2,5
	By (g)	1162	1129,3	2,8
	Cy (g)	189,6	-	-
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
1	$\delta_D$ (mm)	0,21	0,29	38,1
2	$\delta_D$ (mm)	0,21	0,29	38,1
3	$\delta_D$ (mm)	0,21	0,29	38,1
Promedio	$\delta_D$ (mm)	0,21	0,29	38,1

Ensayo de viga con dos apoyos simples un empotramiento con barra de acero en equipo MM-10

Tabla 56

Ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Acero, MM-10

Mediciones	RAy (g)	RBy(g)	$\delta A$ (mm)	$\delta B$ (mm)	$\delta D$ (mm)
1	586.1	1223.2	2.9	2.4	3
2	560.65	1248.7	2.8	2.4	2.9
3	586.1	1223.2	2.9	2.4	3
Promedio	577.6	1231.7	2.86	2.4	2.96

$$\sum Fy = 0$$

$$Ay + Cy + By = 2 \text{ kg} = 19.62 \text{ N} \quad (1)$$

$$\sum Mc = 0$$

$$Mc + 1330Ay + 880By = 18782.7 \text{ Nmm} \quad (2)$$

$$\sum \mathbf{M}_o = \mathbf{0}$$

$$-M + Ay(x) - 14.71N(x - 200) + By(x - 450) - 4.905(x - 890) = 0$$

$$EI\theta = M = Ay \frac{(x)^2}{2} - 14.71N \frac{(x - 200)^2}{2} + By \frac{(x - 450)^2}{2} - 4.905 \frac{(x - 890)^2}{2} + C1$$

$$EI\delta = M = Ay \frac{(x)^3}{6} - 14.71N \frac{(x - 200)^3}{6} + By \frac{(x - 450)^3}{6} - 4.905 \frac{(x - 890)^3}{6} + C1x + C2$$

Apoyo en A

$$\delta = 2.9, x = 0, C2 = 244.90x10^6$$

Apoyo en B

$$\delta = 2.4, x = 450$$

$$EI\delta = Ay \frac{(450)^3}{6} - 14.71N \frac{(450-200)^2}{6} + C1(450)$$

$$-3.92x10^6 = 15.18x10^6Ay + C1 * 450 \quad (3)$$

Apoyo en C

$$\theta = 0, x = 1330$$

$$9.864x10^6 = 0.88x10^6Ay + 0.3872x10^6By + C1 \quad (4)$$

Apoyo en C

$$\delta = 0, x = 1330$$

$$3362.23x10^6 = 392.10x10^6Ay + 113.57x10^6By + 1330 * C1 \quad (5)$$

$$Ay = 4.82 \text{ N} = 491.33 \text{ g}$$

$$By = 14.94 \text{ N} = 1522 \text{ g}$$

$$Cy = -0.173 \text{ N} = 17.63 \text{ g}$$

$$C1 = -171574.01$$

$$Mc = -790.695 \text{ Nmm}$$

$$EI\delta = Ay\frac{(x)^3}{6} + C1x$$

$$\delta = \frac{4.82\frac{(200)^3}{6} + (-171574.01 * 200) + 244.90 \times 10^6}{210 \times 10^3 * 402.15} = 2.56 \text{ mm}$$

Tabla 57

**Error en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento- Acero, MM-10**

Mediciones	Reacciones	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	Ay (g)	491,3	586,13	19,301
	By (g)	1522,93	1223,2	19,681
	Cy (g)	-17,63	-	
<b>2</b>	Ay (g)	483,18	560,65	16,033
	By (g)	1534,1	1248,72	18,602
	Cy (g)	-18,34	-	
<b>3</b>	Ay (g)	491,3	586,13	19,301
	By (g)	1522,93	1223,2	19,681
	Cy (g)	-17,63	-	
<b>Promedio</b>	Ay (g)	488,59	577,63	18,212
	By (g)	1526,65	1231,70	19,321
	Cy (g)	-17,866	-	
Mediciones	Desplazamiento	Teórico	Práctico	Error (%)
<b>1</b>	$\delta_D$ (mm)	2.56	3	17.18
<b>2</b>	$\delta_D$ (mm)	2.51	2.9	15.53
<b>3</b>	$\delta_D$ (mm)	2.56	3	17.18
<b>Promedio</b>	$\delta_D$ (mm)	2.54	2.96	16.5

Tabla 58

**Comparación de errores en ensayo de viga con dos apoyos un empotramiento de ambos equipos**

Medición	Error (%)		Error (%)		Error (%)	Error (%)
	Equipo MM-45		Equipo MM-10		Equipo MM-45	Equipo MM-10
	RAy	RBy	RAy	RBy	$\delta_D$	$\delta_D$
<b>1</b>	1,6	5,5	19,30	19,68	38,1	17.18
<b>2</b>	4,7	1,1	16,03	18,60	38,1	15.53
<b>3</b>	4,45	1,72	19,30	19,68	38,1	17.18
<b>Promedio</b>	2,5	2,8	18,21	19,32	38,1	16.5

## CAPÍTULO 5

### 5. MANUALES

#### 5.1 Guía para la realización de la practica

La guía para la realización de la práctica de flexión de vigas se encuentra en el anexo H.

#### Variables a considerar en la toma de datos del equipo

**Tabla 59**

#### Variables del equipo

Ensayo de flexión de vigas	
<i>Celda de carga1-CC1</i>	Toma de dato en gramos
<i>Celda de carga2-CC2</i>	Toma de dato en gramos
<i>Celda de carga3-CC3</i>	Toma de dato en gramos
<i>Sensor de desplazamiento</i>	Toma de dato en mm

**Tabla 60**

#### Datos técnicos para la práctica

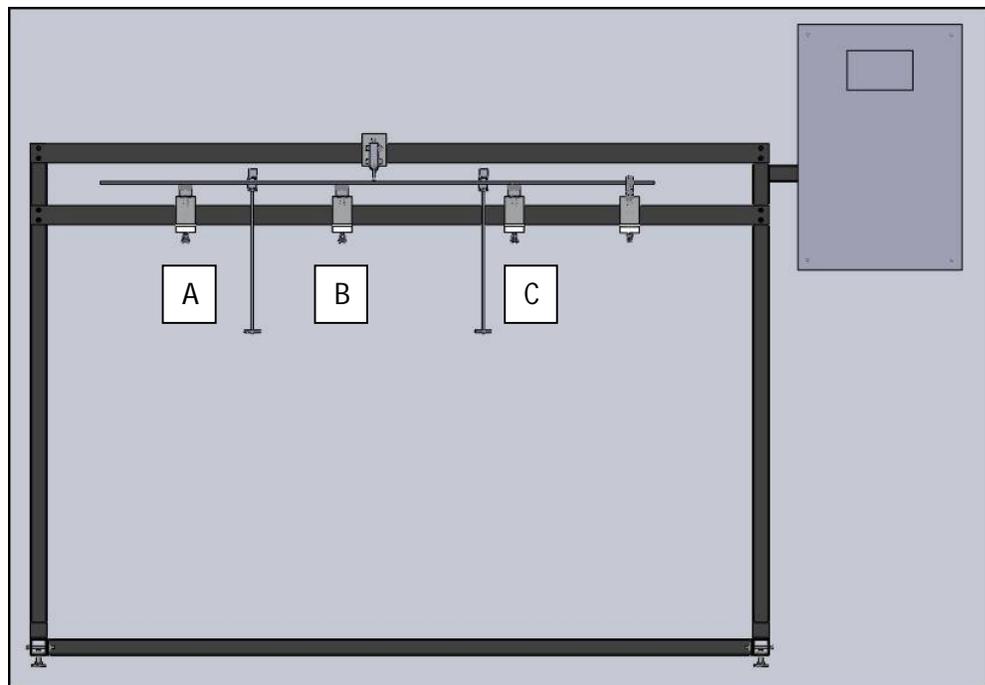
<b>PROBETA</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<i>Material</i>	-	-	-
<i>Ancho (cm)</i>	-	-	-
<i>Espesor (cm)</i>	-	-	-
<i>Longitud entre apoyos (cm)</i>	-	-	-
<i>Módulo de elasticidad kg/cm<sup>2</sup></i>	-	-	-
<i>Carga aplicada (g)</i>	-	-	-
<i>Deflexión (mm)</i>	-	-	-

**Tipo de probeta**      Mayor espesor ----- Menor espesor -----

Reacción apoyo A o CC1      -----

Reacción apoyo B o CC2	-----	-----	-----
Reacción apoyo C o CC3	-----	-----	-----
Deformación experimental	-----	-----	-----
Deformación teórica	-----	-----	-----

El objetivo de la práctica es determinar las propiedades mecánicas a flexión de los materiales como acero, aluminio y comparar la deformación obtenida de forma teórica con la experimental.



**Figura 63. Esquema del equipo**

## 5.2 Manual de operación

Es muy importante para evitar cualquier tipo de accidentes o daños del equipo de ensayo de flexión de vigas, se realice la lectura minuciosa del manual de operación.

A continuación se detallará una serie de instrucciones y datos del fabricante antes de operarlo.

A. *Datos del fabricante y del servicio técnico*

**Tabla 61**

**Datos del fabricante**

<b>Fabricante y servicio técnico</b>	<b>Patricio Pabón</b>
Dirección	Vicentina- Iberia y Jerez N2130
País	Ecuador
Teléfono	0992524473
Email	Patojpl89@hotmail.com

B. *Descripción*

- El manejo del equipo automatizado de flexión de vigas para la adquisición de datos se realizará a través de una HMI marca Siemens ubicada en un panel de control en el lado derecho de la estructura del equipo.
- La manipulación de la HMI se realiza de forma directa en la pantalla ya que es táctil y posee 4 botones disponibles para el operador que permite el enceramiento de los datos de las celdas de carga y del sensor de desplazamiento.

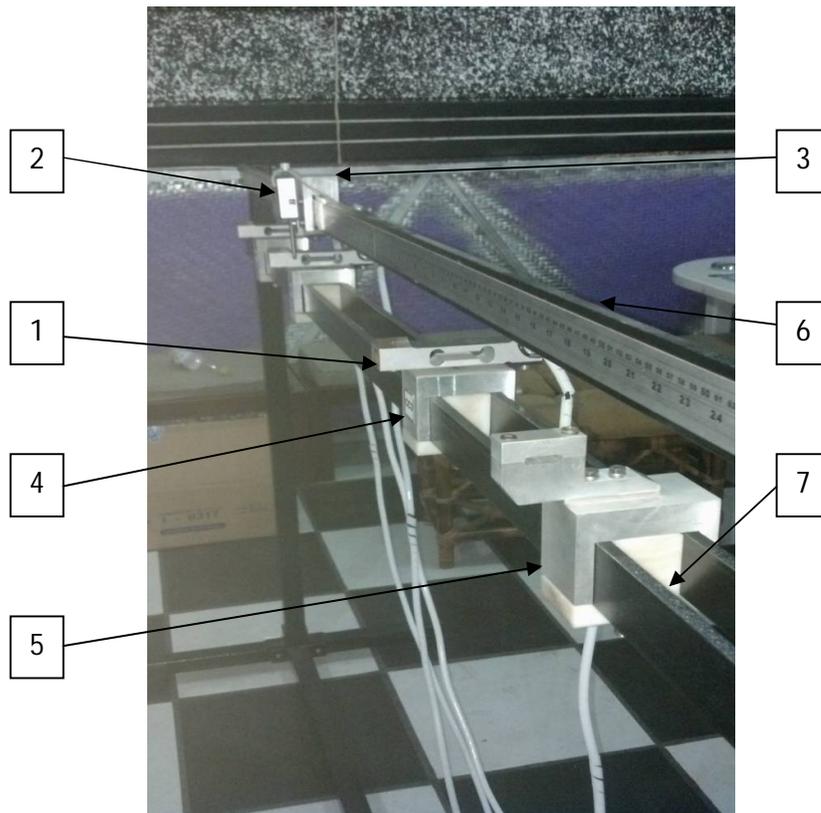
C. *Identificación de las partes del equipo de flexión de vigas*

**Descripción de las partes de la estructura**

Las partes de la estructura del equipo automatizado se describen a continuación:

1. Celdas de carga
2. Sensor de desplazamiento
3. Coche portapotenciómetro
4. Coche portaceldas

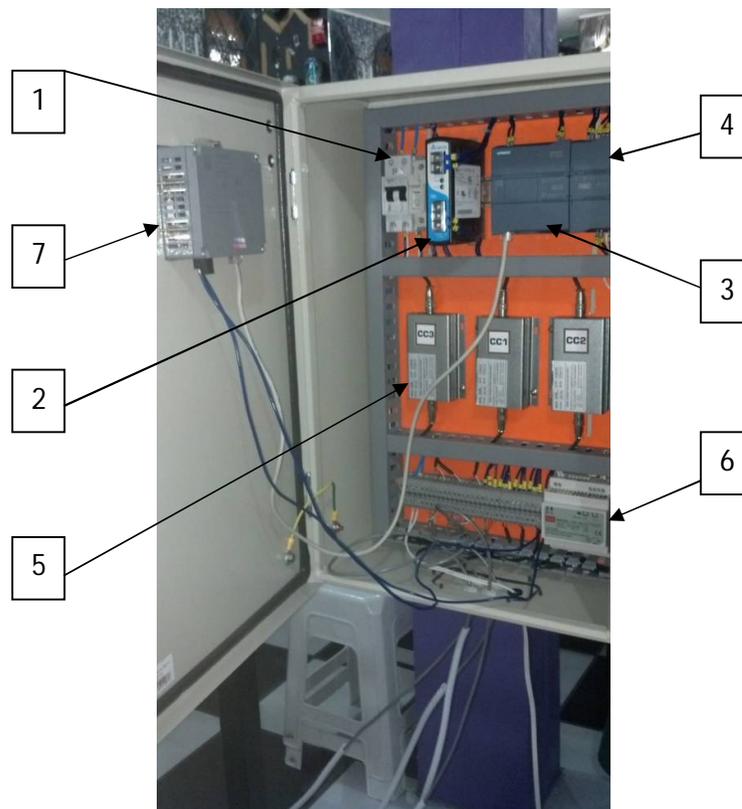
5. Coche portaempotramiento
6. Platina superior (corredera de sensor de desplazamiento)
7. Platinas inferiores (corredera de celdas y empotramiento)



**Figura 64. Partes de la estructura del equipo de flexión de vigas**

#### **Descripción de las partes del panel de control**

1. Braker de 4 A de dos polos
2. Fuente de poder Delta de 24 VDC
3. PLC Siemens S7-1200 modelo 1212C
4. Módulo de expansión
5. Tarjetas analógicas
6. Fuente de poder de 12VDC
7. HMI KTP 400



**Figura 65. Componentes eléctricos y electrónicos del panel de control**

*D. Manejo*

- 1) Conectar el equipo automatizado de flexión de vigas a una red eléctrica de 110 o 220VAC.
- 2) Desplazar los sensores de carga en la ubicación deseada y fijarla a la corredera mediante la tuerca mariposa.
- 3) Colocar el sensor de desplazamiento en la posición de la viga en la que se desee conocer la deflexión y se vaya aplicar la carga, asegurarlo mediante el seguro posterior del portapotenciometro, como también el seguro inferior utilizando una llave allen 5/32.

- 4) Realizando los tres pasos anteriores la HMI que se encuentra en el lado derecho de la estructura estará prendida y desplegará una pantalla principal con la información del equipo.



**Figura 66. Pantalla principal que despliega la HMI**

- 5) Posteriormente se debe presionar el botón “Siguiete” situado en la parte inferior de la HMI.
- 6) A continuación se mostrara una pantalla mostrando cuatro alternativas de tipos de ensayos, en las cuales tenemos:
- Dos apoyos
  - Dos apoyos un empotramiento
  - Tres apoyos
  - Tres apoyos un empotramiento

El operario deberá seleccionar el tipo de ensayo deseado y presionar el botón con el nombre correspondiente.



**Figura 67. Tipos de ensayos que muestra la HMI**

7) Una vez seleccionado el tipo de ensayo se procede a encerrar los sensores con el botón mostrado a continuación. 

Nota: Es importante conocer que el mismo proceso de encerramiento se lo puede realizar utilizando los botones inferiores de la HMI. 

- F1 encera la celda de carga 1 (cc1)
- F2 encera la celda de carga 1 (cc2)
- F3 encera la celda de carga 1 (cc3)
- F4 encera el sensor de desplazamiento.

8) Si se desea elegir otro tipo de ensayo presione el botón , y volverá a la pantalla secundaria que despliega las opciones de ensayos.

9) Proceder con la realización de la práctica basada con la guía que se encuentra en el anexo H.

10) Una vez concluida la práctica regresar a la pantalla principal y desconectar el equipo.

### 5.3 Manual de mantenimiento

#### *Uso y descripción para realizar el mantenimiento del equipo*

Para el mantenimiento del equipo de flexión de vigas es necesario realizar limpiezas periódicas con un paño seco de los pilares y platinas, además de ello utilizar forros plásticos para cubrir la estructura junto con el panel de control.

Una vez concluida la práctica el estudiante deberá colocar sobre el equipo los forros plásticos sobre la estructura evitando manipular las celdas de carga o potenciómetro lineal.

De igual forma se deberá colocar sobre el panel de control el forro plástico respectivo, cuidando no presionar o lastimar la HMI, ya que esta requiere mucho cuidado debido a la sensibilidad que esta posee por ser pantalla táctil.



Para tener un mantenimiento preventivo del equipo de flexión de vigas se deberá realizar limpiezas periódicas de la estructura como también la calibración de los sensores cada año.

#### *Acceso a los elementos del panel de control*

Para el mantenimiento de los elementos del interior del tablero de control es necesario:

1. Desconectar la conexión de la red eléctrica del equipo
2. Utilizar la llave original del tablero para abrirlo.
3. Verificar la conexión de red del PLC a la HMI.
4. Verificar la alimentación de la HMI con la fuente de 24Vdc.
5. Para cerrar la puerta del tablero de control verificar que no existan cables sueltos o propensos a ser lastimados.

### ***Contraindicaciones de uso y peligros***

El equipo automatizado de flexión de vigas es una máquina que para su correcto funcionamiento deberá estar en un lugar sin exceso de humedad y a temperatura ambiente.

Es importante verificar que la conexión a la red eléctrica sea correcta, puesto que puede causar daños a la parte electrónica y eléctrica del equipo, además debe estar ubicada en un sitio que evite posibles contactos involuntarios.



Prohibido realizar limpieza de los sensores o tablero de control con elementos húmedos.

### **5.4 Manual de seguridad**

Para evitar cualquier tipo de daño material o personal es importante seguir las instrucciones de seguridad. Estas instrucciones ayudan para el uso adecuado del equipo y de cada una de sus partes, dando lugar a una mayor vida útil.

#### **Celdas de carga**

- No se debe aplicar cargas que superen los 10 kg en cada una de las celdas de carga puestos que puede causar daños en la parte interna del instrumento.
- Las personas que manipulen el equipo de flexión de vigas no podrán arrimarse a las celdas de carga, puesto que estas están diseñadas para soportar cargas en el extremo libre donde se encuentran los apoyos triangulares y no para soportar cargas excesivas en la parte central de la celda u otras partes de la misma.

**Potenciómetro lineal**

- No podrá retirarse los anillos de caucho colocados en el potenciómetro lineal en la parte superior del vástago, ya que este permite evitar un error en la lectura del PLC de la señal del sensor. Si los empaques sufren algún tipo de daño con el tiempo o por su manipulación será necesario ser reemplazados y colocados en la misma posición.
- Manipular con cuidado el sensor desplazamiento, evitando golpes, soltar o levantar bruscamente el vástago.

**Conexión a la red eléctrica**

- Verificar que la conexión a la red eléctrica sea de 110 o 220 Vac.
- Desconectar la conexión eléctrica una vez terminada la practica
- Dejar el braker hacia arriba todo el tiempo para evitar algún tipo de corto circuito y cuidar los elementos electrónicos.
- No dejar el cable de la conexión eléctrica en el suelo.
- No poner en marcha el equipo si el cable de alimentación se encuentra deteriorado.

**Limpieza panel de control**

- Evitar la entrada de humedad al interior del tablero de control
- Desenchufar el equipo antes de realizar cualquier tipo de limpieza en el interior del tablero.

**HMI**

- No manipular la HMI con los dedos mojados o húmedos.
- Evitar el contacto a la pantalla con otro tipo de elementos.

### Estructura-pórtico

- No utilizar sustancias como alcohol o solventes para la limpieza de la estructura.



- Utilizar desarmadores o llaves Allen adecuadas para el desmontaje de cualquier elemento.



- Para el tipo de apoyo rectangular es necesario utilizar pernos M6x25 para la sujeción a la celda de carga, mientras que para el apoyo triangular se utilizara tornillos M5x25.



Solo personal autorizado podrá realizar algún tipo de trabajo de servicio o reparación.



Si el PLC muestra una luz roja en vez de verde al encender el equipo o durante la práctica, llamar a servicio técnico.

## **CAPÍTULO 6**

### **6. ANALISIS ECONOMICO Y FINANCIERO**

#### **6.1 Análisis económico**

Este tipo de análisis dentro la presente investigación busca exponer los costos en los que se ha debido incurrir para construir el equipo automatizado para las prácticas de flexión de vigas para el laboratorio de mecánica de materiales de la ESPE, con la finalidad que se determine los requerimientos en materiales y equipos, así como en los honorarios a profesionales y gastos indirectos de fabricación.

##### **6.1.1. Costos Directos**

Para este caso en particular se considera como costos directos a aquellos que se identifican directamente con un objeto de costos (en el caso particular que se está desarrollando lo constituye al equipo automatizado para las prácticas de vigas para el laboratorio).

Generalmente, los costos directos se derivan de la existencia de aquello cuyo costo se trata de determinar, como es el caso del equipo automatizado para las prácticas de flexión de vigas.

En la construcción del equipo automatizado se priorizan los materiales y equipos ya que se componen de un gran número de piezas que deben ser compactadas de forma que se logre unificarlas y cumplir el propósito con el cual se lo ha construido, que es básicamente determinar la deflexión que sufren las vigas al estar sometidas a cargas variables.

**Tabla 62**  
**Costos Directos**

COSTOS DIRECTOS				
Costos de la estructura				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
6	metros	Tubo cuadrado de 40 x 40	\$ 10,00	\$ 60,00
6	metros	Platina de 9 mm de espesor y 50 mm de ancho	\$ 5,00	\$ 30,00
40	unidad	Pernos	\$ 4,00	\$ 4,00
1/2	libra	Electrodos	\$ 1,00	\$ 5,00
1	unidad	Duralón	\$ 20,00	\$ 20,00
1	unidad	Duraluminio	\$ 50,00	\$ 50,00
1	unidad	Pintura electrostática	\$ 60,00	\$ 60,00
10	unidad	Regatones	\$ 4,00	\$ 4,00
2	unidad	Regla de acero de 100 cm	\$ 8,00	\$16,00
TOTAL				<b>\$ 245,00</b>
Costos del sistema de control				
CANTL.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
1	unidad	PLC Siemens S7-1200 modelo 1212C AC/DC/RLY	\$ 348,00	\$ 348,00
1	unidad	Módulo de expansión [Siemens SM1231	\$ 299,20	\$ 299,20
1	unidad	Panel touch KTP400	\$ 437,60	\$ 437,60
TOTAL				<b>\$ 1.084,80</b>
Costos del sistema de alimentación				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
1	unidad	Fuente DELTA con salida de 24Vdc	\$ 60,00	\$ 60,00
1	unidad	Fuente Q & W con salida de 12Vdc	\$ 25,00	\$ 25,00
TOTAL				<b>\$ 85,00</b>
Costos del sistema de sensores e instrumentación				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
3	unidad	Celdas de carga Unipunto marca TEDEA	\$ 112,00	\$ 336,00
1	unidad	Sensor de desplazamiento novotechnik	\$ 320,00	\$ 320,00
1	unidad	Importación de sensor de desplazamiento	\$ 45,00	\$ 45,00
3	unidad	Tarjetas analógicas	\$ 130,00	\$ 390,00
TOTAL				<b>\$ 1.091,00</b>
Otros costos				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
1	unidad	Tablero de control	\$ 72,40	\$ 72,40
1	unidad	Gastos varios	\$ 50,00	\$ 50,00
		Cables número 18		
		Ferrules		
		Borneras		
		Marquillas para cable		
		Fusible de 2A		
TOTAL				<b>\$ 122,40</b>
TOTAL GENERAL COSTOS DIRECTOS				<b>\$ 2.628,20</b>

### 6.1.2. Costos Indirectos

Vienen a ser aquellos costos que de una u otra forma se deben realizar para obtener finalmente el equipo automatizado para las prácticas de flexión de vigas, pese a que no son muy representativos es importante identificarlos y considerarlos al construir la totalidad de costos.

**Tabla 63**  
**Costos Indirectos**

COSTOS INDIRECTOS				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
8	metros	Cable de celda	\$ 2,24	\$ 17,92
4	metros	Prensas estopas	\$ 0,28	\$ 1,12
1	unidad	Breaker Siemens 4A de 2 Polos	\$ 20,00	\$ 20,00
1	unidad	Cautín	\$ 5,00	\$ 5,00
1	unidad	Pomada para soldar	\$ 3,50	\$ 3,50
1/2	metros	Alambre de estaño	\$ 4,00	\$ 2,00
1	unidad	Spaguettis termoencogibles	\$ 1,00	\$ 1,00
1	unidad	Protector espiralado de cable de celda	\$ 10,00	\$ 10,00
1	unidad	Forros plásticos de equipo	\$ 50,00	\$ 50,00
1	unidad	Taípe	\$ 0,50	\$ 0,50
1	unidad	Movilización	\$ 40,00	\$ 40,00
1	unidad	Comunicación (tarjetas de celular)	\$ 20,00	\$ 20,00
1	unidad	Alquiler de fresadora de torreta	\$ 80,00	\$ 80,00
1	unidad	Otros (impresiones, copias e internet)	\$ 25,00	\$ 25,00
TOTAL				<b>\$ 276,04</b>

### 6.1.3. Honorarios profesionales auxiliares

Se vincula a la remuneración que recibe un profesional de forma libre por su trabajo. Los honorarios, por lo tanto, equivalen a la paga o el sueldo que percibe una persona que ejerce su profesión de manera independiente (y no bajo relación de dependencia).

Los honorarios son la paga por una serie de servicios que presta una persona natural a otra natural o jurídica.

**Tabla 64**  
**Honorarios profesionales auxiliares**

HONORARIOS PROFESIONALES AUXILIARES				
CANT.	UNIDAD	DESCRIPCIÓN	VALOR UNIT.	TOTAL
		Ingeniero mecánico	\$ 120,00	\$ 120,00
1	unidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taladrado</li> <li>• Soldadura de piezas</li> <li>• Fresado de piezas</li> <li>• Pintado del pórtico</li> </ul>		
		Ingeniero electrónico	\$ 100,00	\$ 100,00
1	unidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexiones del sistema de control.</li> <li>• Conexiones del sistema de alimentación.</li> <li>• Programación</li> </ul>		
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 220,00</b>

#### 6.1.4. Costos Totales

Finalmente se exponen todos los costos y gastos realizados en el propósito de la presente disertación por bloque de cuentas como consta en la siguiente tabla:

**Tabla 65**  
**Costos Totales**

DESCRIPCIÓN	TOTAL
Costos Directos	\$ 2.628,20
Costos Indirectos	\$ 276,04
Honorarios profesionales auxiliares	\$ 220,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 3.124,24</b>

#### 6.2 Análisis financiero

El análisis financiero, es el encargado de cuidar los recursos financieros de toda entidad. Básicamente los egresos efectuados son ligeramente onerosos, sin embargo el espíritu colaborador y el ánimo del mismo de contribuir a la institución han sido la razón por la cual decidió el autor de este trabajo investigativo cubrir con todos los valores que generaron la construcción del equipo automatizado para las prácticas de flexión de vigas para el laboratorio de mecánica de materiales en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

## CAPÍTULO 7

### 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- La construcción de un equipo automatizado, el cual emplea una mejor tecnología que el equipo ya existente en el laboratorio de mecánica de materiales para la realización de la práctica de flexión de vigas, permite eliminar el error de visualización como el error de paralaje, generado al momento de la toma de datos del desplazamiento de la viga al someterse a una carga, ya que la medición pasa de ser análoga a digital.
- Con el equipo automatizado de flexión de vigas se logra optimizar tiempos en la realización de la práctica de entre 2 a 3 minutos, además de facilitar la ejecución de la misma al estudiante, ajustándose a las condiciones de trabajo, mediante el uso de instrumentos electrónicos que permiten una adquisición y visualización de los datos precisa de los parámetros de carga con una resolución de 1 gramo y desplazamiento con una resolución de 0.01 milímetro.
- En el ensayo de viga simplemente apoyada con carga en el centro, al utilizar vigas de acero y aluminio, empleando el equipo de vigas universales MM-45, se determinó que el error en las reacciones de los apoyos no superar el 5 %, mientras que en el desplazamiento el error no supera el 10 %, por lo tanto con este análisis se determina que el equipo es confiable para este tipo de ensayo.
- Para el ensayo de viga con tres apoyos simples con barra de acero A36, se tiene que los datos obtenidos no superan un error del 1% en las reacciones en los apoyos A, B y C; mientras que para una barra de aluminio se tiene un error menor al 3% en las reacciones en los apoyos. En cambio en el desplazamiento el

error para la barra de aluminio tiene un 2% mayor al obtenido para la barra de acero A36 que es de 27%, se concluye que para el parámetro de desplazamiento el porcentaje de error es medianamente elevado y aceptable para realizar este ensayo, considerando que el sensor detecta variaciones en centésima de milímetro, siendo valores muy pequeños que a la mínima diferencia aumentan el error considerablemente.

- Para el ensayo de dos apoyos un empotramiento al utilizar el equipo de vigas universales MM-45 se determinó que el error en las reacciones en los apoyos A y B no supera el 3% tanto para una barra de acero A36 y una barra de aluminio, además se obtuvo un error en el desplazamiento del 23% aproximadamente en ambos materiales, considerando la complejidad del ensayo se llega a la conclusión que estos valores de error obtenidos son aceptables para la realización de la práctica.
- Al realizar una comparación entre el equipo automatizado de vigas universales MM-45 y el MM-10 se pudo concluir que para el ensayo de viga simplemente apoyada, el equipo MM-45 en las reacciones de los apoyos tiene un error menor con 4.5% con respecto al MM-10 con 7.2%, por el contrario el parámetro de desplazamiento aumenta su error de 2.6 % a 4.6% y en algunas ocasiones es el mismo.
- Con el análisis de comparación realizado en los equipos de vigas universales MM-45 y MM-10 se obtiene para los ensayos de tres apoyos y dos apoyos un empotramiento un menor error en las reacciones de los apoyos en el equipo automatizado MM-45 con un promedio de error que no supera el 10 % respecto al otro que posee un 25 %. En el parámetro de desplazamiento los valores

obtenidos en el equipo MM-10 muestra un mejor comportamiento, dando como resultado un menor error, con una diferencia promedio entre ambos de 10 a 20 %.

- En el equipo de vigas universales MM-45 se mejoró la resolución para instrumentos de medición de carga con respecto al equipo MM-10 ya que se obtiene una resolución de 1 gramo, producto de ello se logró reducir el error en cada uno de los ensayos de flexión de vigas en un 10 a 15 %, mientras que para el parámetro de desplazamiento no se logró mejorar la precisión en cada uno de los ensayos, ya que la sensibilidad del potenciómetro lineal no supera la sensibilidad que posee los comparadores de reloj en el equipo MM-10.

## **7.2 Recomendaciones**

- Revisar el manual de seguridad del equipo de flexión de vigas antes de empezar a operar la máquina como un medio preventivo que evite daños a los instrumentos electrónicos y eléctricos del equipo de vigas universales MM-45.
- No abrir la puerta del tablero de control, sin la supervisión de un profesional debido a que se encuentran elementos delicados para el usuario y pudiendo resultar averiados los elementos y alterar el buen funcionamiento del equipo de flexión de vigas.
- Se recomienda para el equipo de flexión de vigas MM-45 trabajar con cargas que oscilen entre 1 y 3 kg entre apoyos, ya que se logra disminuir el error del equipo, de igual manera es importante tomar en cuenta las longitudes entre apoyos, ya que estas no deben ser tramos cortos puesto que provocarían deformaciones pequeñas que pueden incrementar el error en el ensayo, por ello

se recomienda utilizar longitudes mayores o iguales a  $L/2$  entre cada celda de carga, ver anexo G.

- No manipular indebida e inapropiadamente los elementos de medición, ya sea para las celdas de carga como para el sensor de desplazamiento, puesto que puede ocasionar daños de los instrumentos y afectar sus características de operación.
- Se recomienda la ubicación del equipo sobre superficies horizontales que permitan un correcto desempeño tanto para la medición de cargas como del desplazamiento.
- Para el mantenimiento o reparación del equipo de vigas universales MM-45 se recomienda que solo personal autorizado o calificado realice dichos procedimientos.

## BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

- Aimen. (15 de Julio de 2005). *Obtesol*. Obtenido de Obtesol:  
[http://www.obtesol.es/index.php?option=com\\_content&task=category&sectionid=4&id=36&Itemid=30](http://www.obtesol.es/index.php?option=com_content&task=category&sectionid=4&id=36&Itemid=30)
- Alciatore, D., & Histan, M. (2008). *Mecatronica y los sistemas de medicion*. Marcombo.
- Amorim, S. (25 de Enero de 2000). *monografias*. Obtenido de monografias:  
<http://www.monografias.com/trabajos/aceros/aceros.shtml?news>
- Arenas, V. (17 de Febrero de 2006). *Monografias*. Obtenido de  
[http://www.monografias.com/usuario/perfiles/voscar\\_arenas/monografias](http://www.monografias.com/usuario/perfiles/voscar_arenas/monografias)
- ASTM. (s.f.). *ASTM International*. Obtenido de ASTM International:  
<http://www.astm.org/search/fullsite-search.html?query=astm%20e290&>
- Balcells, J., & Romeral, J. L. (1998). *Automatas programables*. Marcombo.
- Bernau. (1958). *Elementos de metalografia y de acero al carbono*. Santiago: Andres bello.
- Bilurbina, L., Liesa, F., & Iribarren, J. (2003). *Corrosion y proteccion*. Barcelona: UPC.
- Bohler. (s.f.). *Bohler*. Retrieved from  
[http://www.bohlercolombia.com/spanish/b\\_1816.php?query=v945](http://www.bohlercolombia.com/spanish/b_1816.php?query=v945)
- Bolton, W. (2001). *Mecatronica sistemas de control electronico en ingenieria y electrica*. Marcombo.
- Bosch. (s.f.). *Bosch*. Obtenido de <http://www.bosch-professional.com/boptbeusearchfrontend/es/es/search/search.htm?sparam=sierra%20de%20disco&searchIssuedByUser=true>
- Bravo, I. (2006). *Electronica Analogica: desarrollo de productos electronicos*. Barcelona: CEAC.
- Bueno Saenz, D. (4 de Diciembre de 2012). *Slideshare*. Obtenido de Slideshare:  
<http://www.slideshare.net/DavidBuenoSaenz/ensayo-de-flexion-estatico-15486832>
- Callister, W. D. (2002). *Introduccion a la ciencia e ingenieria de los materiales*. Barcelona: Reverte.
- Callister, W. D. (2007). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Barcelona: Reverte.
- Castro, A., & Fusario, R. (2006). *Teleinformatica para ingenieros en sistemas de informacion*. Barcelona: Reverte S.A.
- Charlie. (4 de Octubre de 2012). *Prezi*. Obtenido de Prezi:  
<http://prezi.com/rdsqph9n7tlh/duraluminio/>
- Construnario. (s.f.). *Construnario*. Obtenido de  
<http://www.construnario.com/catalogo/abus-gruas-sl/productos>
- Delta. (s.f.). *Delta Electronics*. Obtenido de  
[http://www.delta.com.tw/product/em/control/plc/download/catalogue/DV\\_P\\_C\\_PR\\_20091019.pdf](http://www.delta.com.tw/product/em/control/plc/download/catalogue/DV_P_C_PR_20091019.pdf)
- DELTA. (s.f.). *Varitel-Ingenieria Electronica S.A*. Obtenido de Varitel-Ingenieria Electronica S.A: [http://www.varitel.com/html/fuentes\\_switching\\_delta\\_-\\_desc.html](http://www.varitel.com/html/fuentes_switching_delta_-_desc.html)

- Dipac. (s.f.). *Dipac*. Obtenido de [http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca\\_codigo=3403](http://www.dipacmanta.com/alineas.php?ca_codigo=3403)
- Echeverria, L. (2009). *Insdecem*. Obtenido de Instrumentacion: <http://www.insdecem.com/archivos/Instrumenta.pdf>
- Espe. (s.f.). *Espe*. Obtenido de Espe: <http://www.espe.edu.ec/portal/portal/main.do?sectionCode=78#IND>
- Flores Cruz, D. (14 de Octubre de 2004). *mailxmail*. Obtenido de <http://www.mailxmail.com/curso-introduccion-ciencia-materiales/propiedades-materiales-mecanicas>
- Galeano, P. (s.f.). *Universidad Tecnologica de Pereira*. Obtenido de Propiedades de los materiales: <http://www.utp.edu.co/~publio17/propiedades.htm>
- Gamez. (7 de Octubre de 2012). *slideshare*. Obtenido de slideshare: <http://www.slideshare.net/gamezybanuelos/pintura-electrostatica-presentacion-14627461>
- Garmo, P., & Kohser, R. (1988). *Materiales y procesos de fabricacion*. Reverte.
- Gomez, F., & Alcaraz, D. (2004). *Manual basico de corrosion para ingenieros*. Murcia.
- González, L. (2004). *Angelfire*. Obtenido de <http://www.angelfire.com/pro2/resmat/U02/01diagramaesfuerzo/diaesf.htm>
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de Manufactura Mode*. Pearson.
- Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. Pearson educacion.
- Gumercindo, E. (s.f.). *Overblog*. Obtenido de Overblog: [http://es.overblog.com/Pintura\\_electrostatica\\_usos\\_y\\_aplicaciones-1228321775-art299046.html](http://es.overblog.com/Pintura_electrostatica_usos_y_aplicaciones-1228321775-art299046.html)
- Ingelsoft. (s.f.). *Ingelsoft*. Obtenido de Ingelsoft: <http://www.ingelsoft.com/>
- Kuhlmann, F., & Alonso, A. (s.f.). *Biblioteca digital del ilce*. Obtenido de [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/149/htm/sec\\_5.htm](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/149/htm/sec_5.htm)
- Loiola. (2001, Diciembre). *Automatas programables*. Retrieved from <http://www.sc.ehu.es/sbweb/webcentro/automatica/WebCOMH1/PAGINA%20PRINCIPAL/PLC/plc.htm>
- Lorday, K. (s.f.). *e How en espanol*. Obtenido de e How en espanol: [http://www.ehowenespanol.com/propiedades-usos-del-acero-inoxidable-lista\\_318289/](http://www.ehowenespanol.com/propiedades-usos-del-acero-inoxidable-lista_318289/)
- Marin Garcia, J. M. (2008). *Apuntes de diseño de maquinas*. Alicante: Club Universitario.
- Molera Sola, P. (1990). *Metales resistentes a la corrosion*. Barcelona: Marcombo.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de maquinas*. Pearson educacion.
- Navia, R. (5 de Septiembre de 2013). *Prezi*. Obtenido de Prezi: <http://prezi.com/xsi3rzzphwvt/plasticos/>
- Novotechnik. (s.f.). *Novotechnik*. Obtenido de Novotechnik: <http://www.novotechnik.com/pdfs/TRTRS.pdf>
- Pesaje y control. (s.f.). *Pesaje y control*. Obtenido de <http://www.pesaje-agropecuario.com.mx/celdas-de-carga.html>

- Q&W. (s.f.). *Q&W*. Obtenido de Q&W:  
[http://chinasuppliers.alibaba.com/search/products/din\\_power\\_supply.html](http://chinasuppliers.alibaba.com/search/products/din_power_supply.html)
- Rodriguez, J., & Castro, L. (2006). *Procesos industriales para materiales metalicos*. Vision Libros.
- Scaime. (s.f.). *scaime*. Obtenido de scaime:  
<http://www.scaime.com/en/48/produit/strain-gage-conditioner.html>
- Sensing. (s.f.). *sensing*. Obtenido de sensing: [http://www.sensores-de-medida.es/sensing\\_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES\\_35/Sensores-de-distancia\\_36/Sensores-de-distancia-LVDT\\_55/](http://www.sensores-de-medida.es/sensing_sl/SENSORES-Y-TRANSDUCTORES_35/Sensores-de-distancia_36/Sensores-de-distancia-LVDT_55/)
- Sensortronics. (s.f.). *Ingelsoft*. Obtenido de Ingelsoft:  
<http://www.ingelsoft.com/docs/sensortronics/60001.pdf>
- Sick. (s.f.). *Sick*. Retrieved from Sick:  
<https://www.mysick.com/ecat.aspx?go=FinderSearch&Cat=Row&At=Fa&Cult=English&FamilyID=402&Category=Produktfinder&Selections=48072>
- Siemens. (s.f.). *sebatelec*. Obtenido de sebatelec:  
<http://www.sebatelec.com/siemenspendiente.html>
- Siemens. (s.f.). *Siemens Industry*. Obtenido de  
<https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7212-1BE31-0XB0>
- Tedeia. (s.f.). *Ingelsoft*. Obtenido de <http://www.ingelsoft.com/docs/tedeia/1022.pdf>
- Ulloa, C. (Noviembre de 2007). *Electro Industria*. Obtenido de Electro Industria:  
<http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=837>
- Varitel. (s.f.). *Varitel-Ingenieria Electronica S.A*. Obtenido de Varitel-Ingenieria Electronica S.A: [http://www.varitel.com/html/fuentes\\_switching\\_delta\\_-\\_desc.html](http://www.varitel.com/html/fuentes_switching_delta_-_desc.html)
- Villalva, H. (21 de Junio de 2011). *slideshare*. Obtenido de slideshare:  
<http://www.slideshare.net/florencioinformatica/los-metales-ferrosos-y-no-ferrosos>
- Villeta, J. (2000). *Diseño de proyectos de ingeniería*. Santo Domingo, R. D.: Buho.
- Vistazo. (3 de Marzo de 2009). *Vistazo*. Obtenido de  
<http://www.vistazo.com/webpages/pais/?id=7926>